

Mathematical modeling of photometric variability of semiregular pulsating stars at the asymptotic giant branch and classification

Larisa S. Kudashkina

Department of Higher and Applied Mathematics, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

kudals04@mail.ru

Аннотация

В работе приведен современный обзор звезд, занимающих положение на асимптотической ветви гигантов на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Отмечены наиболее интересные проблемы, связанные с этими объектами, а также уделено внимание классификации и эволюционному статусу. Методами математического моделирования получена средняя кривая блеска полуправильного сверхгиганта S Персея. Показано, что с помощью периодограммного анализа можно выделить период главного колебания и провести дальнейшую детальную классификацию полуправильных пульсирующих звезд, аппроксимируя их средние кривые блеска тригонометрическим полиномом. Предлагается использовать фотометрический период для оценки физических параметров пульсирующих звезд.

Abstract

In this paper, we present a current review on stars at the position at the asymptotic giant branch at the Hertzsprung-Russell diagram. Underlined are most interesting problems associated with these objects, and we also focus on classification and evolutionary status. Using the methods of mathematical modeling, we obtained a smoothed light curve of the semiregular supergiant S Persei. It is shown, that using the periodogram analysis, we can distinguish between the main variations and conduct further detailed classification of semi-regular pulsating stars, approximating their average light curves using a trigonometric polynomial. It is proposed to use the photometric period to estimate the physical parameters of pulsating stars.

Введение

Звезды образуются из материи, которая существует в космосе. Межзвездные облака газа и пыли служат областями, где рождаются звезды.

Первоначальное состояние – протозвезда – это огромное, вращающееся, сжимающееся газообразное облако. Гравитационное сжатие приводит к быстрому повышению температуры и давления.

Когда температура в центре протозвезды превысит 10 млн. К, начинаются реакции ядерного синтеза, в результате которых высвобождается огромное количество энергии. Когда направленная наружу сила давления горячих газов приходит в равновесие с силами гравитации, стягивающими вещество в центр, протозвезда перестает сжиматься и начинает излучать свой свет в космос. Протозвезда становится звездой. Подобным образом 5 млрд. лет назад образовалось наше Солнце.

Облака, в которых образуются звезды, имеют неодинаковые массы и различное соотношение химических элементов. А цикл жизни звезды – время, которое необходимо звезде, чтобы пройти все стадии эволюции, – зависит от ее массы и первоначального химического состава.

Звезды, начинающие жизнь с приблизительно одинаковой массой и химическим составом, проходят одни и те же стадии эволюции, примерно за одно и то же время. Звезды такого же химического состава, но с намного большей массой, проходят стадии эволюции быстрее.

Большую часть своей жизни звезда не меняет температуру и светимость благодаря почти равномерному выделению энергии термоядерного синтеза. Температура и плотность газа монотонно убывают от центра к поверхности, и в каждой точке звезды отрицательный градиент газового давления уравновешивает силу тяжести всех вышележащих слоев вещества.

Однако при гидростатическом равновесии могут возникать звездные пульсации – периодические движения слоев звездного вещества около положения равновесия. Несколько пульсирующих звезд были известны уже в древности, но природа переменности их блеска стала понятна лишь в XX веке.

Способность звезды совершать тот или иной вид колебаний определяется ее внутренним строением, то есть распределением вещества от центра к поверхности. Поэтому теория звездных пульсаций неразрывно связана с теорией внутреннего строения и эволюции звезд.

Все звезды эволюционируют примерно одинаково, хотя им нужно разное время для того, чтобы вещество их ядра превратилось из водорода в гелий, а затем в кислород и углерод.

Последняя стадия эволюции до окончательного умирания сильно зависит от массы. Маленькие звезды, масса которых не превышает 1, 2 солнечной, окончательно умирают без каких либо катаклизмов, спокойно угасают, теряясь во тьме космоса. Очень массивные звезды заканчивают свой жизненный путь мощным взрывом – взрывом Сверхновой.

Итак, звезда, эволюционируя с момента своего рождения и до самой смерти, проходит следующие этапы:

- 1) Гравитационное сжатие газопылевого облака и превращение его в звезду.
- 2) Стабильное положение звезды на главной последовательности диаграммы
- 3) Герцшпрунга – Рессела (Г–Р), когда она светит за счет реакции ядерного синтеза.
- 4) Выделение гелиевого ядра и превращение в красного гиганта.
- 5) Красный гигант, светящийся за счет “горения” гелия.
- 6) Переменная пульсирующая звезда, образование углеродного ядра.
- 7) Планетарная туманность, водородная оболочка которой сбрасывается в космос.
- 8) Белый карлик.
- 9) Черный карлик.

Каждая точка на диаграмме Герцшпрунга – Рессела (Г–Р) представляет звезду, чья температура (спектральный класс) отложена по горизонтальной оси, светимость (абсолютная звездная величина) – по вертикальной. Существует связь между светимостью звезды и ее температурой. В противном случае точки были бы разбросаны по всему графику.

Примерно 90% звезд лежат вдоль полосы, называемой главной последовательностью, которая пересекает график из верхнего левого угла, в правый нижний. Большая часть оставшихся звезд попадает в верхнюю правую часть (холодные яркие гиганты и сверхгиганты) или в левый нижний угол (горячие, с низкой светимостью белые карлики).

Главная последовательность – это последовательность звезд разной массы, от наиболее массивной, в верхней части до наименее массивных, обладающих наименьшей светимостью, в нижней части. Светимость звезды примерно пропорциональна ее массе, в степени 3.5. Если известно абсолютная температура и светимость звезды, то ее размер может быть вычислен на основании закона Стефана – Больцмана:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \quad (1)$$

где: σ – постоянная Стефана – Больцмана.

Таким образом диаграмма Г–Р показывает изменение звезды при прохождении ею этапов эволюции [8].

После выгорания водорода в центре образуется гелиевое ядро. Его сжатие вызывает повышение температуры на границе гелиевого ядра и возникновение слоевого источника горения водорода. При этом оболочка звезды расширяется. Звезда становится последовательно субгигантом и красным гигантом.

Сжатие невырожденного гелиевого ядра ведет к постепенному повышению его центральной температуры. Горение гелия начинается в тот момент, когда центральная температура достигает $\sim 1.5 \cdot 10^8$ К, и звезда перемещается на горизонтальную ветвь.

После того, как в центре выгорит гелий, образовав углеродно-кислородное ядро, реакции переместятся в слой вокруг ядра, где гелий еще сохранился, а в более высоких слоях продолжается горение водорода. На этой стадии звезды вновь превращаются в красные гиганты, образуя на диаграмме Герцшпрунга – Рессела асимптотическую ветвь гигантов.

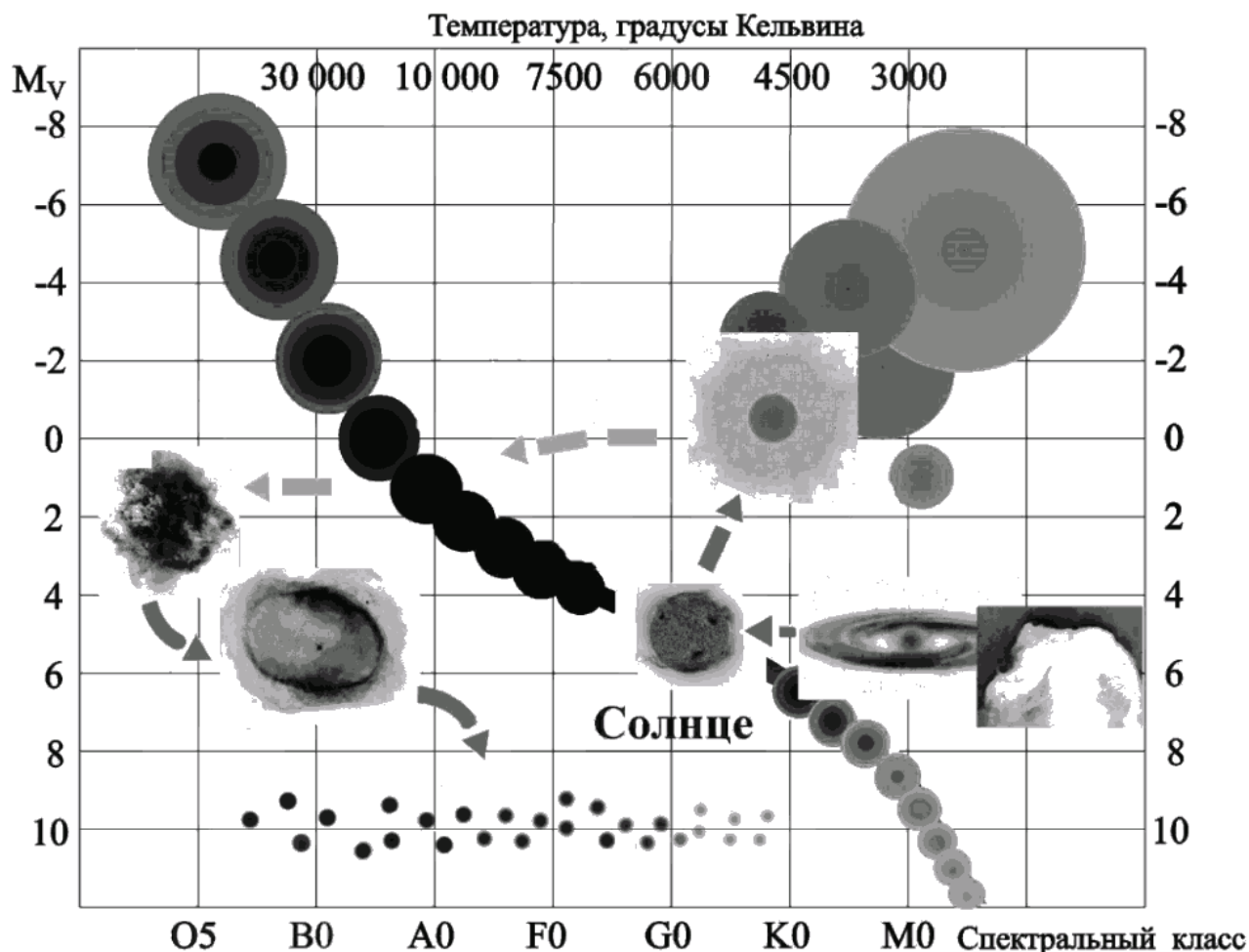


Рис. 1. На диаграмме Герцшпрунга-Рессела показано, как Солнце в стадии протозвезды «садились» на главную последовательность, затем, последовательно, оно будет превращаться в красный гигант и планетарную туманность [11].

Цель работы

исследование звезд асимптотической ветви гигантов с полуправильным типом переменности блеска методами математического моделирования и их последующая классификация. Для анализа фотометрических сигналов использовались алгоритмы и программы, разработанные И.Л. Андроновым. Их обзор приведен в работах И.Л. Андронova [13-15].

Все звезды асимптотической ветви являются пульсирующими.

Пульсационная неустойчивость возникает на определенных стадиях звездной эволюции, поэтому классификация пульсирующих переменных звезд по продолжительности периода, форме кривой блеска, виду спектра и другим наблюдательным признакам отражает их эволюционный статус, то есть принад-

лежность к группе звезд с определенными значениями массы, возраста и химического состава.

По сравнению со временем прохождения звездной стадии неустойчивости, промежуток времени раскачки колебаний достаточно короток, поэтому практически все наблюдаемые нами пульсирующие звезды находятся на стадии автоколебаний.

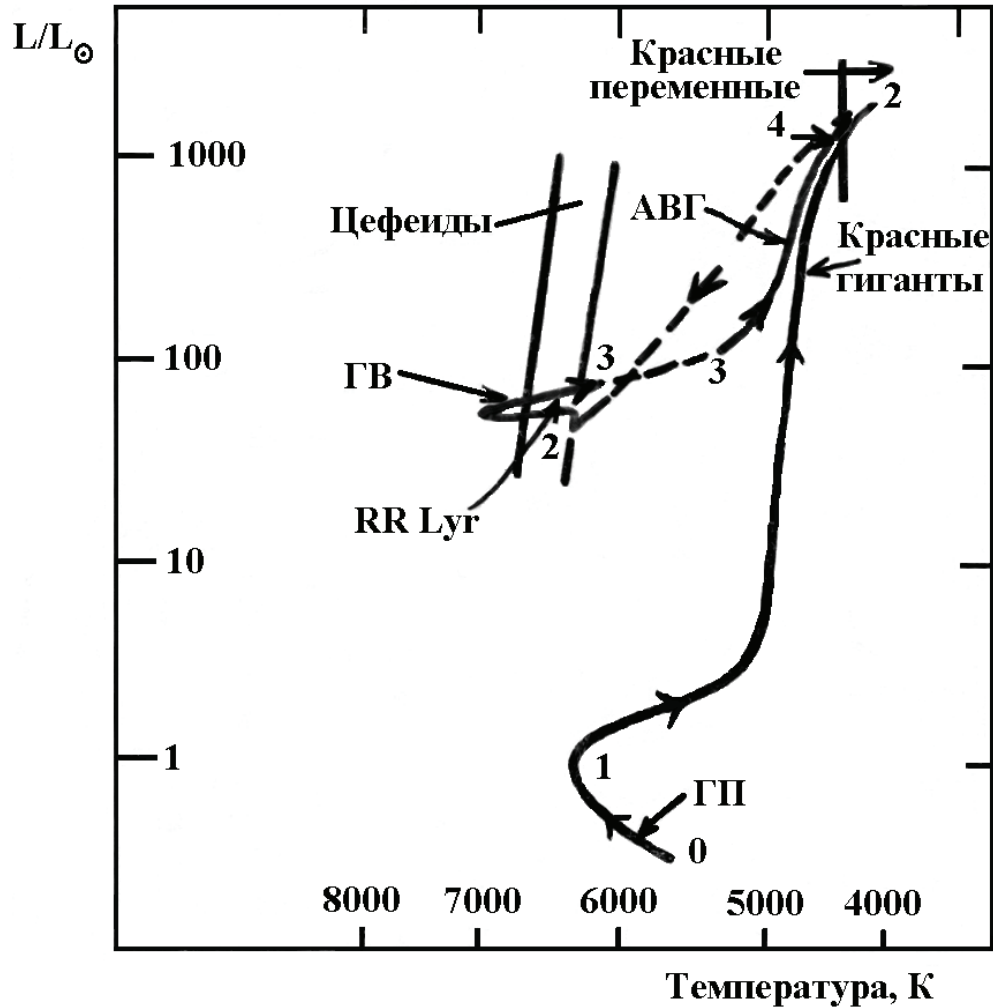


Рис. 2. Эволюция звезды умеренной массы. Стадия главной последовательности (ГП) – водородное горение в ядре (0–1); стадия красного гиганта – водородное горение в оболочке (1–2); стадия горизонтальной ветви (ГВ) – гелиевое горение в ядре и водородное в оболочке (2–3); асимптотическая ветвь гигантов (АВГ) – двойной слоевой источник (3–4) [7].

Актуальность работы

В отличие от теории пульсаций классических пульсирующих звезд, которая была подробно разработана уже к середине XX века С.А. Жевакиным [4], детальной модели пульсаций долгопериодических переменных звезд (ДПП) пока не существует. Это связано с проблемами теории развития конвекции во времени, а также с определением мод пульсаций (что в свою очередь связано с неточностью определения радиусов, так как на поздней стадии эволюции звезд они

имеют протяженную атмосферу, плавно переходящую в околозвездную оболочку). В результате многие наблюдательные проявления, такие, как скачкообразные изменения периодов, изменения амплитуды и формы кривой блеска не получили теоретического объяснения. Однако, некоторые наблюдательные эффекты, например, "прогрессивное" уменьшение периодов, получили приемлемое объяснение, или, по крайней мере, были высказаны гипотезы, хорошо согласующиеся с наблюдениями. Можно предположить, что развитие теории в существенной мере тормозится недостаточной классификацией наблюдаемых явлений. Например, мало изучено изменение кривых блеска от цикла к циклу, так как требует длинных рядов наблюдений и их тщательного анализа. Изучение закономерностей изменения кривых блеска от цикла к циклу, а также вековых изменений на протяжении длительных интервалов времени, а также их классификация, могли бы стать наблюдательным фундаментом для развития теории пульсаций ДПП.

Основные решаемые в настоящее время проблемы, касающиеся звезд асимптотической ветви гигантов, это – построение динамических моделей атмосфер, определение моды пульсации, изучение механизма потери массы и дальнейшая эволюция звезд.

Одним из главных вопросов теории звездных пульсаций является мода, в которой пульсируют звезды асимптотической ветви.

У каждой звезды существует свой набор периодов радиальных колебаний, который задается распределением вещества внутри звезды. Самый длинный из всех возможных периодов принадлежит колебаниям в фундаментальной моде. При пульсациях в первом оберitone внутри звезды имеется слой газа – узел обертона, который остается неподвижным на протяжении всего пульсационного цикла [9].

Для решения вопроса о типе звездной пульсации необходимо сначала классифицировать наблюдательные проявления звездной активности, то есть изменения блеска звезд.

Постановка задачи

Любые способы классификации звезд по типам переменности опираются на общий вид кривой блеска и спектральный класс. Однако, такой подход не всегда удачен, если речь идет о полуправильных переменных (SR). Для них часто нельзя рассматривать общую кривую блеска, так как она содержит участки, характерные для звезд различных типов. Происходит это, вероятно, потому что SR-звезды (от английского *semiregular*) в большинстве своем, во-первых, мультипериодичны и все компоненты этой мультипериодичности проявляют себя очень активно, то есть имеют сравнимую амплитуду с главным колебанием. А, во-вторых, период основного колебания также меняется [7].

На сегодняшний день имеется очень грубая классификация SR-звезд, которую можно обобщить, используя три фундаментальные работы "Пульси-

рующие звезды" [4], "Общий каталог переменных звезд" [10], "Переменные звезды" [5], следующим образом.

Подклассы SR-звезд сильно смешаны. Особенно это касается звезд подтипов SRb. Деление их на "красные" и "голубые" предложили Kerschbaum и Hron [20], основываясь на статистических исследованиях периодов, амплитуд, температур, темпов потери массы, присутствию околозвездной пыли и особенностей спектров. В работе были использованы свойства звезд в визуальной и инфракрасной областях спектра. Эти же авторы указывают, что SRa-звезды являются промежуточными объектами между долгопериодическими звездами типа Миры Кита и SRb-звездами.

Звезда AF Лебеда вполне может быть прототипом отдельного класса звезд (как, например, RV Тельца). Этот объект показывает последовательное "переключение" колебаний, значения периодов которых никак не зависят друг от друга [2].

Таблица 1. Обобщенная классификация полуправильных переменных звезд.

| Тип | Характеристики звезд | Яркие представители указанного типа переменности |
|-----|---|--|
| SRa | M, C, S спектры $P \approx \text{const}$, Δm мало форма кривой блеска сильно меняется имеют эмиссионные линии, очень похожи на звезды типа Миры Кита | Z Aqr 136. ^d M1e-M3e |
| SRb | M, C, S спектры P-? цикл разной продолжительности три вида поведения: квазипериодическое, постоянное, хаотическое | RR CrB AF Cyg |
| SRc | поздние спектры сверхгиганты | μ Cep RS Cnc 1700 ^d |
| SRd | F, G, K спектры отличаются от остальных отсутствием или очень слабыми полосами окиси титана, большими скоростями и светимостями; гиганты и сверхгиганты | UU Her AG Aur |

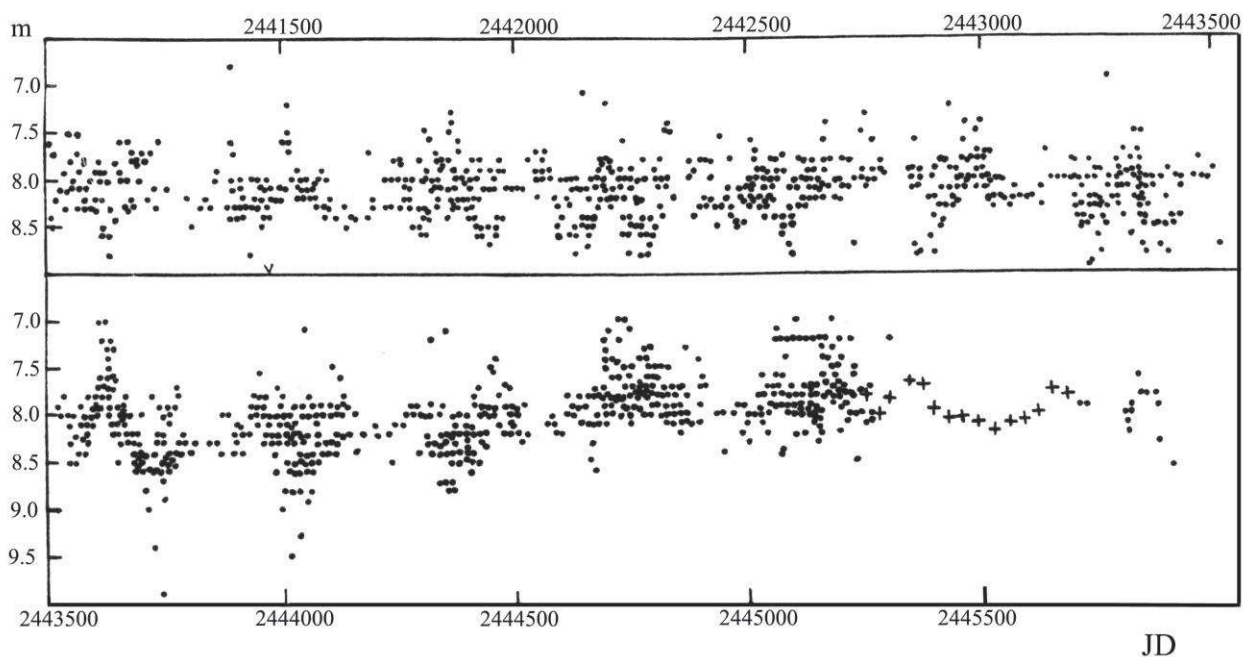


Рис. 3. Участок кривой изменения блеска SRb-звезды RX Волопаса по материалам французской ассоциации наблюдателей переменных звезд (AFOEV). Крестиками показаны наблюдения, усредненные за несколько дней. Характерное значение периода около года ($P=369^d$) получено И.Л. Андроновым и Л.С. Кудашкиной [16].

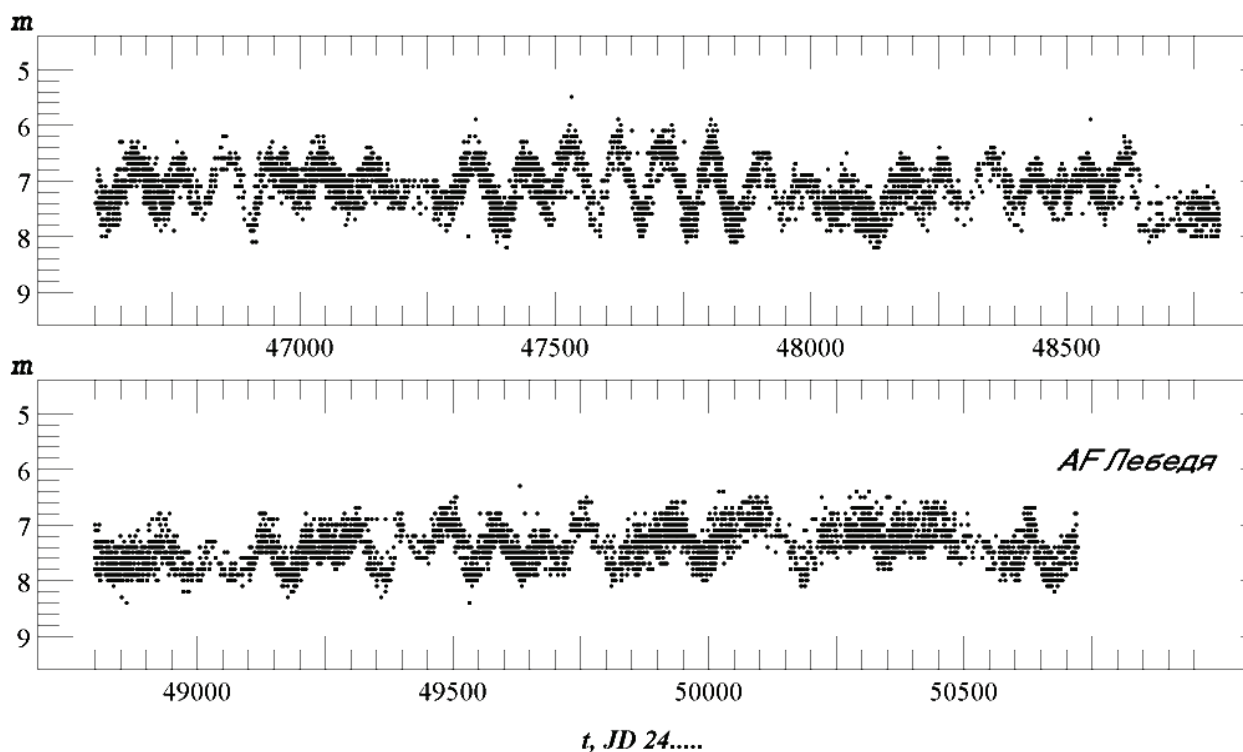


Рис. 4. Кривая изменения блеска полуправильной переменной звезды AF Лебедя. Видны участки регулярной синусоидальной переменности разной длительности.

Следует заметить, что SRC-класс фактически отмечает только звезды-сверхгиганты, иногда с переменностью типа SRa, но чаще тип переменности никак не определен. Рассмотрим представителя SRC-класса звезду S Перся.

S Персея – звезда-сверхгигант, отнесена к звездам с гармонической переменностью. Для периодограммного анализа использовалась наблюдательная база данных Французской Ассоциации Наблюдателей Переменных Звезд (AFOEV) и методы анализа мультипериодических колебаний, изложенные в работах И.Л. Андропова [13, 14].

Период определен $P = 809.^d91$ [17]. На самом деле, на периодограмме присутствует не один пик, а два. Первый соответствует периоду $P = 16173^d \pm 158^d$, с которым меняется средний блеск (заметим, что интервал наблюдений составляет более 20000 дней), а второй пик является сдвоенным $P_1 = 809.^d6 \pm 0.^d22$ и $P_2 = 768.^d8 \pm 0.^d31$.

Более подробные исследования периода показывают следующее. Разделив всю имеющуюся кривую блеска примерно за сто лет на шесть интервалов, по каждому интервалу проведен периодограммный анализ. Результаты его даны в таблице 2. Каждое следующее значение периода на одном интервале получено по остаткам после вычитания предыдущего, $S(f)$ – высота пика на периодограмме по сравнению с единицей.

Таблица 2. Результаты периодограммного анализа для S Персея.

| Интервал (Юлианская дата 24.....) | Значения периодов | S(f) |
|-------------------------------------|--|----------------------|
| 23500-25000 (1500 ^d) | 991. ^d 46±18. ^d 64 431.43± 9.84 643.99±45.50 | 0.94 0.48 0.40 |
| 25000-29000 (4000 ^d) | 834.15± 3.26 489.88± 2.08 1631.76±25.04 | 0.44 0.36 0.33 |
| 29000-32000 (3000 ^d) | 768.91± 7.16 544.26± 4.04 998.83±15.20 | 0.75 0.53 0.39 |
| 39400-43200 (3800 ^d) | 909.40± 6.52 787.89± 8.45 1090.17±15.31 | 0.83 0.55 0.45 |
| 43200-47000 (3800 ^d) | 759.33± 5.48 599.31± 6.07 298.55± 1.65 | 0.42 0.35 0.33 |
| 47000-51000 (4000 ^d) | 816.82± 1.55 2463.06±40.01 1106.98±8.90 | 0.77 0.44 0.38 |

В последнем временном интервале кривая блеска S Персея имеет правильную форму с устойчивым периодом 816.8 дней (рис. 5). Будем считать, что звезда пульсирует в фундаментальной моде.

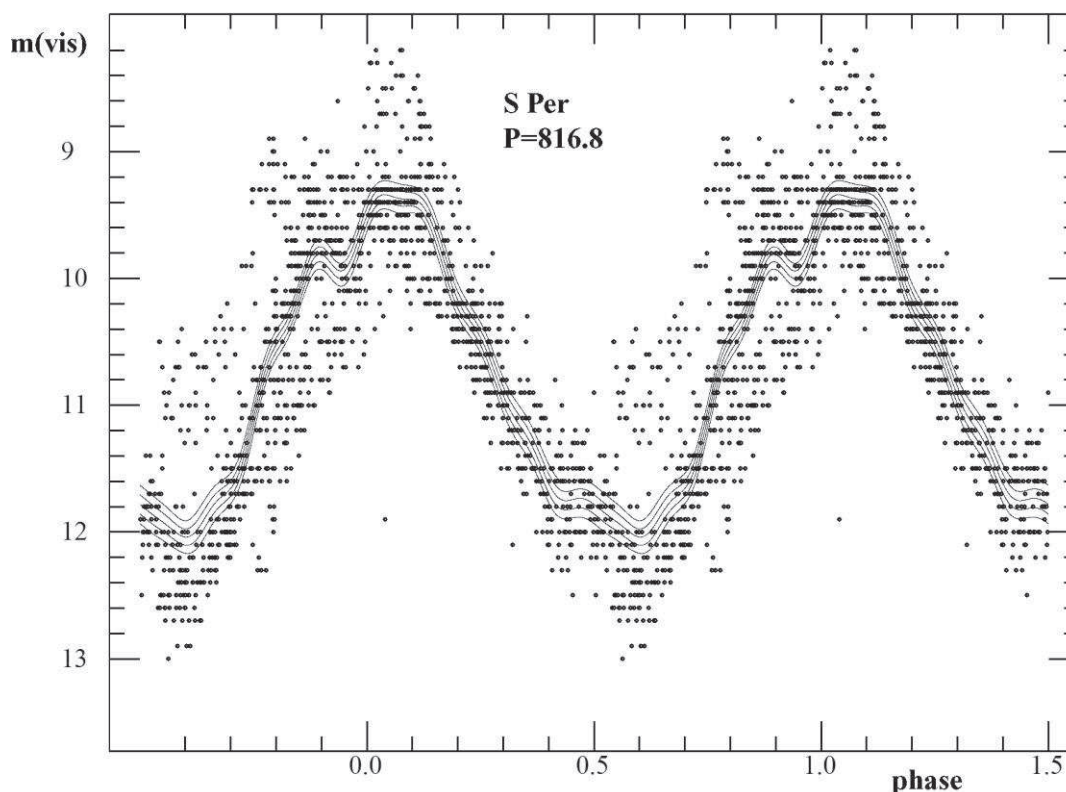


Рис. 5. Фазовая кривая блеска звезды S Персея по наблюдениям AFOEV и ее аппроксимация тригонометрическим полиномом [3, 13].

Используя зависимость "период - абсолютная болометрическая величина", полученную Feast [19] для сверхгигантов, оценим M_{bol} для S Персея.

$$M_{bol} = -7.20 \cdot \lg(P) + 12.8 \quad (2)$$

имеем, $M_{bol} \approx -8.17$.

Абрамян [1] получил следующие параметры для S Персея, используя ИК-наблюдения и соотношения между светимостью, массой, эффективной температурой и периодом (пульсационная константа принималась равной 0.06): $M_V = -6.1$, $M_{bol} = -8.7$, $M/M_\odot = 26.3$, $T_{ef} = 2950$ К. Спектральный класс звезды M4Ia-M4.5Iab.

Воспользуемся его значениями массы и эффективной температуры для оценки радиуса звезды.

Используем классические соотношения,

$$\lg(L/L_\odot) = -0.4(M_{bol} - 4.7) \quad (3)$$

где: L_\odot – светимость Солнца.

Имеем отсюда $L = 140605L_\odot$.

Для абсолютно черного тела

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 \quad (4)$$

получаем $R = 1.0 \cdot 10^{14}$ см или, примерно, $1400R_{\odot}$.

Что касается T_{ef} , то по оценкам Alvarez and Mennessier (1997) 2900 К соответствует примерно спектральному классу М8. Правда, у них речь идет о звездах-гигантах типа Миры Кита. Тем не менее, оценка радиуса S Персея кажется нам завышенной. В связи с этим, интересно подставить полученное значение в известную формулу из теории звездных пульсаций [6]

$$P_0 = Q \sqrt{\frac{(R/R_0)^3}{(M/M_0)^2}} \quad (5)$$

где: R_{\odot} , M_{\odot} – радиус и масса солнечные.

Получим для нашего периода $P_0 = 816.48$ соответственно $Q \approx 0.077$, что, вообще говоря, согласуется с теоретическими значениями (Q от 0.06 до 0.08) для полуправильных переменных.

Выводы

Таким образом, обширный и неоднородный класс полуправильных переменных требует внимательного подхода и ревизии, которую вполне успешно можно провести, используя современные математические методы и уже имеющийся наблюдательный материал.

В настоящей работе показано, что определенный из кривой блеска период пульсаций может служить для оценки физических параметров звезды.

Все изменения фотометрических параметров, присущие рассматриваемым звездам, например, форма кривой изменения блеска в визуальной области, несомненно, связаны с физическими свойствами звезды. Поэтому можно провести классификацию полуправильных переменных звезд по этим параметрам. Подобная работа была проделана Чинаровой и Андроновым [18]. В результате получены средние значения параметров кривых блеска 173 SR-звезд различных подтипов. Этот результат может служить основой для математического моделирования сложных процессов, идущих в звезде и ее оболочке, влияющих на форму кривой блеска.

Благодарности

Автор благодарит профессора И.Л. Андронova за постановку задачи и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Г. В. Абрамян, *О периодах, амплитудах и светимостях красных сверхгигантов*, Астрофизика, 1984, 20, № 2, 239-243.
- [2] И. Л. Андронов, *О переменности продолжительности цикла AF Лебеда*, Астрон. цирк., 1989, № 1538, 18-19.
- [3] И. Л. Андронов, А. В. Бакланов, *Алгоритм искусственной звезды сравнения для ПЗС фотометрии*, Вестник Астрономической Школы, Одесса, 2004, т. 5, 264-272.
- [4] *Пульсирующие звезды* (Под ред. Б. В. Кукаркина), Наука, 1970, 372.
- [5] К. Гоффмейстер, *Переменные звезды*, Наука, 1990, 360.
- [6] Дж. П. Кокс, *Теория пульсирующих звезд*, Мир, 1983, 326.
- [7] Л. С. Кудашкина, *Долгопериодические переменные звезды*, КФНТ, 2003, т. 19, № 3, 193-233.
- [8] *Физика космоса*: (ред. Р.А. Сюняева) Сов. энциклопедия, 1986, 783.
- [9] Ю. А. Фадеев, *Пульсации звезд*, Природа, 2006, № 8, 16-23.
- [10] П. Н. Холопов и др., *Общий каталог переменных звезд*, Наука, 1985, 376.
- [11] Л. Л. Чинарова, *Двойные звезды и их эволюция*, Учебн.-метод. пособие, Одесса: Изд-во ОНУ, 2009, 58.
- [12] R. Alvarez et. al., *Determination of Miras temperatures from TiO and VO bands. Estimates of distances*, A&A, 1997, Vol. 317, 761-768.
- [13] I. L. Andronov, *Multi frequency variations of stars. Some methods and results*, Odessa Astron. Publ., 1994, Vol. 7, part 1-2, 49-56.
- [14] I. L. Andronov, *Method of running parabolae: Spectral and statistical properties of the smoothing function*, A&A Suppl. Ser., 1997, Vol. 125, 207-217.
- [15] I. L. Andronov, *Multiperiodic versus noise variations: mathematical methods*, Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser., 2003, Vol. 292, 391-407.
- [16] I. L. Andronov, *Semiregular variable RX Bootis: double-period optical variations of a cosmical maser?*, Astronomische Nachrichten, 1988, Vol. 309, № 5, 323-325.
- [17] L. S. Kudashkina, *The character of variability and possible subdivision of the SRc class*, The Imp. of Large-Scale Surv. on Puls. Star Res. ASP Confer. Ser. (L. Szabados & D.W. Kurtz, eds.), 2000, Vol. 203, 119.
- [18] L. L. Chinarova, *Catalogue of main characteristics of pulsations of 173 semi-regular stars*, Odessa Astron. Publ., 2001, Vol. 13, 116-176.
- [19] M. W. Feast, *A period-luminosity-color relation for Mira variables*, MNRAS, 1989, Vol. 241, 375-392.
- [20] F. Kerschbaum et. al., *Semiregular variables of type SRa and SRb. Basic properties in the visual and the IRAS-range*, A&A, 1992, Vol. 263, 97-112.