

Д. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

АНАЛИЗ КРИВОЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗДЫ δ ЦЕФЕЯ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 21 V 1954)

Качественная классификация колебательных кривых Цефеид по их форме и зависимость этой формы от периода были установлены Б. В. Кукаркиным и П. П. Паренаго (¹). Здесь мы попытаемся дать количественный анализ, основанный на простой приближенной модели, пока для простейшего типа кривых лучевых скоростей, пример которых дает наиболее подробно изученная звезда δ Цефея.

Представим звезду состоящей из центральной (адиабатической) и периферической (неадиабатической) зон. В центральной зоне колебания имеют характер стоячих волн, которые можно считать подобными и адиабатическими. В периферической зоне, как было показано ранее (^{2, 3}), происходит распространение бегущих энтропийных волн.

Будем считать, что световое давление мало в сравнении с газовым. Это согласуется с современными представлениями о высоком содержании водорода в звездах (^{4, 5}). В пренебрежении световым давлением изменение радиуса центральной зоны в процессе колебания выражается простыми формулами, выведенными в нашей работе (⁶):

$$y = \frac{r}{r_0} = \frac{1}{1 - A^2} (1 + A \sin z), \quad (1)$$

где r — радиус центральной зоны; r_0 — его значение в состоянии равновесия; A — постоянная интегрирования, играющая роль относительной амплитуды для малых колебаний; z — деформированное время, связанное с обычным временем t посредством соотношения

$$t = \frac{1}{\omega_0} (1 - A^2)^{-1/2} (z - A \cos z), \quad (2)$$

ω_0 — собственная круговая частота малых колебаний.

Изменения состояния вещества в центральной зоне связаны с изменениями радиуса этой зоны: плотность меняется как y^{-3} и температура как y^{-2} . Но непосредственно этих изменений мы наблюдать не можем, так как центральная зона скрыта от нашего наблюдения.

Для того чтобы связать наблюдаемую форму кривой лучевых скоростей с теоретической формой кривой колебаний в центральной зоне, сделаем простейшее предположение: предположим, что смещение внешней поверхности звезды пропорционально смещению границы центральной зоны:

$$\Delta R = C \Delta r, \quad (3)$$

где R — радиус звезды; C — число, для данной звезды постоянное.

Дифференцирование (1) и (2) дает:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{A \cos z}{1 + A \sin z} \omega_0 \sqrt{1 - A^2}, \quad (4)$$

после чего из (3) получаем:

$$v = \frac{dR}{dt} = Cr_0 \frac{A \cos z}{1 + A \sin z} \omega_0 \sqrt{1 - A^2}. \quad (5)$$

Величина $v = dR/dt$ есть скорость расширения звезды и отличается от находимой по доплеровскому смещению лучевой скорости только знаком и постоянным слагаемым:

$$v = \bar{V} - V(t), \quad (6)$$

где $\bar{V}$ — среднее и $V(t)$ — текущие значения лучевой скорости.

В дальнейшем мы будем пользоваться естественным правилом знаков, т. е. считать положительной скорость расширения.

Из (5) и (2) следует, что максимальное и минимальное значения v достигаются при значениях z , удовлетворяющих условию

$$\sin z_m = -A, \quad (7)$$

$$z_{\max} = 3/2 + \varphi, \quad (8)$$

$$z_{\min} = 3/2 - \varphi, \quad (9)$$

$$\varphi = \text{Arc cos } A. \quad (10)$$

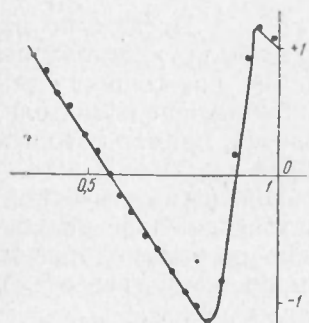


Рис. 1

откуда

где

Отсюда для экстремальных значений v получается:

$$v_m = \pm Cr_0 A \omega_0. \quad (11)$$

Таким образом, (5) может быть написана в виде

$$v = v_m \sqrt{1 - A^2} \frac{\cos z}{1 + A \sin z}, \quad (12)$$

где деформированное время z связано с обычным временем t соотношением (2).

Простейший тип кривых лучевых скоростей для Цефеид с периодами от 2 до 6 дней очень хорошо описывается формулой (12). Для примера на рис. 1 представлена кривая лучевых скоростей δ Цефея.

Сплошная кривая проведена по формуле (12) с значением $A = 0,50$. Точками представлены данные наблюдений, взятые из сводки Прагера (цитируем по (?)). По оси ординат отложена величина

$$\frac{v}{\sqrt{1 - A^2} v_m} = \frac{2}{V_3} \frac{v}{v_m},$$

по оси абсцисс — время в долях от полного периода. Фазы сдвинуты против обозначений В. Беккера на $-0,07$ от периода. Как видно из графика, согласие между рассчитанной и наблюдаемой формой кривой даже лучше, чем можно было бы ожидать от приближенной модели.

Этот результат делает правдоподобной гипотезу центральных пульсаций (^{3, 6}). Кривые типа, подобного δ Цефея (например Т Лисички, RT Возничего и вообще для периодов от 2 до 6 дней), будем называть простыми, а кривые с вторичными волнами — сложными. В случае простых кривых периферическая зона ведет себя как эластичная

оболочка, колеблющаяся в одной фазе с центральной зоной и уменьшающая только амплитуду колебаний. Для сложных кривых представляются существенными колебания смещения, возбуждаемые в самой периферической зоне бегущими энтропийными волнами. Как было показано в ⁽²⁾, колебания смещения должны состоять из двух компонент, сдвинутых по фазе на 90° по отношению друг к другу. Эти две компоненты и следует считать ответственными за появление вторичных волн на нисходящей и восходящей ветвях.

Из рассмотренного примера видно, что преобразование к деформированному времени z может оказаться полезным методом анализа колебательных кривых Цефеид. Заметим, что кроме амплитуды и фазы наши формулы содержат только один параметр A , характеризующий «амплитуду» существенно нелинейных колебаний в центральной зоне.

Для того чтобы при помощи формулы (2) перейти от обычного времени t к деформированному времени z , нужно знать значение A для рассматриваемой звезды. Если максимум и минимум кривой лучевых скоростей ясно выражены и хорошо прослежены при наблюдениях, то для нахождения A можно воспользоваться наблюдаемой асимметрией кривой лучевых скоростей. Будем называть асимметрией ϵ отношение времени возрастания v (т. е. уменьшения V) к полному периоду цикла.

Тогда из (2), (10), (8) и (9):

$$\epsilon = \frac{2\varphi - \sin 2\varphi}{2\pi}, \quad (13)$$

где φ определяется из (10).

Соотношениями (13) и (10) можно воспользоваться для нахождения A по известному ϵ . Необходимо только иметь в виду, что, как видно из рис. 1, экстремумы кривой лучевых скоростей очень остры, и при малом числе наблюдаемых точек легко ошибиться в определении их положения. Поэтому, если кривая лучевых скоростей прослежена недостаточно детально, то значение A лучше находить подбором. Последнее становится неизбежным в тех случаях, когда экстремумы кривой замаскированы вторичными волнами. В особенности это относится к звездам типа ζ Близнецов (периоды от 10 до 15 дней) с вторичными волнами на восходящей ветви (под восходящей мы подразумеваем ветвь, где возрастает скорость расширения v). У подобных звезд наблюдаемая асимметрия не имеет ничего общего с истинной. Весьма желательно нахождение теоретической или эмпирической зависимости параметра A от наблюдаемых относительных амплитуд изменения радиуса или температуры и от периода цикла. Если такую зависимость удастся найти, то станет возможным прямое преобразование всех колебательных кривых к деформированному времени z , что сильно облегчит их анализ.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступило
21 V 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. В. Кукаркин, П. П. Паренаго, Астр. журн., 14, 181 (1937).
² Д. А. Франк-Каменецкий, ДАН, 80, 185 (1951). ³ Д. А. Франк-Каменецкий, ДАН, 99, № 1 (1954). ⁴ Н. А. Козырев, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 2, 3 (1948). ⁵ J. Epstein, L. Motz, Astrophys. J., 117, 311 (1953). ⁶ Д. А. Франк-Каменецкий, ДАН, 86, 897 (1952). ⁷ W. Becker, Zs. f. Astrophys., 19, 296 (1939).