

Переменные звезды **21**, № 5, 733–740, 1982

Variable Stars **21**, № 5, 733–740, 1982

Эволюционные и пульсационные массы классических цефеид

Ц. Цветков

Вычислены эволюционные и пульсационные массы 156 классических цефеид Галактики. Использование радиусов звезд, полученных методом Весселинка, не приводит к систематическому различию эволюционных M_e и пульсационных M_Q масс (рис. 1а). Это относится и к цефеидам в скоплениях, s-цефеидам и цефеидам с двойной периодичностью. При применении зависимости PCL Ибена и Таггла (1975) оба вида масс почти одинаковые. Подтверждается заключение о меньших по сравнению с эволюционными массах цефеид со ступенькой на кривых лучевой скорости и блеска. Независимые оценки пульсационных масс M_Q и M_b цефеид с двойной периодичностью сильно отличаются между собой, причем $M_Q \approx M_e$, $M_b \approx 1/3 M_e$. Для цефеид малых масс более вероятно второе пересечение полосы неустойчивости, а для цефеид больших масс – третье пересечение (рис. 1б).

Evolution and Pulsation Masses of Classical Cepheids

by Ts. Tsvetkov

Both evolution and pulsation masses of 156 classical cepheids of our Galaxy are calculated. If the radii derived by Vesselink's method are used, then the pulsation masses M_Q are not systematically smaller the evolution masses M_e (Fig. 1a). Such a result is obtained in particular for the cluster cepheids, s-cepheids and double mode cepheids. The masses M_e and M_Q are almost equal, if Iben and Tuggle's (1975) PCL relation is used. The conclusion that the pulsation masses are smaller than the evolution masses in the case of bump cepheids, is confirmed. The independent estimates of the pulsation masses M_Q and M_b of double mode cepheids are very different: $M_Q \approx M_e$, $M_b \approx 1/3 M_e$. For cepheids with small masses the second crossing of the instability strip is more probable, and for cepheids with large masses the third crossing is more probable (Fig. 1b).

1. Введение. В последние годы появился ряд публикаций, в которых обсуждается проблема различия эволюционных и пульсационных масс классических цефеид. Оба вида масс получаются из расчетов теорий эволюции и пульсаций, соответственно.

В работах Кристи (1966) и Стоби (1969) имеются указания о несоответствии масс в случае цефеид с вторичным горбом ("ступенькой") на кривой лучевой скорости. Подобный результат был получен также для звезд без ступеньки (Роджерс, 1970; Коган, 1970) и для

цефеид с двойной периодичностью (Петерсен, 1973). Другие авторы (Ибен и Таггл, 1972; Фрике и др., 1972; Кинг и др., 1975) подтвердили эти исследования. Оказалось, что все три независимые между собой оценки пульсационных масс (M_Q , M_ϕ и M_b — см. работу Стоби, 1974) цефеид меньше их эволюционных масс $M_\odot$.

$$M_b < M_\phi < M_Q < M_\odot,$$

причем $M_b \approx 1/3 M_\odot$, $M_Q \approx (0.4-0.9) M_\odot$.

Для устранения указанного различия было предложено несколько возможностей, однако в настоящее время не преодолены все трудности для решения этой проблемы.

2. *Наблюдательный материал и расчеты масс.* Мы подошли к изучаемой проблеме, исходя из наблюдательных данных 156 классических цефеид Галактики (Иванов, 1975), которые отличаются от наблюдательного материала других авторов в следующих отношениях: относительно большое число звезд; наличие радиусов R_w , полученных методом Весселинка; однородная система средних показателей цвета $\langle B-V \rangle_0$, исправленных за межзвездное поглощение. Мы вычислили также и радиусы из данного соотношения PCL, используя шкалу эффективной температуры Крафта и формулу для болометрической поправки (Сендидж и Граттон, 1963). Была принята система эволюционных треков Ибена (1967).

На основе этих данных, применяя разные способы вычислений (итерации, интерполяции, приближенные формулы и зависимости), мы сделали ряд расчетов эволюционных и пульсационных масс цефеид для основной моды колебаний и для разных химических составов 1 типа населения. Относительные ошибки оценок масс составляют обычно 30–60%, что обусловлено низкой точностью оценок радиусов (10–20%). Основные результаты расчетов масс представлены в следующих разделах.

3. *Сравнение масс $M_\odot$ и M_Q .* На рис. 1а сравниваются эволюционные $M_\odot$ и пульсационные M_Q массы (в солнечных массах) 150 цефеид. Использованы радиусы R_w . Цефеиды в скоплениях обозначены квадратиками, s-цефеиды — крестиками, а звезды с двойной периодичностью — треугольниками. Видно, что как для всего ансамбля изучаемых звезд, так и для цефеид в скоплениях, s-цефеид и звезд с двойной периодичностью, пульсационные массы не получают систематически меньше эволюционных. Можно отметить систематический ход изменения масс M_Q с увеличением $M_\odot$, наличие которого пока трудно объяснить (возможно, сказываются некоторые особенности определения радиусов методом Весселинка при разных светимостях).

Оценки обоих видов масс 13 цефеид в скоплениях, в основном, близки между собой (более значительные разницы имеются у звезд EV Sct, CE Cas a, CE Cas b — $M_Q < M_\odot$, и у UY Per, RS Pup — $M_Q > M_\odot$). Следовательно, использование радиусов R_w не приводит к систематически меньшим оценкам пульсационных масс по сравнению с эволюционными для этих звезд. Другие авторы, применяя соотношение PCL Сендиджа и Таммана (1969), получили для всех цефеид в скоплениях $M_Q < M_\odot$.

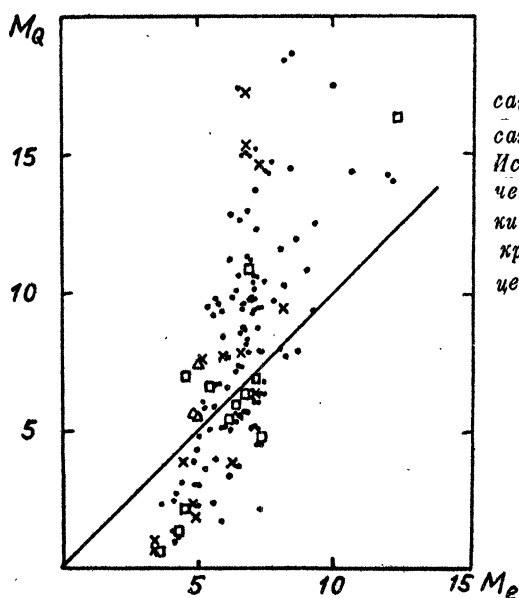
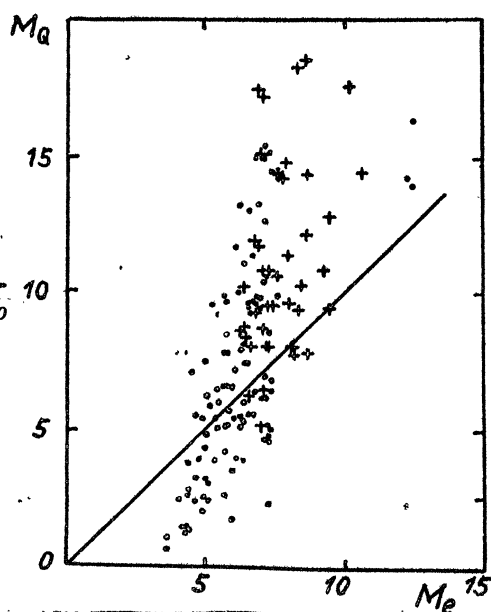


Рис. 1а.

Сравнение эволюционных M_e и пульсационных M_Q масс (в солнечных массах) 150 классических цефеид Галактики. Использованы радиусы звезд R_w , полученные методом Весселинга. Квадратики обозначают цефеиды в скоплениях; крестики — s-цефеиды, треугольники — цефеиды с двойной периодичностью.

Рис. 1б.

То же сравнение масс, что на рис. 1а. Обозначена большая вероятность для второго (точки) и третьего (крестики) пересечений полосы неустойчивости.



Ибен и Таггл (1975) высказали предположение, что звезда VY Per может пульсировать в обертоном. Наши оценки масс M_e ($6.15 M_\odot$) и M_Q ($5.54 M_\odot$) близки между собой, что подтверждает заключение Шмидта (1976) о пульсациях в основной моде.

На рисунке не нанесены массы 6 звезд: AD Gem, RY CMa, Y Sgr, XVul, BB Sgr, TW CMa. Их радиусы R_w , по-видимому, ошибочны, что ведет к нереальному завышению масс M_Q ($30 \lesssim M_Q \lesssim 47$). Возможно, в этих случаях имеем дело с двойной системой.

Расчеты показали (рис. 1б), что для звезд малых масс более вероятно второе пересечение полосы неустойчивости (точки), а для звезд больших масс — третье (крестики). Вероятность первого пересечения очень мала.

На рис. 2 показаны результаты, полученные с помощью соотношений PCL. Если применять зависимость PCL Сендиджа и Таммана, то получается $M_Q/M_e \approx 0.65-0.80$ (рис. 2а). Учет возможности третьего пересечения полосы неустойчивости (рис. 2б — крестики) не меняет вывода других авторов о том, что при использовании этой зависимости пульсационные массы систематически меньше эволюционных. При применении же соотношения PCL Ибена и Таггла (1975) оба

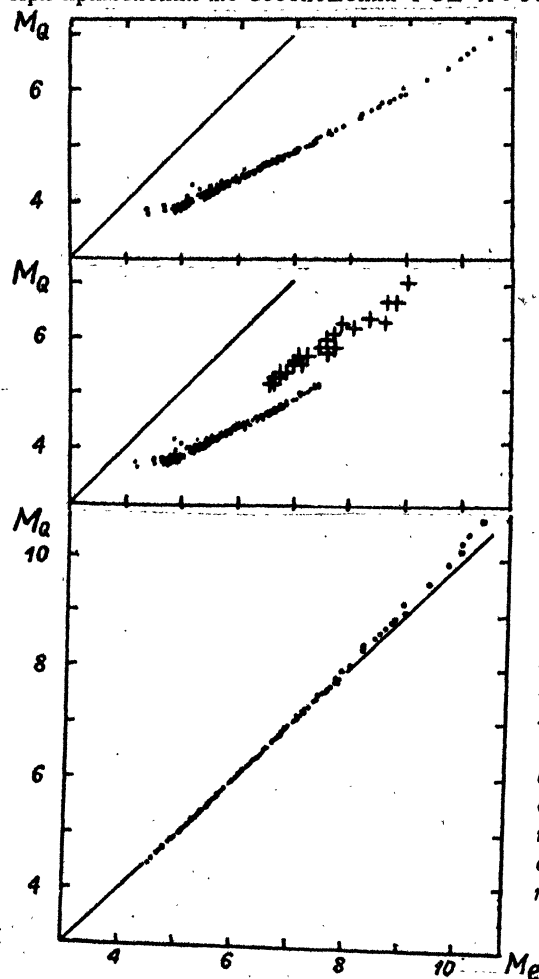


Рис. 2. Сравнение эволюционных M_e и пульсационных M_Q масс цефеид. Используются соотношения PCL Сендиджа и Таммана (а, б) и Ибена и Таггла (в). Рис. 2а, в относятся ко второму пересечению полосы неустойчивости, а на рис. 2б учтена возможность для третьего пересечения (крестики).

вида масс почти совпадают для всех цефеид (рис. 2в). Это соотношение было получено на основе эволюционных и пульсационных расчетов в предположении, что $M_{\phi} = M_Q$ для второго пересечения полосы неустойчивости (эволюция без потери массы). С его помощью Ибен и Тагглы согласовали массы M_{ϕ} и M_Q 13 цефеид в скоплениях. В связи с этим можно напомнить, что зависимость PCL Сендиджа и Таммана не раз подверглась критике (см., напр., работу Ибена и Тагглы, 1972). Согласно новым наблюдательным данным ее нуль-пункт, по-видимому, занижен, что ведет к различию масс M_{ϕ} и M_Q .

Наши исследования показали, что вариации химического состава и типа населения, разные стадии эволюции и конкретные способы расчетов не играют существенной роли при сравнении масс M_{ϕ} и M_Q цефеид. Однако выбор системы эволюционных треков может иметь некоторое значение из-за неопределенности формы и положения "петель" треков.

4. Массы цефеид со ступенькой на кривых лучевой скорости и блеска. В работе Фрике и др. (1972) даны оценки радиусов R_{ϕ} и пульсационных масс M_{ϕ} 13 цефеид со ступенькой на кривой лучевой скорости. Мы независимо определили эти величины для тех же звезд, а также для 9 других, кривые лучевой скорости которых взяли, в основном, из работы Джоя (1937). Результаты показали, что $M_{\phi} < M_{\phi}$ с исключением звезд длинных периодов CD Cyg и RS Pup.

Согласно гипотезе Симона и Шмидта (1976) ступенька появляется вследствие резонанса между основной модой и второй гармоникой ($P_2/P_0 \approx 0.5$). Используя показатели цвета $R-I$ 41 цефеиды, эти авторы заключили, что "резонансная" гипотеза указывает на меньшую по сравнению с эволюционной массу. Мы проверили их результат на основе показателей цвета $\langle B-V \rangle_0$ 156 цефеид. Наличие и положение ступеньки на кривой блеска взяли согласно каталогу Николова (1968), а положение резонансной области ($P_2/P_0 \approx 0.5$) — из работы Симона и Шмидта. Наши результаты (рис. 3 и 4) подтверждают заключение Симона и Шмидта — случай $M = 1/2 M_{\phi}$ лучше соответствует наблюдениям, чем случай $M = M_{\phi}$. Однако, чтобы принять этот вывод, надо показать, что пульсации в основной моде могут возбудить колебания во второй гармонике.

5. Массы цефеид с двойной периодичностью. Из рис. 1а и 2 следует, что как использование радиусов R_w , так и применение соотношений PCL, не приводит к сильному отличию трех цефеид с двойной периодичностью (U TrA, BK Cen, AX Vel) от остальных звезд. Сравнение с независимыми оценками радиусов R_b и пульсационных масс $M_b \approx 1-2 M_{\odot}$ (Кинг и др., 1975) показывает, что $R_b < R_w$ и $M_b < M_Q$, причем $M_Q \approx M_{\phi}$, а $M_b \approx 1/3 M_{\phi}$. Для согласования масс M_b и M_{ϕ} предложены некоторые изменения моделей звезд (Коган, 1977; Кокс и др., 1977а). Однако до настоящего времени не решены все проблемы цефеид с двойной периодичностью в связи с их массой, эволюционной стадией (Кокс и др., 1977б) и положением в полосе неустойчивости, где воз-

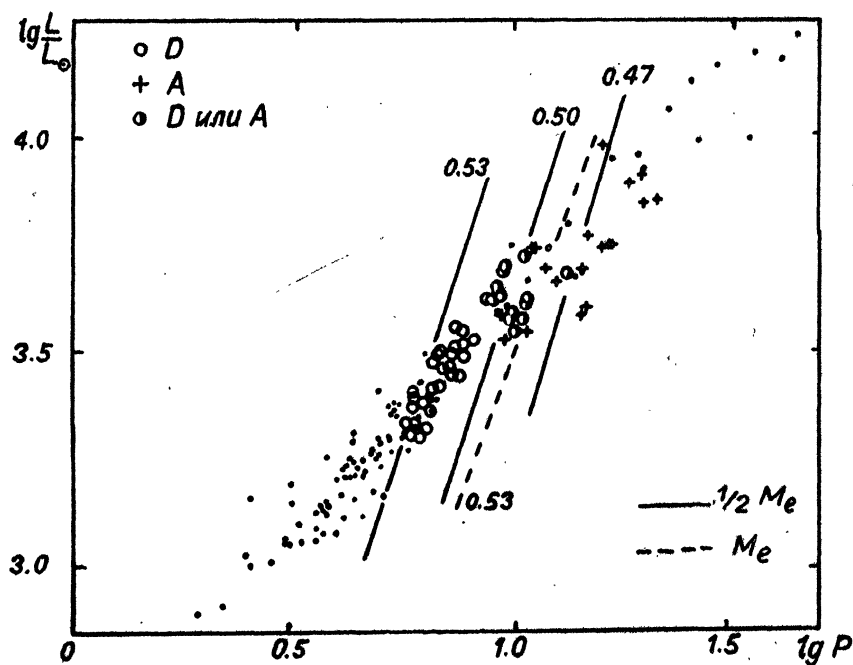


Рис. 3. Зависимость период—светимость по данным о 156 цефеидах Галактики. Светимости вычислены из соотношения PCL Сендиджа и Таммана. Обозначены звезды со ступенькой на нисходящей ветви кривой блеска (D) — кружки, и на восходящей ветви (A) — крестики. Резонансная область ($P_2/P_0 \approx 0.5$) взята согласно Симону и Шмидту: сплошные линии соответствуют случаю $M = 1/2 M_\odot$, а штриховая — случаю $M = M_\odot$.

можны одновременные колебания в двух модах (Стоби, 1970; Штеллингверф, 1975).

6. **Выводы.** Резюмируем основные результаты и выводы, полученные в данной работе при изучении эволюционных ($M_\odot$) и пульсационных (M_Q , M_α и M_β) масс классических цефеид Галактики:

1. Использование радиусов, полученных методом Весселинка, не приводит к систематически меньшим пульсационным массам M_Q по сравнению с эволюционными массами $M_\odot$. Это относится, в частности, и к цефеидам в скоплениях, s-цефеидам и цефеидам с двойной периодичностью. При применении соотношения PCL Ибена и Таггла $M_Q \approx M_\odot$, а из зависимости PCL Сендиджа и Таммана следует, что $M_Q < M_\odot$.

2. Изучение цефеид со ступенькой на кривых лучевой скорости и блеска подтверждает вывод других авторов о меньших по сравнению с эволюционными массами. Независимые оценки пульсационных масс M_Q и

и M_b цефеид с двойной периодичностью сильно отличаются между собой, причем $M_Q \approx M_\odot$, а $M_b \approx 1/3 M_\odot$.

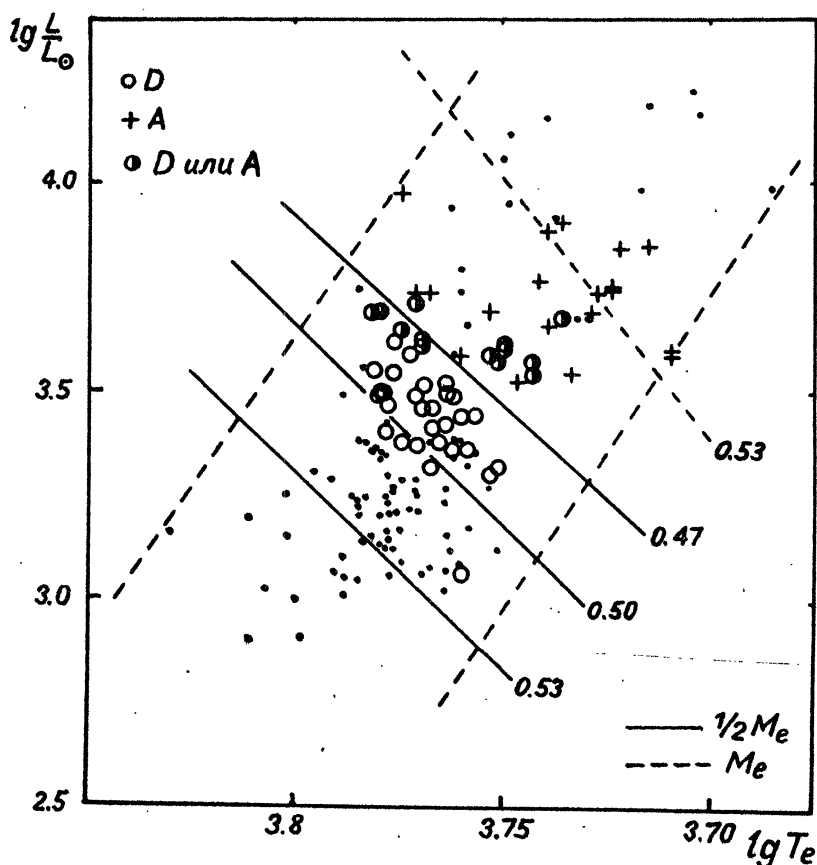


Рис. 4. Диаграмма эффективная температура — светимость цефеид. Обозначения такие же, как на рис. 3. Использованы соотношения PCL Сендиджа и Таммана и шкала эффективной температуры Крафта. Штриховыми линиями отмечены границы полосы неустойчивости.

3. Для цефеид малых масс более вероятно второе пересечение полосы неустойчивости, а для цефеид больших масс — третье пересечение.

4. Вариации химического состава 1 типа населения, разные стадии эволюции и конкретные способы расчетов не играют существенной роли при сравнении масс $M_\odot$ и M_Q цефеид; некоторое же значение может иметь выбор системы эволюционных треков.

Проблему масс цефеид в настоящее время нельзя считать решенной.

Сводку формул для расчетов и таблицы с оценками масс приведены в приложении к диссертации (Цветков, 1977), а сами расчеты были сделаны в 1976 г. на ЭВМ М-222 Астросовета АН СССР.

Автор благодарен Н.С. Николу за предоставление наблюдательных данных и А.А. Памятных А.Э. Пискунову и Ю.Н. Ефремову за помощь в расчетах и обсуждение результатов.

Литература:

- Джой, 1937 — Joy A.H., *ApJ* **66**, 363.
 Ибен, 1967 — Iben I., *Ann. Rev. Astr. Ap.* **5**, 571.
 Ибен и Таггл, 1972 — Iben I., Tuggle R.S., *ApJ* **176**, 441.
 Ибен и Таггл, 1975 — Iben I., Tuggle R.S., *ApJ* **197**, 39.
 Иванов Г.Р., 1975, Диссертация, София.
 Кинг и др., 1975 — King D.S., Hansen C.J., Ross R.R., Cox J.P., *ApJ* **195**, 467.
 Коган, 1970 — Cogan B.C., *ApJ* **162**, 139.
 Коган, 1977 — Cogan B.C., *ApJ* **211**, 890.
 Кокс и др., 1977а — Cox A.N., Deupree R.G., King D.S., Hodson S.W., *ApJ* **214**, L 127.
 Кокс и др., 1977б — Cox A.N., King D.S., Hodson S.W., Henden A.A., *ApJ* **212**, 451.
 Кристи, 1966 — Christy R.F., *ApJ* **145**, 340.
 Николов Н.С., 1968, "Каталог кривых блеска и показателей цвета цефеид в системе UBV", София.
 Петерсен, 1973 — Petersen J.O., *Astron. Astrophys.* **27**, 89.
 Роджерс, 1970 — Rodgers A.W., *MNRAS* **151**, 133.
 Сендидж и Граттон, 1963 — Sandage A.R., Gratton L., "Star Evolution", ed; L. Gratton (New York: Academic Press), p. 11.
 Сендидж и Тамман, 1969 — Sandage A.R., Tammann G.A., *ApJ* **157**, 683.
 Симон и Шмидт, 1976 — Simon N.R., Schmidt E.G., *ApJ* **205**, 162.
 Стоби, 1969 — Stobie R.S., *MNRAS* **144**, 485.
 Стоби, 1970 — Stobie R.S., *Observatory* **90**, 20.
 Стоби, 1974 — Stobie R.S., in "Stellar Instability and Evolution", eds. P. Ledoux et al., Dordrecht-Boston, p. 49.
 Фрике и др., 1972 — Fricke K., Stobie R.S., Strittmatter P.A., *ApJ* **171**, 593.
 Цветков Ц., 1977, Диссертация, Москва.
 Шмидт, 1976 — Schmidt E.G., *ApJ* **203**, 466.
 Штеллингверф, 1975 — Stellingwerf R.F., *ApJ* **199**, 705.

Кафедра астрономии Софийского
 университета
 Болгария

Поступила в редакцию
 2 июля 1980 г.