

конвективной зоны звезды, установление распределений скорости осевого вращения и молекулярного веса вдоль радиуса. Наблюдаемые изменения периодов нерадиальных мод служат непосредственным тестом выводов теории охлаждения белых карликов, представляющих собой финальную стадию эволюции звезд с массой, близкой к солнечной.

Представляя собой одно из направлений радиационной газовой динамики, теория звезд-

ных пульсаций сталкивается со свойственными этому разделу физики трудностями. Например, даже в простейшем случае бесконечно малых адиабатических радиальных звездных пульсаций решение уравнений не может быть получено в аналитическом виде, поэтому в основе всех результатов теории лежат сложные и трудоемкие вычисления. Существующие в настоящее время вычислительные средства позволяют моделировать лишь сферически-сим-

метричные звездные пульсации, тогда как анализ нерадиальных звездных пульсаций проводится в линейном приближении, предполагающем бесконечно малые амплитуды смещения. Несомненно, что по мере роста производительности компьютеров возможности вычислительной радиационной газовой динамики распространятся на решение трехмерных задач, и свое развитие получит нелинейная теория нерадиальных звездных пульсаций. ■

Литература

1. *Eddington A.S.* // The Internal Constitution of the Stars. Cambridge, 1926.
2. *Eddington A.S.* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1941. V.101. P.182—194.
3. *Жевакин С.А.* // Астрон. журн. 1953. Т.30. С.161—179.
4. *Жевакин С.А.* // Астрон. журн. 1954. Т.31. С.141—153.
5. *Zhevakin S.A.* // Annual Review of Astron. and Astrophys. 1963. V.1. P.367—400.
6. *Кокс Дж.П.* // Теория звездных пульсаций. М., 1983.
7. *Umto W., Osaki Y., Ando H. et al.* // Nonradial Oscillations of Stars. Tokyo, 1989.

Современные наблюдения классических цефеид

Л.Н.Бердников, А.С.Расторгуев, Н.Н.Самусь

Классическими цефеидами* называют желтые (принадлежащие к спектральным классам F и G) сверхгиганты из звездного населения I типа, переменность блеска которых

* Общим названием «цефеиды» обычно объединяют классические цефеиды и звезды типа W Девы, рассматривая обе группы как аналоги, относящиеся к разным типам звездного населения. Первые принадлежат к числу объектов плоской составляющей Галактики.

© Бердников Л.Н., Расторгуев А.С., Самусь Н.Н., 2006

обусловлена их радиальными пульсациями. В настоящее время в Общем каталоге переменных звезд [1] зарегистрировано около 700 цефеид Галактики, периоды пульсаций которых заключены в пределах от одного до 68 дней.

Блеск этих звезд изменяется строго периодически с амплитудами от нескольких десятых до 1.5 звездных величин (в визуальных лучах), причем усиления яркости происходят значительно быстрее, чем ослабления —

кривые изменения блеска асимметричны. Во время пульсаций изменяются размеры (до 10%) и показатели цвета, а значит, и температура — в максимуме блеска цефеиды голубее и горячее. В максимуме все цефеиды имеют спектральный класс F5, а спектральные классы в минимуме бывают разными, от класса G до сравнительно высокотемпературных подклассов спектрального класса K: чем длиннее период, тем более холодной звезде соответствует спектр.

Что же известно к настоящему времени о цефеидах и почему необходимы их дальнейшие исследования?

Оглядываясь назад

Первые цефеиды — η Орла и δ Цефея — были открыты английскими астрономами-любителями Э.Пиготтом и Дж.Гудрайком в 1784 г. Наблюдения переменных звезд поначалу велись визуальным методом, поэтому число открытых объектов росло медленно: в последующие 100 лет их было найдено немногим более сотни, включая десяток цефеид. Положение кардинально изменилось в конце XIX в., когда астрономы стали применять фотографию: порой открывали до полутысячи переменных звезд в год. В начале XX в. было подмечено, что чем ярче цефеида, тем длиннее ее период изменения блеска. На рис. 1, заимствованном из исторической работы Г.Ливитт [2], показано, как связана с логарифмом периода видимая звездная величина цефеид Малого Магелланова Облака в максимуме и в минимуме. Эта закономерность получила название зависимости «период—светимость». В те годы уже знали, что Малое Магелланово Облако представляет собой изолированную звездную группировку, т.е. все ее звезды находятся практически на одинаковом расстоянии от нас. А это значит, что соотношение между периодом и видимым блеском отражает связь между периодом и истинной светимостью звезды (ее абсолютной звездной величиной). Определив мощность излучения близких цефеид другими способами (измерив тригонометрический параллакс, установив так называемый статистический параллакс или воспользовавшись данными о цефеидах в звездных скоплениях с известными расстояниями) и сравнивая истинную светимость и видимую яркость звезды, с по-



Николай Николаевич Самусь, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии РАН и Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга МГУ им.М.В.Ломоносова (ГАИШ), сопредседатель Международной общественной организации «Астрономическое общество». Руководит работами по составлению каталогов переменных звезд, занимается измерением лучевых скоростей цефеид и исследованиями шаровых звездных скоплений.

Леонид Николаевич Бердников, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ГАИШ. Область научных интересов — фотометрия классических цефеид, исследования их распределения в Галактике и эволюционных изменений периодов.

Алексей Сергеевич Расторгуев, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ и ведущий научный сотрудник ГАИШ. Занимается изучением строения, кинематики и динамики Галактики, исследованиями переменных звезд и звездных скоплений.

мощью зависимости «период—светимость» можно найти расстояния до далеких цефеид. Благодаря этой зависимости цефеиды стали играть важнейшую роль в астрономии: по сравнению с другими объектами расстояния до далеких цефеид можно определить легче и точнее, а значит, можно узнать расстояние и до любой галактики, где их удастся обнаружить. Так, открытие цефеид в галактиках М 31, М 33 и NGC 6822 позволило американскому астроному Э.Хабблу в 1927—1928 гг. оценить расстояние до них и окончательно доказать, что они лежат за пределами нашей Галактики и представляют собой самостоятельные крупные звездные системы. Можно сказать, что именно цефеиды «переместили» наше

Солнце из центра единственной (как казалось прежде) звездной системы Млечного Пути на окраину одной из бесчисленного множества таких систем. Сейчас найденные данным способом расстояния используют для определения постоянной Хаббла, которая является ключом для решения вопроса о возрасте Вселенной, ее прошлом и будущем.

Точность измерения расстояний этим способом зависит как от точности установления зависимости «период—светимость» [3], так и от степени изученности самих цефеид. Поэтому в конечном итоге все упирается в проведение большого числа наблюдений. До середины прошлого века фотометрические наблюдения проводились визуальными или фотографи-

ческими методами, которые давали большие ошибки и не позволяли надежно определить расстояния до цефеид и выяснить их физические характеристики. Ситуация качественно изменилась с появлением фотоэлектрических фотометров, в которых регистрация светового излучения основана на фотоэффекте. Точность измерений блеска повысилась на порядок, а главное — стало возможным проводить высокоточные наблюдения звезд в различных участках спектра, что позволило определять межзвездное поглощение света от каждой звезды, ее температуру, расстояние и т.п.

Массовые фотоэлектрические измерения блеска цефеид стали проводиться с начала 1950-х годов, и в течение двух десятилетий интенсивность наблюдений оставалась высокой в обсерваториях многих стран, за исключением нашей. Именно в это время С.А.Жевакиным были заложены физические основы теории цефеид, объяснены причины радиальных пульсаций этих звезд. Долгосрочные наблюдательные программы всегда особенно успешно проводили российские и советские астрономы, и когда в семидесятых годах число проводимых наблюдений цефеид повсеместно стало быстро уменьшаться из-за переключения ученых на более «модные» направления, эстафету исследований подхватили в нашей стране. С начала восьмидесятых цефеиды стали активно и регулярно наблюдаться только у нас: в течение последующих двадцати пяти лет было получено свыше 75 тыс. наблюдений в широкополосной системе UBVR_I, что составляет сейчас около 60% всего мирового наблюдательного материала цефеид в этой стандартной системе.

На рис.2 показано распределение цефеид с надежно определенными расстояниями в плоскости Галактики. Солнце находится в центре рисунка, положение центра Галактики (GC)

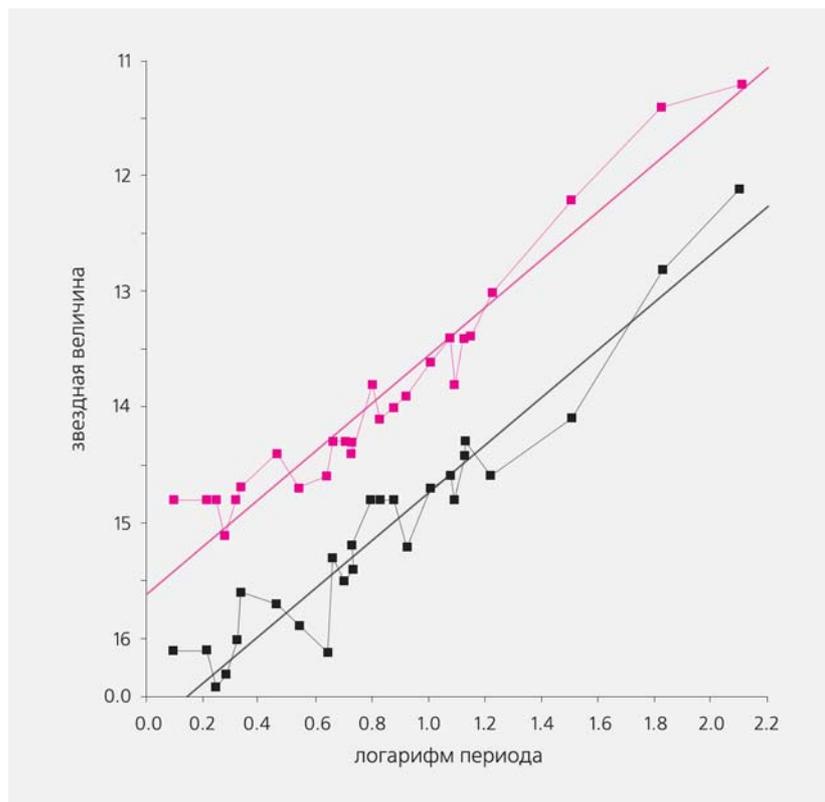


Рис.1. Зависимость между звездной величиной в максимуме (показана цветом) и минимуме и логарифмом периода (в сутках) для цефеид Малого Магелланова Облака из работы Г.Ливитт 1912 г.

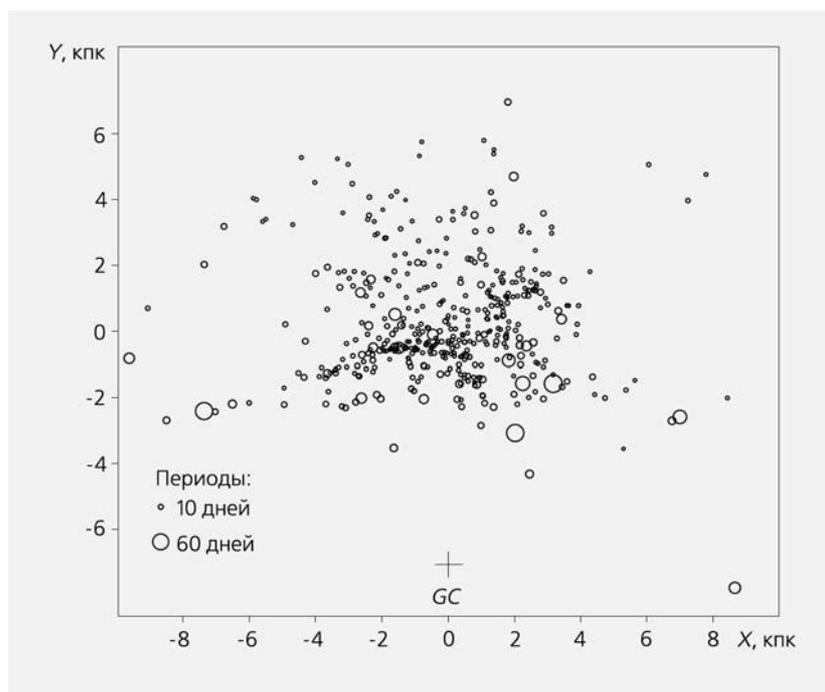


Рис.2. Распределение цефеид в проекции на плоскость Галактики.

отмечено крестом. Цефеиды изображены кружками, диаметры которых пропорциональны периодам в масштабе, показанном внизу слева. Поскольку цефеиды принадлежат плоской составляющей Галактики, изучение их пространственного распределения позволяет определить реальную структуру галактического диска [4].

Важнейшая наблюдательная характеристика цефеиды — период ее пульсаций. Уже в начале XX в. у некоторых звезд были обнаружены небольшие изменения периодов, у некоторых звезд период систематически увеличивается или уменьшается на протяжении десятилетий. Природа изменений периода оставалась неизвестной вплоть до 1960-х годов, когда появление ЭВМ дало толчок к бурному развитию теории звездной эволюции, которая и предсказала систематические медленные изменения периодов цефеид. Цефеида подобна пружинному маятнику, роль жесткости пружины играет средняя плотность вещества звезды. У эволюционирующей звезды постепенно меняется диаметр, а значит, и средняя плотность.

Что уже знаем

При изучении эволюции звезд всегда обращаются к диаграмме Герцшпрунга—Рассела, которая связывает температуру и светимость звезд. В ходе эволюции звезда перемещается по диаграмме вдоль кривой, именуемой эволюционным треком. На рис.3 представлена теоретическая диаграмма Герцшпрунга—Рассела, на нее нанесены эволюционные треки звезд с массой, в четыре (внизу) и семь (вверху) раз превосходящей солнечную. Штриховыми линиями показаны границы полосы неустойчивости, т.е. области, в которой звезды становятся цефеидами, а цветными отрезками — линии одинаковых периодов цефеид. Треки не совпа-

дают с линиями постоянного периода, значит, при пересечении звездой полосы неустойчивости ее период будет медленно изменяться. Мы видим, что, согласно теоретическим расчетам эволюции, эволюционный трек звезды с массой в четыре солнечных пересекает полосу неустойчивости только один раз, а трек более массивной ($7 M_{\odot}$) звезды — трехкратно. Для некоторых звезд теория эволюции может предсказывать и пятикратное пересечение полосы неустойчивости, и каждый раз при этом звезда становится цефеидой. Если движение в полосе неустойчивости на нашей диаграмме происходит слева направо, то период цефеиды возрастает, если же справа налево — уменьшается. Средством анализа изменений периода служит диаграмма O—C, на которую в зависимости от времени нано-

сят разности между наблюдаемыми моментами максимального блеска (O) и предвычисленными моментами (C). В случае монотонного векового изменения периода диаграммы O—C будут иметь форму параболы, ветви которой идут вверх или вниз в зависимости от направления эволюции.

При изучении изменчивости периодов очень важно охватить наблюдениями как можно больший интервал времени. При этом не только собираются все опубликованные ранее данные, но и изучаются старые фотопластины, имеющиеся в архивах многих астрономических обсерваторий. С помощью старых данных удастся сконструировать диаграммы O—C, охватывающие столетний (а иногда и более продолжительный) временной интервал, что помогает выявить эволюционные измене-

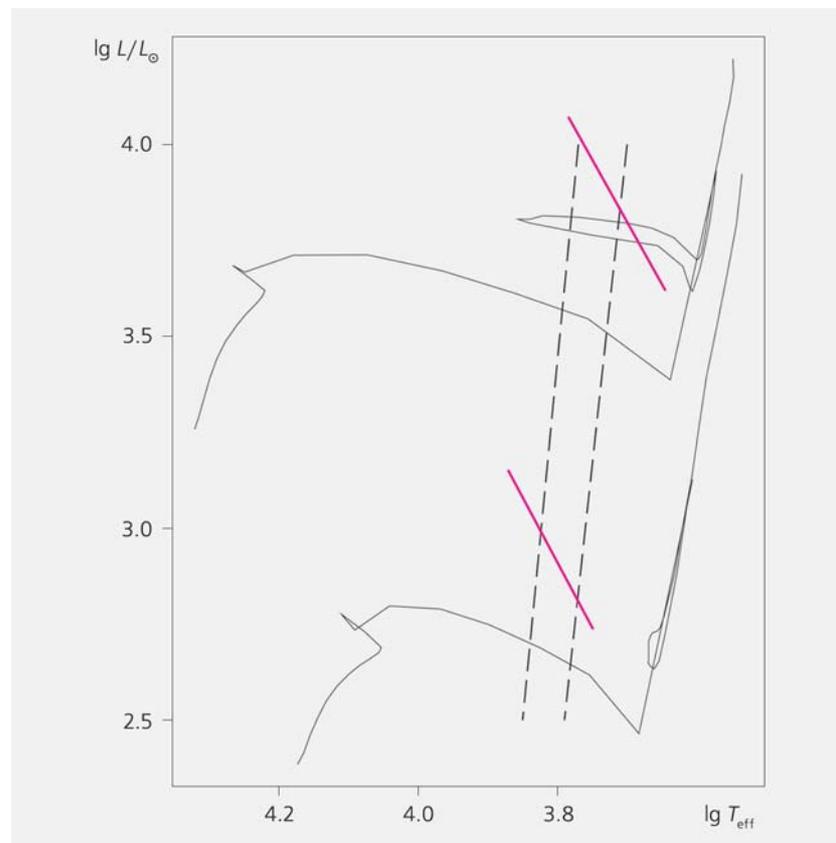


Рис.3. Эволюционные треки звезд на теоретической диаграмме Герцшпрунга—Рассела (по вертикали отложены логарифмы светимости, по горизонтали — логарифмы эффективной температуры).

ния периодов для большинства цефеид. В качестве примера на рис.4 приведена диаграмма O—C для цефеиды VY Киля [5], период которой необыкновенно быстро уменьшается.

Подобный анализ, проведенный почти для 200 цефеид, показал хорошее совпадение наблюдаемых скоростей изменения периодов с теоретическими, что позволяет определять, какой по счету раз каждая из звезд оказалась в полосе нестабильности, а в перспективе сделает возможным строить зависимость «период—светимость» отдельно для каждого такого этапа эволюции. В результате возрастет точность измерения расстояний до цефеид, так как уменьшится разброс точек на зависимости (он связан в том числе и с тем, что звезды, находящиеся на разных по порядку пересечениях полосы нестабильности, могут иметь равные периоды, но разные светимости).

Реализация проектов по поиску эффектов гравитационного микролинзирования, помимо решения основных поставленных задач, позволила открыть более тысячи новых цефеид в Магеллановых Облаках. Большинство из них имеют небольшие амплитуды изменений блеска и, как выяснилось, пульсируют в первом обортоне. Тот факт, что свыше трети цефеид Магеллановых Облаков имеют малые амплитуды, совершенно не согласовывался с ситуацией в нашей Галактике, где на долю таких цефеид приходилось всего около 8%. Противоречие разрешилось довольно скоро — через несколько лет были опубликованы первые результаты мониторинга южного неба с ПЗС-приемниками излучения (проект ASAS), при котором было найдено более тысячи звезд, показывающих периодические изменения блеска небольшой амплитуды, а среди них, несомненно, есть и цефеиды. Это означает, что имеется шанс значительно увеличить число известных цефеид и использовать их как для

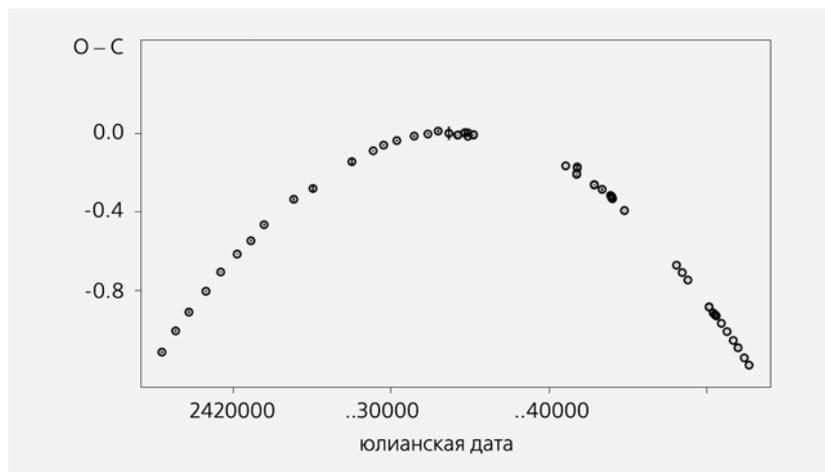


Рис.4. Диаграмма O—C для цефеиды VY Киля, период которой быстро изменяется (разность O—C выражена в долях периода звезды, который составляет 18.94 сут).

изучения свойств самих объектов, так и в качестве индикаторов расстояний при анализе структуры диска Галактики и для уточнения постоянной Хаббла.

В последние два десятилетия усилия исследователей были направлены на массовое измерение лучевых скоростей классических цефеид, т.е. скоростей движения их атмосфер вдоль луча зрения, определяемых на основе эффекта Доплера. Эти скорости отражают движение цефеиды в Галактике (для цефеид в двойных системах — и орбитальное движение), а также пульсационные движения в атмосферах. Начиная с 1986 г. при помощи созданного в ГАИШ МГУ корреляционного спектрографа — измерителя лучевых скоростей — астрономы ГАИШ и Института астрономии РАН сделали более 10 тыс. измерений для 165 цефеид северного неба с характерной погрешностью порядка 0.5 км/с и впервые построили кривые изменения лучевых скоростей с относительной точностью, сравнимой с точностью фотоэлектрической фотометрии. Полученный массив оригинальных высокоточных данных стал богатейшим в мире. Средняя скорость (скорость системы) большинства цефеид определена с погрешностью менее

0.1 км/с, а скорости многих слабых цефеид вообще получены впервые. На основе таких результатов можно решить целый ряд важных проблем строения и кинематики Галактики.

Что предстоит узнать

Во-первых, благодаря высокой светимости цефеид и сравнительно надежно установленной шкале расстояний можно использовать их лучевые скорости для уточнения кривой вращения Галактики, причем что особенно важно — на больших расстояниях от ее центра. Для этой цели лучше всего подходят цефеиды с галактическими долготами вблизи 135° и 225°. Более того, пользуясь полученными данными совместно с информацией о молодых рассеянных скоплениях, можно по возмущениям поля пространственных скоростей установить основные параметры волны плотности, определяющей спиральную структуру Галактики, такие как угол закрутки спиралей и амплитуды возмущений скоростей, составляющие 5—10 км/с. Вследствие серьезного влияния эффектов наблюдательной селекции (неполнота выборки, сильное межзвездное

поглощение) на пространственное распределение объектов именно особенности кинематики цефеид и скоплений содержат самую богатую информацию о спиральном узоре Галактики.

Во-вторых, пространственные скорости цефеид, вычисленные на основе надежно измеренных лучевых скоростей, а также собственных движений, приведенных в каталоге HIPPARCOS, дают возможность применить метод статистических параллаксов для определения их кинематических характеристик и уточнения шкалы расстояний. Предварительные результаты показали, что выборка цефеид с периодами пульсаций менее 9 суток может быть «засорена» цефеидами, пульсирующими в первом оберitone. Зависимость «период—светимость» для таких пульсаций иная, что необходимо учитывать. Этим же методом показано, что шкала расстояний группы цефеид с более продолжительными периодами не нуждается в заметной коррекции.

В-третьих, многолетний мониторинг лучевых скоростей открывает перспективу исследования спектрально-двойных цефеид. Поскольку спутниками сверхгигантов-цефеид являются, как правило, звезды главной последовательности, практически не вносящие вклада в суммарный блеск, в спектрах исследуемых цефеид видны линии только одного компонента. На основе нашей базы данных по высокоточным лучевым скоростям [6] удалось обнаружить ряд ранее неизвестных двойных цефеид, и по фотометрическим и спектральным данным, полученным в однородной системе, найти параметры орбит и массы компонентов новых и уже изве-

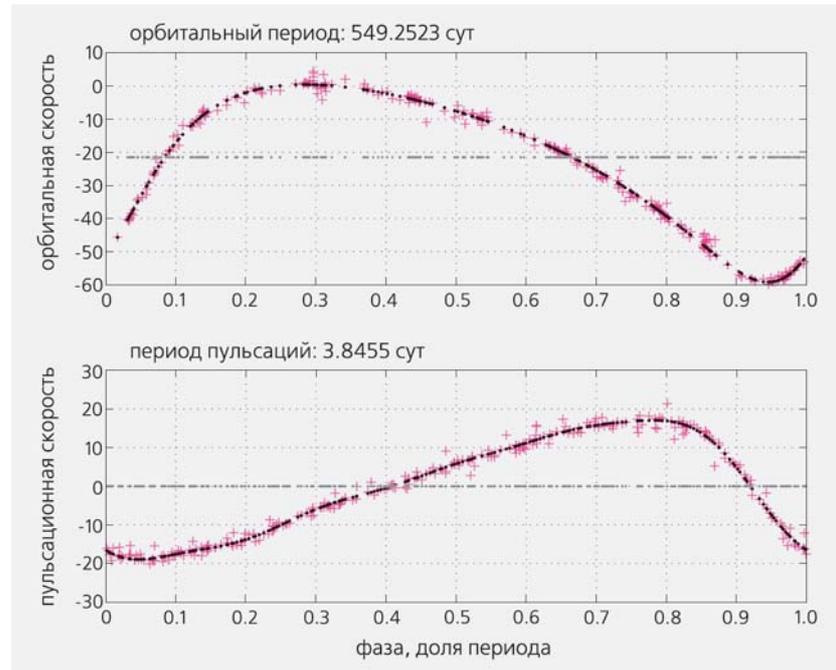


Рис.5. Кривые изменения лучевых скоростей двойной цефеиды SU Лебеда.

стных двойных цефеид. Периоды подавляющего числа спектрально-двойных цефеид составляют сотни дней, что согласуется с их большими геометрическими размерами. В качестве примера на рис.5 показаны орбитальная и пульсационная кривые изменения лучевых скоростей двойной цефеиды SU Лебеда, орбита которой характеризуется довольно высоким эксцентриситетом (0.36). Мы оцениваем долю спектрально-двойных цефеид Галактики в 22%, что хорошо согласуется с долей спектрально-двойных звезд-гигантов.

И наконец, объединяя информацию о лучевых скоростях цефеид с многоцветными фотометрическими данными, можно рассчитать пульсационные радиусы цефеид и выделить те це-

феиды, радиусы которых будут доступны непосредственному измерению при помощи современных интерферометрических методов. В частности, зависимость «период—радиус» у классических цефеид открывает дополнительные возможности для выделения цефеид, пульсирующих в первом или втором оберitone, и уточнения на этой основе индивидуальных расстояний цефеид Галактики.

Суммируем сказанное: классические цефеиды лежат в основе современной шкалы расстояний во Вселенной, остаются одним из основных средств исследования строения и кинематики нашей Галактики и являются объектами, позволяющими наиболее надежно проверить теорию эволюции звезд. ■

Литература

1. Холопов П.Н., Самусь Н.Н., Горанский В.П. и др. Общий каталог переменных звезд. Т.1—III. М., 1985—1987.
2. Leavitt H. Harvard Observatory Circular №173. 1912. P.1—3.
3. Бердников Л.Н., Возякова О.В., Дамбис А.К. // Письма в Астрон. журнал. 1996. Т.22. №12. С.936—944.
4. Бердников Л.Н. // Письма в Астрон. журнал. 1987. Т.13. С.110—117.
5. Turner D.G., Forbes D., van den Bergh S. et al. // Astronomical Journal. 2005. V.130. №3. P.1194—1205.
6. Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Сачков М.Е. и др. // Письма в Астрон. журнал. 1998. Т.24. №12. С.939—942.