

УДК 524.33, 524.38

19 лет на Симеизской обсерватории – московская программа измерений лучевых скоростей переменных и кратных звезд

Н.А. Горыня¹, А.С. Расторгуев², Н.Н. Самусь^{1,2}, А.Д. Зенькович³, И.В. Николенко³

¹Институт астрономии РАН, Москва

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

³Симеизское отделение НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Украина, Крым

Поступила в редакцию 24 октября 2008 г.

Аннотация. С 1990 г. в Симеизе ведутся систематические измерения лучевых скоростей с корреляционным измерителем лучевых скоростей (ИЛС). Он был первым астрофизическим прибором, с которым начаты наблюдения на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории. Из 29 000 измерений лучевых скоростей, полученных за все время наблюдений с ИЛС, на Симеиз приходится свыше 19 500 измерений лучевых скоростей двойных и кратных звезд, красных гигантов и сверхгигантов, членов рассеянных и шаровых скоплений и других звезд с характерной точностью лучше 1 км/с. Особую ценность представляют около 10 000 измерений, выполненных для 171 цефеиды северного неба. Этот уникальный ряд наблюдательных данных является самым обширным в мире. Он позволяет проводить поиск и изучение двойных цефеид, массовое определение их радиусов, детальное изучение кинематики и динамики диска Галактики, проверки моделей строения пульсирующих переменных звезд.

19 YEARS AT SIMEIZ OBSERVATORY – THE MOSCOW RADIAL-VELOCITY PROGRAM FOR VARIABLE AND MULTIPLE STARS, *by N.A. Gorynya, A.S. Rastorguev, N.N. Samus, A.D. Zenkovich, I.V. Nikolenko.*

Ключевые слова: Лучевые скорости, двойные и кратные звезды, цефеиды

1 Введение

Исследование лучевых скоростей звезд является одной из актуальных проблем звездной астрономии и астрофизики. Велико значение однородных измерений лучевых скоростей для исследования двойных и кратных звезд, изучения кинематики и динамики Галактики, физики и эволюции звезд, шкалы расстояний для проверки правильности теории пульсаций и т. д. В юбилейный год Симеизской обсерватории нельзя не вспомнить, что еще Шайн и Альбицкий (1932) на 40" телескопе получили в течение 1929–1931 годов около 2300 спектрограмм и по ним определили лучевые скорости 343 звезд.

Гриффин (1967) реализовал на практике идею фотоэлектрического измерения лучевых скоростей с помощью маски, соответствующей определенным линиям в спектре звезды. Если единственной целью является измерение лучевой скорости, не экономично наблюдать все детали звездного спектра. Лучевую скорость можно получить с помощью корреляционного профиля, являющегося суммой всех линий спектра после их прохождения через маску. Хотя информация, которую несет каждая отдельная линия, теряется, лучевая скорость получается

значительно быстрее. Гриффин создал первый такой прибор и доказал высокую эффективность метода. Появление эффективных корреляционных методов и создание на их основе спектрометров нового поколения типа CORAVEL на базе эшелельных спектрографов (Баранн и др., 1979) позволило получать массовые и однородные измерения с небывалой точностью.

В 1984 г. в ГАИШ был сконструирован и создан корреляционный спектрометр типа CORAVEL на базе высокодисперсного (1–2 Å/мм) эшелельного спектрографа, в фокальной плоскости которого помещена маска, воспроизводящая спектр α Воо (К1III). Прибор был назван измерителем лучевых скоростей (ИЛС) (Токовинин, 1987). Он предназначен для работы в касегреновском фокусе средних рефлекторов. ИЛС работает в спектральном диапазоне F5–M5 для нормальных звезд главной последовательности (могут быть измерены также гиганты спектральных классов F0–F4 и некоторые Ар-звезды). В середине спектрального диапазона с 1-м телескопом могут измеряться звезды до $12^m V$, а в исключительных случаях – до $14^m V$. Характерная экспозиция составляет 10 мин., но может достигать до 20–30 мин. для слабых звезд и звезд с низким контрастом линий. Точность измерений (по внешней сходимости) для ярких звезд составляет 0.3 км/с, при внутренних ошибках измерения – 0.05–0.2 км/с. Рабочий диапазон измеряемых лучевых скоростей от –300 до +300 км/с.

2 Наблюдения

С 1986 г. начаты систематические наблюдения с ИЛС по нескольким программам. До 1990 г. наблюдения проводились на многих обсерваториях и телескопах. ИЛС стал первым астрофизическим прибором, с которым были начаты наблюдения на новом телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории. Мы приступили к наблюдениям на 1-м телескопе летом 1990 г., и с тех пор большая часть всех наблюдений с ИЛС получена на телескопе Цейсс-1000.

Всего за 23 года с ИЛС измерено более 29 000 лучевых скоростей звезд. В наблюдательные сезоны 1990–2008 гг. на 60-см и 1-м телескопах Симеизской обсерватории было получено свыше 19 500 высокоточных измерений лучевых скоростей программных звезд.

Наша огромная база данных лучевых скоростей звезд, полученная в большей степени благодаря наблюдениям на 1-м телескопе Симеизской обсерватории, позволила провести целый ряд исследований физики звезд и кинематики Галактики, в основном по совместным программам ГАИШ и ИНАСАН.

А.А. Токовинин в 1985 г. начал статистический обзор близких К- и М-карликов для выявления их двойственности. Эта программа легла в основу его докторской диссертации, защищенной в 1991 г. Сделаны открытия двойных и кратных звезд, произведен расчет их орбит, определены массы и светимости компонентов, проведено исследование статистических свойств ансамбля. Впервые составлен общий каталог кратных звезд.

В 1994 г. была начата программа измерений лучевых скоростей компонентов визуально-двойных и кратных звезд. До 2000 г. А.А. Токовинин, М.Г. Смеховым и Н.И. Шатским было получено около 4 200 лучевых скоростей 574 компонентов и определены 46 новых спектроскопических орбит. С 2001 г. наблюдения по этой программе продолжила Н.А. Горыня, к 2008 г. получившая еще около 500 измерений лучевых скоростей компонентов 28 двойных и кратных систем. По результатам этой программы опубликовано более 60 статей.

ИЛС участвовал в Пулковской программе исследований визуально-двойных звезд в окрестностях Солнца. Динамический метод определения орбит двойных звезд (Киселев и Кияева, 1980) позволяет определить орбиты и оценить массы широких двойных по наблюдениям короткой дуги. Для его применения необходим однородный ряд фотографических положений и тригонометрических параллаксов, а также высокоточные относительные лучевые скорости компонентов кратных систем. ИЛС оказался очень эффективен для решения этой задачи. В 1999–2008 гг. Н.А. Горыня получила более 200

измерений относительных лучевых скоростей компонентов 17 визуально-двойных и кратных звезд из пулковского списка.

Расторгуев и Самусь (1991) измерили лучевые скорости красных гигантов в семи шаровых скоплениях Галактики. Для пяти скоплений получены оценки массы и отношения массы к светимости. Обнаружено вращение шарового скопления М5. Глушкова и Расторгуев (1991) определили лучевые скорости звезд в поле 18 рассеянных скоплений Галактики. Заболотских и др. (2002) использовали данные о лучевых скоростях цефеид и рассеянных скоплений для детального изучения кинематики галактического диска. Выведена наиболее точная кривая вращения, оценены параметры эллипсоида остаточных скоростей и параметры спирального узора (угол закрутки и амплитуды возмущений поля скоростей).

3 Цефеидная программа

В 1987–1988 гг. были получены лишь разрозненные наблюдения цефеид и показана пригодность ИЛС для измерения лучевых скоростей классических цефеид, а иногда и цефеид сферической составляющей. К этому периоду относятся около 40 наблюдений 16 цефеид, по точности сравнимых с лучшими мировыми данными. С 1988 г. наблюдения цефеид проводятся нами систематически по специально составленной программе. Поставлены задачи измерения лучевых скоростей классических цефеид, исследования бимодальных цефеид, обнаружения и исследования спектрально-двойных цефеид, определения пульсационных радиусов цефеид методом Бааде–Весселинка, определения мод пульсаций. Для решения этих задач необходим обширный наблюдательный материал. Всего нами получено около 11 000 измерений лучевых скоростей 171 цефеиды (около 72 % от всего мирового массива опубликованных данных по цефеидам северного неба). На долю Симеиза приходится более 9 000 измерений. Высокоточные кривые изменения лучевых скоростей 89 цефеид получены нами впервые, а у 55 из них до сих пор имеются только лучевые скорости, измеренные в ИЛС. С осени 2002 г. все наблюдения на 1-м телескопе с ИЛС проводила Н.А. Горыня. До 2008 г. ею получено свыше 4 000 измерений лучевых скоростей различных объектов. Ей сейчас принадлежит 53 % всех имеющихся измерений лучевых скоростей цефеид нашей группы. Наблюдения лучевых скоростей цефеид 1986–1997 гг. опубликованы в трех каталогах (Горыня и др., 1992, 1996б, 1999). Завершается подготовка четвертого каталога, содержащего около 4 000 измерений лучевых скоростей, и сводной электронной версии всех наблюдений.

Наш массив однородных и высокоточных измерений лучевых скоростей цефеид сейчас является самым обширным в мире. Для многих цефеид впервые получены кривые лучевых скоростей с плотным покрытием по фазам. В последние годы особое внимание уделялось наблюдениям цефеид на тех фазах пульсации, недостаточное покрытие которых наблюдениями снижает точность фурье-разложения кривой лучевых скоростей. Фурье-параметры очень важны для моделей цефеид, накладывают сильные наблюдательные ограничения на физические параметры. Такая информация, полученная для многих цефеид, позволяет определить зависимость масса-светимость, важную для теории эволюции. Наши данные о лучевых скоростях используются также для измерения разницы фаз между кривыми блеска и кривыми лучевых скоростей цефеид. Эти разности можно использовать для идентификации мод пульсаций. Для обеспечения полноты покрытия по фазам Н.А. Горыня и П. Москалик (Польша) составили детальные эфемериды на каждую ночь наблюдательного сезона для цефеид программы, что способствовало повышению эффективности наблюдений. Накопленный материал позволяет получить кривые лучевых скоростей цефеид беспрецедентно высокого качества с практически полным покрытием всех фаз пульсаций.

3.1. Последовательность Герцшпрунга

Благодаря хорошему покрытию кривых лучевых скоростей 36 одиночных классических цефеид Горыня (1998) смогла впервые построить последовательность таких кривых в зависимости от величины периода. Эта последовательность аналогична широко известной последовательности Герцшпрунга для кривых блеска классических цефеид, которая играет огромную роль в проверке правильности теоретических расчетов пульсаций классических цефеид. Для сравнения с наблюдениями более ценной может оказаться именно последовательность кривых лучевых скоростей, более непосредственным образом отражающая характер пульсационных движений в атмосферах цефеид различных периодов.

3.2. Бимодальные цефеиды

У бимодальных цефеид в изменениях блеска и лучевой скорости одновременно наблюдаются две периодичности. В нашей Галактике известно всего 23 бимодальных цефеиды и лишь 10 из них доступны наблюдениям на наших широтах. Семь из них входят в нашу программу. Для уверенного разделения кривых лучевых скоростей на две моды пульсации требуется достаточно длительный ряд наблюдений (не менее 50 точек). Нам удалось получить достаточное количество измерений лучевых скоростей и уверенно разделить моды пульсаций 6 бимодальных цефеид, в том числе (Антипин и др., 1999) бимодальной цефеиды V458 Sct, недавно открытой Антипиным (1997). Имея отдельные кривые лучевых скоростей для каждого периода можно оценить радиус бимодальной цефеиды методом Бааде-Весселинка.

3.3 Спектрально-двойные цефеиды

Проблема спектральной двойственности цефеид важна как для теории звездной эволюции, так и для теории звездных пульсаций, для изучения распространенности явления двойственности среди этих звезд, для определения физических характеристик самих цефеид и их спутников. Вопрос о двойственности цефеид возникает при исследовании зависимости период-светимость и кинематики. Одной из целей наших наблюдений было получение в каждом наблюдательном сезоне плотного ряда измерений лучевых скоростей каждой цефеиды с последующим вычислением средней скорости V_γ , поскольку самым простым способом выявления спектрально-двойных цефеид является сравнение средних скоростей, полученных по однородным рядам измерений в различные сезоны. Изменение V_γ пульсационной волны говорит об орбитальном движении в двойной системе.

Общее число цефеид, имеющих сейчас достаточно надежные средние лучевые скорости, достигает 250. Нам удалось только на основании наших наблюдений, полученных со средними ошибками от 0.5 до 0.7 км/с, уточнить или определить средние скорости около 100 цефеид. Мы уверенно подтвердили спектральную двойственность многих цефеид, заподозрили в спектральной двойственности еще несколько звезд и открыли три несомненных новых спектрально-двойных цефеиды – MW Cyg, VZ Cyg и BY Cas (см. Горыня и др., 1996а).

По оценкам разных авторов, доля спектрально-двойных звезд среди цефеид заключена между 20 % и 50 % или даже выше. Однако только на основании наших высокоточных, однородных и массовых измерений лучевых скоростей цефеид была выявлена или подтверждена спектральная двойственность 20 цефеид, что составляет около 22 % всей выборки и является достаточно реалистичной оценкой частоты встречаемости спектрально-двойных среди цефеид.

Мы определили или уточнили орбитальные элементы спектрально-двойных цефеид программы. Определение параметров орбит спектрально-двойных цефеид – задача более сложная, чем для звезд постоянного блеска: необходимо принимать во внимание пульсационные движения в атмосфере. Вычисление орбитальных параметров требует разделения вклада

орбитального движения и пульсаций в лучевые скорости. По орбитальной кривой лучевых скоростей определялись элементы орбиты, которые затем использовались для получения верхних оценок масс спутников цефеид. Используя же выделенную из кривой лучевых скоростей составляющую, обусловленную пульсациями, можно определить пульсационные радиусы спектрально-двойных цефеид методом Бааде-Весселинка, а затем использовать эти данные для определения зависимости период-светимость.

3.4. Радиусы цефеид

Высокоточная многоцветная фотометрия (Бердников, 2008) и плотные ряды лучевых скоростей открывают возможность массового определения пульсационных радиусов цефеид методом Бааде-Весселинка. Результаты можно использовать для построения зависимости период-радиус. Поскольку вычисление радиуса не зависит от моды пульсаций, можно независимо уточнить моду пульсаций по диаграммам период-радиус, а следовательно, и зависимость период-светимость и цефеидную шкалу расстояний.

В нашу программу наблюдений входят 26 малоамплитудных цефеид. Сачков (1997) определил радиусы тех 13 из них, для которых получены наиболее плотные ряды наблюдений, методом Бааде-Весселинка. Выяснилось, что выборка содержит как цефеиды, пульсирующие в первом обероне, так и звезды, пульсирующие в основном тоне. Сачков (2002) определил радиусы 64 цефеид, ранее считавшихся пульсирующими в основном тоне. Оказалось, что 13 из них пульсируют в обероне. Выведены две зависимости период-радиус отдельно для основного тона и первого обертона радиальных пульсаций.

Заболотских и др. (2002) применили к собственным движениям и лучевым скоростям цефеид метод статистических параллаксов и уточнили шкалу расстояний галактических цефеид и зависимость период-светимость, лежащую в основе межгалактической шкалы расстояний.

3.5. Новые программы

Важной задачей является исследование зависимости ширины корреляционного профиля, регистрируемого ИЛС, от фазы пульсации цефеид. Для 4 ярких цефеид проведены точные измерения лучевых скоростей на различных фазах, а для калибровки ширины корреляционного профиля получено свыше 150 измерений для 15 красных звезд высокой светимости постоянного блеска. А.С. Расторгуев и Н.А. Горыня по данным этих наблюдений впервые получили кривые изменения ширины корреляционного профиля с фазой пульсаций. Эти данные необходимы для расчета значения геометрического фактора перевода лучевых скоростей в скорость изменения радиуса, используемого в методе Бааде-Весселинка. Показано, что весселинковские радиусы цефеид должны быть увеличены с учетом вариаций фактора перевода со скоростью.

Москалик и Горыня (2005) использовали данные о лучевых скоростях цефеид для оценки средних угловых диаметров и амплитуд изменения угловых диаметров всех монопериодических цефеид ярче $8^m(V)$, имеющих точные кривые лучевых скоростей, с целью составления списка цефеид, перспективных для будущих интерферометрических наблюдений. Из 79 исследованных цефеид тринадцать удовлетворяют всем критериям, позволяющим при помощи современной интерферометрической техники измерять их угловые диаметры и амплитуды изменения диаметров с необходимой точностью. До сих пор такие измерения получены только для 5 из этих 13 цефеид. Еще 8 звезд остаются первоочередными кандидатами для подобных исследований, которые, наряду с линейными радиусами, определенными методом Бааде-Весселинка, позволят уточнить шкалу расстояний цефеид.

В последние годы в нашу программу измерения лучевых скоростей цефеид включены новые цефеиды, обнаруженные в проекте ASAS-3 (Поймански, 2002). Для некоторых из них уже

удалось получить кривые лучевых скоростей с удовлетворительным покрытием фаз пульсационного периода.

4. Заключение

Московская программа измерения лучевых скоростей двойных и кратных звезд, основными инструментами реализации которых были и остаются телескопы Симеизской обсерватории, оказалась весьма успешным проектом. В 1998 г. и 2003 г. цикл исследований цефеид, основанный преимущественно на наблюдениях в Симеизе, был признан одной из лучших научных работ ИНАСАН. В 2007 г. цикл работ Л.Н. Бердникова, А.С. Расторгуева и Н.Н. Самуся по комплексному исследованию цефеид был удостоен премии РАН им. Ф.А. Бредихина. Продолжение наблюдений с ИЛС на телескопе Цейсс-1000 в Симеизе приведет к получению новой ценной информации, относящейся как к физике звезд, так и к динамике нашей Галактики.

Наши работы поддержаны грантами РФФИ, Программы поддержки ведущих научных школ РФ, Программы Президиума РАН “Происхождение и эволюция звезд и галактик”.

Литература

- Антипин (Antipin S.V.) // Inform. Bul. Var. Stars. 1997. №. 4485.
Антипин и др. (Antipin S.V., Gorynya N.A. Sachkov M.E. et al.) // Inform. Bul. Var. Stars. 1999. №. 4718.
Баранн и др. (Baranne A., Mayor M., Poncet J.L.) // Vistas in Astron. 1979. V. 23. Pt. 4. P. 279.
Бердников (Berdnikov L.N.) // VizieR On-line Data Catalog II/285. 2008.
Глушкова Е.В., Расторгуев А.С. // Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17. С. 30.
Горыня (Gorynya N.A.) // Inform. Bul. Var. Stars. 1998. №. 4636.
Горыня Н.А., Ирсамбетова Т.Р., Расторгуев А.С., Самусь Н.Н. // Письма в Астрон. журн. 1992. Т. 18. С. 777.
Горыня Н.А., Расторгуев А.С., Самусь Н.Н. // Письма в Астрон. журн. 1996а. Т. 22. С. 38.
Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Расторгуев А.С., Сачков М.Е. // Письма в Астрон. журн. 1996б. Т. 22. С. 198.
Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Сачков М.Е. и др. // Письма в Астрон. журн. 1998. Т. 24. С. 939.
Гриффин (Griffin R.F.) // Astrophys. J. 1967. V. 148. P. 465.
Заболотских М.В., Расторгуев А.С., Дамбис А.К. // Письма в Астрон. журн. 2002. Т. 28. С. 454.
Киселев А.А., Кияева О.В. // Астрон. журн. 1980. Т. 57. С. 1227.
Москалик, Горыня (Moskalik P., Gorynya N.A.) // Acta Astron. 2005. V. 55. P. 247.
Поймански (Pojmanski G.) // Acta Astron. 2002. V. 52. P. 397.
Расторгуев А.С., Самусь Н.Н. // Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17. С. 915.
Сачков М.Е. (Sachkov M.E.) // Inform. Bul. Var. Stars. 1997. №. 4522.
Сачков М.Е. // Письма в Астрон. Журн. 2002. Т. 28. С. 653.
Токовинин А.А. // Астрон. журн. 1987. Т. 64. С. 196.
Шайн, Альбицкий (Shajn G., Albitsky V.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1932. V. 92. P. 771.