ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ЗВЕЗД

М. Е. Сачков[1], А. С. Расторгуев[2,3], В. Е. Панчук[4]

[1] *Институт астрономии РАН*
119017 Россия, Москва, ул. Пятницкая, 48

[2] *Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова*
119991 Россия, Москва, Воробьевы горы, д. 1

[3] *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ*
119992 Россия, Москва, Университетский проспект, д. 13

[4] *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*
367167 Россия, п. Нижний Архыз
e-mail: msachkov@inasan.ru

Точность определения лучевых скоростей астрономических объектов является важнейшим критерием состояния астрономической спектроскопии. В данной работе рассмотрены избранные астрофизические задачи, которые требуют различной точности измерения лучевых скоростей звезд.

ВВЕДЕНИЕ

Лучевая скорость астрономического объекта – скорость изменения расстояния между наблюдателем и объектом вдоль луча зрения – всегда рассматривалась как важнейший критерий состояния астрономической спектроскопии. Для любого астрофизического объекта определение лучевой скорости представляет фундаментальный интерес. В подавляющем большинстве случаев в астрономии лучевая скорость определяется по смещению спектральных линий вследствие эффекта Доплера, заключающегося в изменении длины волны при относительном движении источника и наблюдателя. Точность определения положения детали спектра на многоканальном приемнике излучения определяется числом каналов, приходящихся на эту деталь, и величиной отношения сигнал/шум в канале. Перед астрономами на протяжении последних почти полутора веков стояла задача надежно откалибровать это положение как длину волны или изменение длины волны. Например, для спектрографа с разрешающей силой $R = 50\,000$ изменение лучевой скорости на 1 м/с соответствует по порядку величины одной десятитысячной размера канала (пиксела). Однако такие факторы, как нестабильность осветительной системы калибровки, нестабильность конструкции телескопа (который для спектрографа является осветительной системой), нежесткость светоприемника, а также неоднозначность систем обработки изображений, оказываются на порядки величины больше. Применительно к 6-метровому телескопу САО РАН соотношение различных ошибок рассмотрено в работе [1], развитие техники измерений лучевых скоростей затрагивается в работе [2]. В данной работе мы рассмотрим избранные астрофизические задачи, которые требуют различной точности измерения лучевых скоростей.

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ. ТОЧНОСТЬ 3–5 км/с

Первым предложил использовать доплеровское смещение линий в спектрах звезд для определения их лучевых скоростей А. Физо в 1867 году. В 1868 г. У. Хёггинс измерил таким способом лучевую скорость Сириуса. С тех пор последовательное применение принципа Доплера–Физо в астрономии привело к ряду замечательных открытий.

В 1888 г. Г. Фогель совместно с Ю. Шейнером первым начал систематические измерения лучевых скоростей звезд по фотографическим спектрограммам, полученным в Потсдамской обсерватории. Их работа по сути открыла эру точных определений лучевых скоростей. Средние вероятные ошибки потсдамских определений составляли около 3 км/с (для самых ярких звезд), что соответствовало увеличению точности почти в 10 раз по сравнению с ранними визуальными микрометрическими измерениями. При этом были обнаружены периодические изменения скорости у Алголя. В 1889 г. было окончательно доказано, что переменность блеска этой звезды вызвана затмениями в двойной системе.

В 1892 г. был составлен каталог лучевых скоростей 51 звезды [3]. В 1889 г. директор Гарвардской обсерватории Э. Пикеринг обнаружил раздвоение линий в спектре Мицара [4]. Линии то сдвигались, то раздвигались с определённым периодом. Пикеринг понял, что это тесная двойная система, звёзды которой настолько близки друг к другу, что их нельзя различить ни в один телескоп, однако это можно сделать с помощью спектрального анализа.

С 1890 года (и систематически с 1893) работы по измерению лучевых скоростей звезд проводились в Пулковской обсерватории. Первоначальной целью систематических спектральных исследований было создание каталога лучевых скоростей звёзд ярче 4 зв. величины (около 200 звёзд, доступных 76-сантиметровому пулковскому рефрактору) с целью вывода скорости и координат апекса солнечного движения. Для этого Белопольский начал наблюдения опорных звёзд каталога ("звёзды со стандартными скоростями"). С 1901 г. по предложению Йеркской обсерватории он включился в международную программу наблюдения лучевых скоростей фундаментальных стандартных звёзд (участники: Пулково, Медон, Лик, Йеркс). Однако климатические условия Пулкова не благоприятствовали быстрому наблюдению звёзд каталога, поэтому наблюдения были проведены только для стандартных звёзд. В 1892 г. А. А. Белопольский определил скорости расширения оболочки Новой звезды в созвездии Возничего, ряд подобных измерений был выполнен затем для новых в созвездиях: Персея (1901 г.), Близнецов (1912 г.), Орла (1918 г.), Лебедя (1920 г.). В 1894 г. А. А. Белопольский открывает синхронную, но не совпадающую по фазе с изменением блеска переменность лучевой скорости звезды δ Цефея [5]. Период изменения лучевой скорости оказался совпадающим с периодом изменения блеска. Формы кривых изменения лучевой скорости и блеска также оказались похожими, однако фаза минимума лучевой скорости оказалась вблизи фазы максимума блеска. Первоначально данное изменение лучевой скорости цефеид было объяснено их двойственностью. Гипотеза о радиальной пульсации цефеид была впервые высказана в 1896 г. профессором Новороссийского (г. Одесса) университета Н. А. Умовым, который был одним из оппонентов во время защиты докторской диссертации А. А. Белопольским в Московском университете. С 1891 г. Белопольский занимался определением скоростей и периодов вращения планет. Если поставить щель спектрографа перпендикулярно экватору планеты (но не на центральном меридиане), то можно исследовать дифференциальное вращение планеты по широте (так было показано, что угловая скорость осевого вращения Юпитера изменяется с широтой). Если поставить щель вдоль экватора планеты, спектральные линии получат наклон (один край планеты к нам приближается, а другой – удаляется). Приложив этот метод к кольцам Сатурна, Белопольский показал [6], что участки кольца обращаются вокруг планеты по законам Кеплера, а значит, состоят из множества отдельных, не связанных между собой мелких частиц, как это предполагали, исходя из теоретических соображений, Д. Максвелл и С. В. Ковалевская. Одновременно и независимо соответствующие наблюдения Сатурна выполнил Килер [7].

В первые годы XX в. возможности измерения лучевых скоростей звезд с помощью эффекта Доплера были столь многообещающими, что все, кто имел доступ к большим телескопам, с энтузиазмом занимались этой работой. Э. Фрост, директор Йеркской обсерватории с 1905 года, часто говорил, что он предпочитает измерение лучевых скоростей любым другим видам научной работы.

Большие рефракторы последней четверти XIX века (в т. ч. и 76-см пулковский) имели объективы, хроматизм которых был исправлен только для визуальной области спектра, поэтому получение качественных спектров на синечувствительных фотопластинках являлось искусством. С 1908 года на протяжении почти 50 лет выполнялась интенсивная работа по определению лучевых скоростей звезд в обсерватории Маунт Вилсон, где призменные спектрографы устанавливались на рефлекторы. В этой связи следует отметить работы по определению лучевых скоростей значительного числа звезд: [8] – 100 звезд, [9] – 500 звезд, [10] – 1013 звезд, [11] – 741 звезда, [12] – 600 звезд, [13] – 181 звезда, [14] – 204 звезды в Гиадах, [15] – 2111 звезд, [16] – 360 звезд.

Работавшие в Симеизском отделении Пулковской обсерватории на 1-метровом рефлекторе с однопризменным спектрографом, В. А. Альбицкий и Г. А. Шайн получили в течение 1929–1931 годов около 2300 спектрограмм и по ним определили лучевые скорости 343 звезд [17]. В последующие годы Альбицким был составлен каталог лучевых скоростей 800 звезд. Альбицкий открыл звезду (HD 161817), обладающую одной из наибольших известных лучевых скоростей в Галактике – 360 км/с [18].

Ошибка определения лучевых скоростей при использовании призменных спектрографов с фотографической регистрацией составляла около 3–5 км/с.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД. ТОЧНОСТЬ 0.3–0.5 км/с

Качественное, на порядок, повышение точности определения лучевых скоростей звезд оказалось возможным только при переходе к кросс-корреляционным методам и при отказе от фотографической регистрации спектра, т. е. повышение точности измерения положений линий обеспечивалось за счет увеличения отношения сигнал/шум и внедрения систем счета фотонов. Эти меры привели к резкому увеличению проницающей способности позиционных измерений в спектроскопии.

При спектральном разрешении $R \sim 10\,000$ точность определения смещения спектральной линии в оптическом диапазоне составляет $\delta\Delta\lambda \sim \pm 0.5$ Å, при этом соответствующая ошибка определения лучевой скорости $\delta V_R \sim c \cdot \delta\Delta\lambda/\lambda \sim 3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-4}$ км/с ~ 30 км/с. Из общих соображений следует, что для уменьшения ошибки в N раз нужно измерить $\sim N^2$ линий. Таким образом, в приведенном нами примере, чтобы достичь точности $\pm\,0.5$ км/с, нужно измерить смещения $\sim$4000 линий.

Корреляционный фотоэлектрический метод измерения лучевых скоростей был предложен Фелжетом в 1955 г. [19]. Он состоит в следующем. Если в фокальную плоскость высокодисперсного спектрографа поместить физическую маску, отверстия в которой соответствуют определенным линиям в спектре звезды, то детектор, находящийся за маской, будет регистрировать поток от звезды как функцию сдвига оптических элементов, имитирующего доплеровский сдвиг. При совпадении линий спектра с отверстиями в маске будет зарегистрирован минимум потока, а соответствующий сдвиг маски и спектра позволит определить лучевую скорость. Таким образом, лучевая скорость определяется с помощью корреляционного профиля, отражающего суммарное воздействие избранных линий спектра после их прохождения через маску. Хотя информация, которую несет каждая отдельная линия, теряется, лучевая скорость измеряется значительно быстрее (чем по фотопластинке), измерению доступны более слабые звезды (или реализуется более высокая точность по относительно ярким звездам). Если единственной целью является измерение лучевой скорости, неэкономично наблюдать все детали звездного спектра. Гриффин [20] создал первый такой прибор и практически доказал высокую эффективность метода. Точность измерения лучевой скорости обратно пропорциональна корню квадратному из числа измеряемых линий. Поэтому для покрытия большого спектрального интервала (привлечения большого числа спектральных линий) используются эшельные спектрографы. Эшеле в совокупности с элементом скрещенной дисперсии (призмы, дифракционной решетки, или гризмы) "разворачивает" спектр в двумерную картинку, располагая спектральные порядки один под другим. Длина каждого порядка эшеле-спектра составляет от $\sim$200–300 Å до $\sim$20 Å, порядки располагаются с небольшим перекрытием по длине волны. Эти обстоятельства помогают легко собрать свет ото всех щелей и направить его на одноканальный приемник.

Появление эффективных корреляционных методов и создание на их основе спектрометров нового поколения на базе эшельных спектрографов (типа CORAVEL [21]) позволили получать массовые и однородные измерения с небывалой до той поры точностью 0.3–0.5 км/с. Были выполнены измерения лучевых скоростей у десятков тысяч звезд, что позволило изучать кинематику Галактики в широкой окрестности (см., например, работы [22–24]).

В 1984 г. в ГАИШ МГУ был сконструирован и создан корреляционный спектрометр типа CORAVEL на базе высокодисперсного (1–2 Å/мм) эшельного спектрографа, в фокальной плоскости которого помещена маска, воспроизводящая спектр α Boo (K1 III). Прибор был назван измерителем лучевых скоростей (ИЛС) [25]. Он предназначен для работы в кассегреновском фокусе средних рефлекторов. ИЛС работает в спектральном диапазоне F5–M5 для нормальных звезд главной последовательности. В середине спектрального диапазона с 1-м телескопом могут измеряться звезды до 12^mV, а в исключительных случаях – до 14^mV. Характерная экспозиция составляет 10 мин, но может доходить до 20–30 мин для слабых звезд или для звезд с низким контрастом линий. Точность измерений (по внешней сходимости) для ярких звезд составляет 0.3 км/с, при внутренних ошибках измерения $\sim$0.05–0.2 км/с. Рабочий диапазон измеряемых лучевых скоростей от –300 до +300 км/с.

С 1985 года начат статистический обзор близких K- и M-карликов для выявления их двойственности. Были сделаны многочисленные 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 [26]. В 1994 г. была начата программа измерений лучевых скоростей компонентов визуально-двойных и кратных звезд. К 2008 году было получено около 4700 измерений лучевых скоростей для 574 компонентов и определены 46 новых спектроскопических орбит [27]. Расторгуев и Самусь [28] 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 M 5. Сделана оценка расстояния до M 5 [29]. Глушкова и Расторгуев [30] определили лучевые скорости звезд в поле 18 рассеянных скоплений Галактики. Заболотских и др. [31] 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).

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ЦЕФЕИД

Отдельно остановимся на работах, посвященных исследованию цефеид с помощью кросс-корреляционных приборов в связи с уникальностью этих объектов для решения фундаментальных задач установления шкалы расстояний и возрастов. С 1988 г. московская группа ИНАСАН и ГАИШ МГУ начала систематические наблюдения этих переменных. Были 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 было получено к 2009 году около 11 000 измерений лучевых скоростей 171 звезды (около 72% от всего мирового массива опубликованных данных по цефеидам северного неба). При этом высокоточные кривые изменения лучевых скоростей 89 цефеид были получены впервые. Наблюдения лучевых скоростей цефеид 1986–1997 гг. опубликованы в трех каталогах [32–34]. Этот массив однородных и высокоточных измерений сейчас является самым обширным в мире.

Существенный вклад был сделан в исследование бимодальных цефеид. У таких цефеид в изменениях блеска и лучевой скорости одновременно наблюдаются две периодичности. В нашей Галактике известно всего 23 бимодальных цефеиды. Для уверенного разделения кривых лучевых скоростей на две моды пульсации требуется длительный ряд наблюдений (более 100). Имея раздельные кривые лучевых скоростей для каждого периода, были сделаны оценки их радиуса [35].

Особое внимание уделяется исследованию спектрально-двойных цефеид. 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. По оценкам разных авторов, доля спектрально-двойных звезд среди цефеид заключена между 20% и 50% или даже выше. Однако только на основании высокоточных, однородных и массовых измерений лучевых скоростей цефеид была выявлена или подтверждена спектральная двойственность 20 цефеид [36], что составляет около 22% всей выборки и является достаточно реалистичной оценкой частоты встречаемости спектрально-двойных среди цефеид.

В восьмидесятые-девяностые годы 20 века были предприняты многочисленные попытки определения пульсационных радиусов цефеид методом Бааде–Весселинка. Сачкову удалось построить зависимость период–радиус для самой большой однородной выборки (64 классических [37], 13 малоамплитудных [38] и 7 бимодальных цефеид [35]), что позволило уточнить моду пульсаций, поскольку вычисление радиуса не зависит от моды пульсаций. В частности, выяснилось, что выборка содержит как цефеиды, пульсирующие в первом обертоне, так и звезды, пульсирующие в основном тоне. Выяснилось, что различия в результатах применения метода статистических параллаксов к разным выборкам цефеид [39] частично вызваны "загрязнением" выборки короткопериодических цефеид пульсаторами первого обертона, ошибочно принятыми за пульсаторы основного тона.

Работа с приборами CORAVEL в настоящее время завершена. Прибор ИЛС продолжает эффективно использоваться для измерений лучевых скоростей звезд. Корреляционный фотоэлектрический метод позволил совершить прорыв в точности измерения лучевых скоростей и решить ряд важных научных задач. Но в то же время выявились и ограничения на его применение. Приборы работали в достаточно узком диапазоне спектральных типов звезд (в основном, F5–M5, исследовались некоторые гиганты спектральных классов F0–F4). Потенциально имелась возможность использовать сменные маски для различных спектральных классов, но ни на одной обсерватории в результате этот метод не получил применения, по-видимому, из-за сложности юстировки спектрографов. Кроме того, метод оказался неприменим для исследования химически пекулярных звезд и переменных звезд, у которых наблюдается сдвиг фаз между кривыми лучевых скоростей, полученными по линиям различных ионов. Сыграло свою роль и стремление исследователей все-таки не ограничиваться одним параметром (лучевой скоростью), а иметь в распоряжении весь спектр.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СДВИГИ ЛИНИЙ

В протяженных атмосферах звезд высокой светимости геометрическая глубина формирования разных линий существенно различается. Еще в середине XX века было обнаружено, что лучевые скорости горячих сверхгигантов, измеренные по различным линиям бальмеровской серии водорода, различаются и переменны во времени. Позже и для линий металлов и их ионов были обнаружены зависимости лучевой скорости от центральной глубины ядра линии [40]. Эти зависимости также изменяются со временем. Наличие дифференциальных сдвигов линий не позволяет применять кросс-корреляционные методы к изучению динамики атмосфер сверхгигантов. Соотношение нестационарного расширения атмосфер сверхгигантов и пульсаций околофотосферных слоев изучается классическими методами измерения индивидуальных линий, с последующей группировкой измерений по группам линий, формирующихся в определенных слоях атмосферы [41]. Такой подход позволил обнаружить одновременное присутствие в атмосферах восходящих и нисходящих потоков газа.

ПРИМЕНЕНИЕ ЙОДИСТОЙ ЯЧЕЙКИ. ТОЧНОСТЬ 25–50 м/с

Применение в спектроскопии панорамных приемников излучения (ПЗС-матриц) создало возможность "модернизировать" корреляционный фотоэлектрический метод измерения лучевых скоростей. Появилась возможность использования так называемой "цифровой" маски и повысило как точность измерения, так и предельную звездную величину и спектральный диапазон исследуемых звезд, хотя время получения одного наблюдения значительно увеличилось [42]. При этом в качестве маски используется либо спектр звезды с известной лучевой скоростью, полученный с тем же прибором (стандарт лучевых скоростей), либо синтетический спектр. Корреляционным методом определяют смещение линий спектра исследуемой звезды относительно маски, соответствующее искомой разности скоростей.

Еще в 1969 г. было показано [43], что зональные ошибки оптики спектрографа могут привести к сдвигу звездного спектра относительно спектра сравнения. Предположения, что на первый план выходят ошибки, обусловленные рассогласованием каналов опорного и исследуемого спектров, подтвердились после работы [44], где в качестве опорного спектра был использован теллурический спектр. Было показано, что устранение рассогласования каналов позволяет увеличить точность измерений лучевых скоростей на порядок. Метод фотографической регистрации теллурического спектра применим только к самым ярким звездам, т. к. при длинных экспозициях топоцентрическая скорость существенно изменяется (для звезды с небольшим склонением в течение четырехчасовой экспозиции вблизи меридиана это изменение достигает 350 м/с). Поэтому следующий шаг в использовании теллурического спектра был сделан с применением линейки фотодиодов [45], где при последовательной регистрации спектров с короткими экспозициями был получен разброс в ± 7 м/с. Основными преимуществами использования теллурического спектра является полная идентичность получения звездного и реперного спектров. К недостаткам можно отнести то обстоятельство, что интенсивность линий теллурического спектра зависит от воздушной массы и количества воды в атмосфере, а форма линий (и, следовательно, положение их центра тяжести) зависит от блендирования измеряемых линий слабыми линиями, причем степень блендирования меняется с воздушной массой. Со времен работы [46] основной мотивацией повышения точности измерения лучевых скоростей (лучше 0.1 км/с) являлась задача поиска экзопланет. Согласно представлениям того времени, минимальный период обращения планеты-гиганта вокруг звезды солнечного типа не должен превышать трех лет, поэтому высокую точность измерения и калибровки лучевой скорости необходимо было поддерживать в течение нескольких лет. Из этих соображений теллурический спектр в качестве опорного был непригоден, необходим был репер, стабильность которого может сохраняться длительное время. Преимущества йода в качестве рабочего газа для абсорбционной ячейки были известны давно: в диапазоне 5000–6000 Å имеется сильная электронная система полос молекулы I_2 с узкими вращательными линиями, смещения линий при изменении давления невелики [47]. Метод получил широкое распространение. Впервые йодная абсорбционная ячейка в астрофизике использована при спектроскопии Солнца [48, 49]. Затем была попытка использовать спектр йода в качестве классического спектра сравнения, расположенного рядом со спектром звезды [50], и, наконец, абсорбционная ячейка была установлена непосредственно в звездном канале [51]. Итак, к началу 90-х несколько групп исследователей, используя реперные спектры, регистрируемые на фоне звездных, добились точности измерения лучевых скоростей около 25 м/с при наблюдениях ярких звезд на больших телескопах. За 1 час на телескопе 4-метрового класса указанную точность можно было получить для звезд ярче 6^m.

ПРИМЕНЕНИЕ ЙОДИСТОЙ ЯЧЕЙКИ. ЭКЗОПЛАНЕТЫ. ТОЧНОСТЬ 1 м/с

В восьмидесятых годах прошлого века была совершена первая серьезная попытка поиска планет у одной из ближайших звезд – звезды Барнарда, обладающей самым большим собственным движением (более 10 сд в год) и являющейся второй по близости к нам после системы α Центавра. Она идеально подходила для поиска планет астрометрическим способом. Анализируя фотопластинки, сделанные с 1938 года по 1962 год, ван де Камп объявил о существовании планеты, в 1.6 раза тяжелее Юпитера с периодом обращения в 24 года. Затем, расширив диапазон изученных архивных фотоснимков до 1916 года, он заявил о двух планетах с массой порядка массы Юпитера [52]. Космический телескоп имени Хаббла провел очень точные (до 0.001 сд) астрометрические измерения звезды Барнарда, не выявив никаких колебаний. Тогда и стало ясно, что наземные и неспециализированные космические обсерватории не способны обнаружить этим способом планеты даже около ближайших звезд. М. Майор и Д. Келос на 1.93-метровом телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (Франция) со спектрографом ELODIE измерили лучевые скорости около сотни звезд до 8 звездной величины с точностью до 15 метров в секунду и обнаружили колебания лучевых скоростей с амплитудой около 60 м/с с периодом 4 дня у звезды 51 Peg (планета с минимальным расстоянием до звезды, "'горячий юпитер" [53]). Дж. Марси и П. Батлер из Ликской обсерватории подтвердили это открытие, обнаружив те же самые колебания в своих более точных (3–4 м/с) наблюдениях [54]. Спустя десятилетие было открыто уже около 120 газовых гигантов.

В 2004 году, используя новые спектрографы, удалось повысить точность измерения лучевых скоростей до 1 м/с, что позволило сразу открыть совершенно новый класс объектов – так называемые "горячие нептуны" (с массами порядка 15 масс Земли) с использованием спектрографа HARPS, установленного на 3.6-м телескопе в Ла-Силла [55] и телескопе Hobby-Eberly (HET) в обсерватории Мак-Дональд [56]. В настоящее время наилучшая заявленная точность определения лучевых скоростей составляет 0.9 м/с.

АСТРОСЕЙСМОЛОГИЯ

Астросейсмология – исследование внутреннего строения пульсирующих звезд путем анализа их частотного спектра – методически оказалась очень близка задаче поиска экзопланет. Для нее также необходимо получение рядов данных – измерений блеска или лучевых скоростей – с предельной точностью. Радиальные пульсации, при которых звезда периодически расширяется и сжимается с сохранением сферической симметрии – простейший тип пульсаций, возникающих в звездах. Внутри звезды есть движущиеся области. В один и тот же период времени некоторые из них движутся к центру звезды, а другие к ее поверхности. Границы между этими областями, представляющие собой концентрические поверхности, неподвижны. Количество таких поверхностей n называется радиальным волновым числом. Наиболее известные представители радиально пульсирующих звезд – цефеиды, красные гиганты и переменные типа RR Лиры. Вследствие монопериодичности (пульсации с одним периодом) подавляющее большинство таких звезд не используется для сейсмических исследований. Однако зависимость периода радиальной пульсации от средней плотности (период обратно пропорционален корню квадратному из средней плотности звезды) делает эти звезды важнейшими для определения расстояний во Вселенной и определения космологических постоянных. В отличие от радиально пульсирующих звезд наблюдательные проявления нерадиальных пульсаций – следствие периодических отклонений формы звезды от сферы. Поэтому вариации видимого блеска и лучевых скоростей, сопровождающие нерадиальные колебания, как правило, значительно менее заметны по сравнению с радиальными. Поэтому до начала 1970-х гг. единственным известным типом нерадиально пульсирующих переменных оставались звезды типа β Цефея. Лишь значительное повышение точности фотометрических и спектральных измерений позднее сделало возможным обнаружение большого числа нерадиально пульсирующих звезд в разных участках диаграммы Герцшпрунга–Рессела.

Теория акустических пульсаций предсказывает значение частоты пульсации звезды. При условии $\mathrm{n} \gg \mathrm{l}$ эту частоту описывает следующая формула (1):

$$\nu_{n,\,l} \sim \Delta\nu \times (n + 1/2 + \epsilon) + \delta\nu. \tag{1}$$

В приведенной формуле есть два важнейших параметра: $\Delta\nu$ – большой частотный интервал, который возникает между частотными максимумами колебаний с волновыми числами $(n,\, l)$ и $(n-1,\, l)$, и $\delta\nu$ – малый частотный интервал, который равняется разности частотных максимумов между колебаниями с волновыми числами $(n,\, l)$ и $(n-1,\, l+2)$. Большой частотный интервал зависит от средней плотности звезды, а малый определяется особенностями строения звездного ядра. Зная эти величины, можно определить массу звезды и, следовательно, возраст, так как состав ядра и его масса меняются по мере превращения водорода в гелий в результате ядерного горения. Таким образом, малый частотный интервал отражает эволюционный статус звезды. До настоящего времени уверенно определить обе величины (большой и малый частотные интервалы) удалось только для Солнца. Успехи гелиосейсмологии подвигли астрономов к поиску пульсаций, подобных тем, которые наблюдаются на Солнце, в звездах солнечного типа, а затем и в других звездах во всем диапазоне масс и светимостей. В результате родилась новая область звездной астрофизики – астросейсмология, бурно развивающаяся в последние десятилетия.

Традиционно астросейсмология была задачей для фотометрических исследований. Для решения задач астросейсмологии были запущены специализированные спутники (например MOST [57], COROT [58], KEPLER [59], успешно работающие сейчас на орбите). Однако, использование спектральных данных показало, что лучевые скорости дают существенно более значимые результаты при меньшем количестве данных. Например, наблюдения звезды α Cir с помощью спутника WIRE в течение 84 суток позволили лишь подтвердить известные до тех пор частоты и обнаружить одну дополнительную [60]. В то же время исследование звезды HD 101065 (звезда Пшибыльского) с помощью спектрографа HARPS в течение

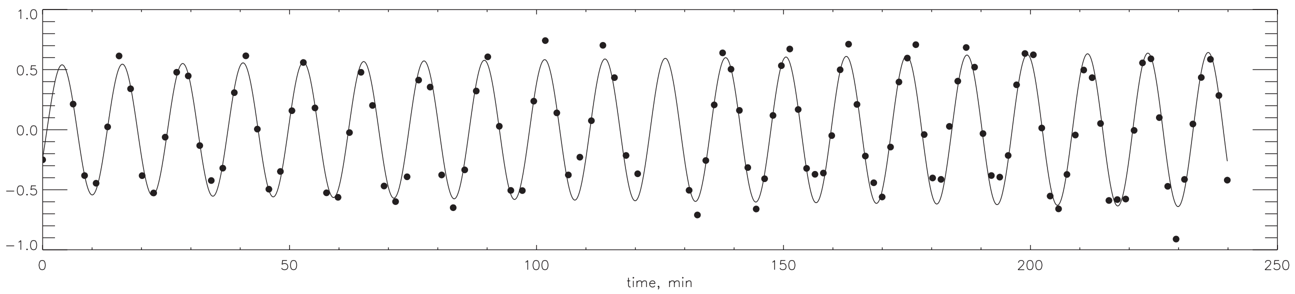

Рис. 1. Пульсационная кривая лучевых скоростей roAp звезды γ Equulei. Наблюдения со спектрографом НЭС, установленном на 6-м телескопе САО РАН. Измерения лучевых скоростей произведены по отдельной спектральной линии Nd III λ 4570 Å. Точность одного измерения $\pm$ 30 м/с

четырех ночей позволило определить два десятка новых частот с амплитудами до 1.6 м/с, которые не были обнаружены с использованием гораздо более длительных фотометрических рядов наблюдений [61].

В задачах астросейсмологии исследователи столкнулись с теми же ограничениями на использование наблюдений с йодистой ячейкой, что и ранее при использовании корреляционного фотоэлектрического метода. У некоторых звезд (в частности, у roAp – rapidly oscillating chemically peculiar A stars) была обнаружена пульсационная избирательность линий, при которой линии одинаковой интенсивности показывали разные амплитуды пульсаций, а некоторые не пульсировали совсем в зависимости от принадлежности к тому или иному элементу [62]. Кроме того, в этих звездах достаточно сильно проявляется так называемый эффект ван Хоффа – сдвиг фаз между кривыми лучевых скоростей линий различных элементов (см., например, работу [63]). Для исследования этих звезд применяется спектроскопия с высоким временным и спектральным разрешением и высоким отношением сигнал/шум ("спектральная астросейсмология"), что реализуемо только на крупнейших телескопах. Использование таких наблюдений позволяет исследовать вертикальную структуру атмосфер roAp-звезд [64–66]. Наблюдения на спектрографе НЭС [67] на БТА САО РАН позволяют определять лучевые скорости по индивидуальным линиям с точностью $\pm$ 30 м/с (рис. 1). Данные со спектрографа UVES, установленного на 8-м телескопе VLT ESO, позволяют достигать точности до нескольких м/с (рис. 2).

Обнаружение пульсаций в некоторых звездах стало возможным также только с помощью измерения лучевых скоростей с предельной точностью [68].

КАТАЛОГИ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ЗВЕЗД

На момент написания статьи (сентябрь 2009 г.) в базе данных CDS содержится более 730 каталогов с ключевыми словами "radial velocity". Основными являются:

- Архив ELODIE, $\sim$ 35 000 спектров с S/N>10 (http://atlas.obs-hp.fr/elodie/);
- Архив SOPHIE, > 30 000 спектров для 3000 звезд (http://www.obs-hp.fr/www/guide/sophie/data_products.html);
- Geneva–Kopenhagen Survey, > 14 000 звезд [69];
- Архив ИЛС (ГАИШ МГУ), $\sim$ 30 000 измерений для $\sim$ 10 000 звезд;
- Библиографический каталог лучевых скоростей Malaroda et al. [70], > 82 000 звезд;
- Pulkovo Compilation of Radial Velocities for 35 495 HIPPARCOS Stars in a Common System [71];
- Astrophysical supplements to the ASCC-2.5: Ia. Radial velocities of $\sim$ 55 000 stars [72].

Самыми крупными каталогами будут RAVE и SDSS.

RAVE: > 48 000 звезд в настоящее время, ожидается до 1 млн (http://www.rave-survey.aip.de/rave/). RAVE (the RAdial Velocity Experiment) – амбициозный проект измерения лучевых скоростей и химического состава 1 млн звезд, начиная с южного неба, на 1.2-м шмидтовском телескопе Англо-американской обсерватории (AAO) в течение 2003–2010 гг. Цели проекта: исследование кинематики Галактики и создание самой обширной базы данных по лучевым скоростям; подготовка к космическому проекту GAIA. Выборка будет включать $\sim$ 700 000 звезд диска Галактики, $\sim$ 250 000 звезд "толстого диска" Галактики, $\sim$ 100 000 звезд балджа и гало.

SDSS: Sloan Digital Sky Survey (http://www.sdss.org/). В проекте – более 150 участников из более чем 25 институтов. Основные задачи проекта: изучение крупномасштабной структуры Вселенной, изучение скоплений галактик, поиск и исследование квазаров, изучение свойств галактик и их спутников, поиск

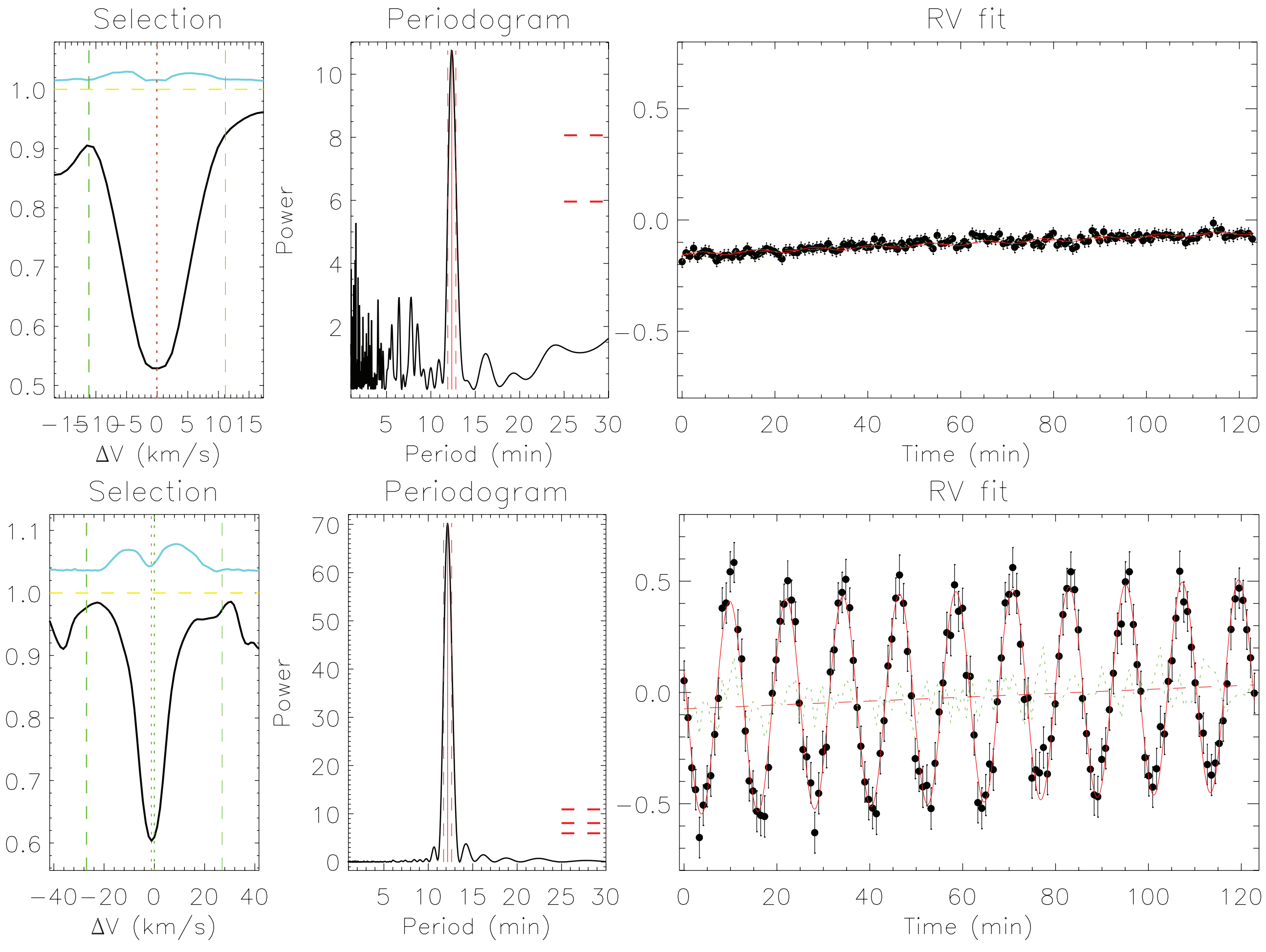

Рис. 2. Участок спектра с линией, по которой производится измерение лучевой скорости (*а*), спектр мощности (*б*) и пульсационная кривая лучевых скоростей (*в*) для линии железа Fe I λ 5615 Å (вверху) и линии Pr III λ 5300 Å (внизу). Наблюдательные данные спектрографа UVES, установленного на 8-м телескопе VLT ESO, для roAp-звезды γ Equulei. Точность определения амплитуды пульсации для линии Fe I λ 5615 Å – 9 ± 2 м/с, для линии Pr III λ 5300 Å – 460 ± 7 м/с. Штриховая линия в спектре мощности отмечает уровень сигнала 1σ, 2σ, 3σ

сверхновых, поиск новых звездных скоплений и карликовых галактик. Наблюдения проводятся с 2.5-м телескопом в Apache Point, NM (США) с двумя оптоволоконными эшельными спектрографами со спектральным разрешением $\sim$ 1850–2200 ($\pm$ 10 км/с). В настоящее время (Data Release 7) получено около 1 500 000 спектров, из них $\sim$ 930 000 спектров галактик, $>$ 120 000 квазаров, $\sim$ 460 000 спектров звезд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день приблизительно 350 000 звезд имеют спектральную классификацию. Разумеется, количество полученных спектров меньше этого числа, а количество спектров не равно количеству измеренных лучевых скоростей. В настоящее время наилучшая заявленная точность определения лучевых скоростей составляет 0.9 м/с. Как утверждают исследователи экзопланет, потенциал использования лучевых скоростей в смысле увеличения точности исчерпан. Следует отметить, что во всех случаях, когда сообщается о точных (метры в секунду) измерениях лучевых скоростей, речь идет об относительных измерениях, как правило, об изменении скорости относительно средней величины (амплитуда скоростей). Остается открытым вопрос об абсолютных скоростях. Точность их определения, по-видимому, не превышает 0.3 км/с.

Информативность спектров звезд возрастает по мере продвижения в область наземного и внеатмосферного ультрафиолета. Реализация в ближайшем будущем проекта “Спектр-УФ” (Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет) [73, 74] позволит проводить интенсивные спектральные исследования звезд в УФ-области, что существенно увеличит наши возможности в том числе и при определении их высокоточных лучевых скоростей.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 09-07-00492-а.

[1] *Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Юшкин М. В., Насонов Д. С.* Измерения лучевых скоростей на звездных спектрографах БТА // Астрофиз. бюлл. – 2008. – **63**. – С. 410–418.

[2] *Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Сачков М. Е., Юшкин М. В.* Техника определений лучевых скоростей звезд // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – 2009. – № 6. – С. 391–395. (настоящий выпуск).

[3] *Vogel H. C.* List of the proper motions in the line of sight of fifty-one stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Observ. – 1892. – **52.** – P. 541–543.

[4] *Pickering E. C.* Henry Draper Memorial. Third Annual Report, University Press, Cambridge, 1889. – P. 5.

[5] *Belopolsky A.* Das Spectrum von deltha Cephei // Astronomische Nachrichten. – 1894. – **136**. – P. 281–284.

[6] *Белопольский А. А.* // Изв. Акад. наук. – 1895. – **3**. – С. 379.

[7] *Keeler J. E.* A Spectroscopic Proof of the Meteoric Constitution of Saturn’s Rings // Astrophys. J. – 1895. – **1**. – P. 416–427.

[8] *Adams W. S., Kohlschutter A.* The radial velocities of one hundred stars with measured parallaxes // Astrophys. J. – 1914. – **39**. – P. 341–349.

[9] *Adams W. S.* The radial velocities of five hundred stars // Astrophys. J. – 1915. – **42**. – P. 172–194.

[10] *Adams W. S., Joy A. H.* The radial velocities of 1013 stars // Astrophys. J. – 1923. – **57**. – P. 149–176.

[11] *Adams W. S., Joy A. H., Sanford R. F., Stroemberg G.* The radial velocities of 741 stars // Astrophys. J. – 1929. – **70**. – P. 207–236.

[12] *Christie W. H., Wilson O. C.* The Radial Velocities of 600 Stars and Measures of 69 Spectroscopic Binaries // Astrophys. J. – 1938. – **88**. – P. 34–51.

[13] *Joy A. H.* Radial Velocities and Spectral Types of 181 Dwarf Stars // Astrophys. J. – 1947. – **105**. – P. 96–104.

[14] *Wilson R. E.* Radial Velocities of 204 Stars in the Region of the Hyades // Astrophys. J. – 1948. – **107**. – P. 119–125.

[15] *Wilson R. E., Joy A. H.* Radial Velocities of 2111 Stars // Astrophys. J. – 1950. – **111**. – P. 221–261.

[16] *Wilson R. E., Joy A. H.* Radial Velocities of 360 Stars // Astrophys. J. – 1952. – **115**. – P. 157–165.

[17] *Shajn G., Albitzky V.* The Radial Velocities of 343 Stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1932. – **92**. – P. 771–779.

[18] *Albitzky V. A.* Radial velocities of 107 B8–A0 stars // Publ. of the Crimean Astrophys. Observ. – 1947. – **1**, part 1. – P. 23–42.

[19] *Fellgett P. B.* A Proposal for a Radial Velocity Photometer // Optica Acta – 1955. – **2**. – P. 9–16.

[20] *Griffin R. F.* A Photoelectric Radial-Velocity Spectrometer // Astrophys. J. – 1967. – **148**. – P. 465–476.

[21] *Baranne A., Mayor M., Poncet J. L.* CORAVEL – A new tool for radial velocity measurements // Vistas in Astronomy. – 1979. – **23**. – P. 279–316.

[22] *Andersen J., et al.* Radial velocities of southern stars obtained with the photoelectric scanner CORAVEL. III. 790 late-type bright stars // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1985. – **59**. – P. 15–36.

[23] *Gomez A. E., Grenier S., Udry S., et al.* Kinematics of Disk Stars in the Solar Neighbourhood // ESA SP. – 1997. – **402**. – P. 621–624.

[24] *Mermilliod J. C., Mayor M., Udry S.* Red giants in open clusters. XIV. Mean radial velocities for 1309 stars and 166 open clusters // Astron. and Astrophys. – 2008. – **485**. – P. 303–314.

[25] *Токовинин А. А.* Измеритель лучевых скоростей звезд // Астрон. журн. – 1987. – **64**. – С. 196–202.

[26] *Pourbaix D., Tokovinin A. A., Batten A. H., et al.* SB9: The ninth catalogue of spectroscopic binary orbits // Astron. and Astrophys. – 2004. – **424**. – P. 727–732.

[27] *Tokovinin A. A., Smekhov M. G.* Statistics of spectroscopic sub-systems in visual multiple stars // Astron. and Astrophys. – 2002. – **382**. – P. 118–123.

[28] *Расторгуев А. С., Самусь Н. Н.* Дисперсия скоростей и масса шаровых скоплений M4, M5, M10, M12 и M71 // Письма в Астрон. журн. – 1991. – **17**. – С. 915–931.

[29] *Sachkov M. E., Rastorguev A. S.* Radial Velocity Observations and Radius Determination of Pulsating Stars in Globular Cluster M5 // ASP Conf. Ser. – 2003. – **296**. – P. 309–310.

[30] *Глушкова Е. В., Расторгуев А. С.* Лучевые скорости звезд в рассеянных скоплениях // Письма в Астрон. журн. – 1991. – **17**. – С. 30–42.

[31] *Zabolotskikh M. V., Rastorguev A. S., Dambis A. K.* Kinematic Parameters of Young Subsystems and the Galactic Rotation Curve // Astron. Lett. – 2002. – **28**. – P. 454–464.

[32] *Горыня Н. А., Ирсмамбетова Т. Р., Расторгуев А. С., Самусь Н. Н.* Каталог лучевых скоростей северных цефеид, измеренных с помощью корреляционного спектрометра // Письма в Астрон. журн. – 1992. – **18**. – С. 777–801.

[33] *Gorynya N. A., Samus N. N., Rastorguev A. S., Sachkov M. E.* A Catalog of Cepheid radial velocities measured in 1992–1995 with a Correlation Spectrometer // Astron. Lett. – 1996. – **22**. – P. 175–206.

[34] *Gorynya N. A., Samus N. N., Sachkov M. E., et al.* A Catalog of Cepheid radial velocities measured in 1995–1998 with the Correlation Spectrometer // Astron. Lett. – 1998. – **24**. – P. 815–818.

[35] *Sachkov M. E.* Radial velocity curves and first calculations of the radii for four double-mode Cepheids // Inf. Bull. Var. Stars. – 1997. – N 4484. – P. 1–4.

[36] *Gorynya N. A., Rastorguev A. S., Samus N. N.* Mean radial velocities and binarity of cepheids from the 1987–1995 measurements // Astron. Lett. – 1996. – **22**. – P. 33–38.

[37] *Sachkov M. E.* Two Period-Radius Relations for Classical Cepheids: Determining the Pulsation Mode and the Distance Scale // Astron. Lett. – 2002. – **28**. – P. 589–593.

[38] *Sachkov M. E.* Radii of low-amplitude Cepheids and their pulsation mode // Inf. Bull. Var. Stars. – 1997. – N 4522. – P. 1–4.

[39] *Rastorguev A. S., Glushkova E. V., Dambis A. K., Zabolotskikh M. V.* Statistical parallaxes and kinematical parameters of classical Cepheids and young star clusters // Astron. Lett. – 1999. – **25**. – P. 595–607.

[40] *Chentsov Ye. L.* Unstable wind of 6 Cassiopeiae // Astrophys. and Space Sci. – 1995. – **232**. – P. 217–232.

[41] *Klochkova V. G., Chentsov Ye. L.* Kinematic structure of the atmosphere and envelope of the post-AGB star HD 56126 // Astron. Rep. – 2007. – **51**. – P. 994–1003.

[42] *Latham D. W.* Digital Stellar Speedometry // Stellar Radial Velocities: Proc. IAU Coll. N 88, held in Schenectady, N.Y., October 24–27, 1984 / Eds A. G. D. Philip and D. W. Latham. – Schenectady: L. Davis Press, 1985. – P. 5–20.

[43] *Tull R. G.* Wavelength errors in spectrographs. I. The effect of surface irregularities in camera mirrors // Appl. Opt. – 1969. – **8**. – P. 1635–1638.

[44] *Griffin R.* On the possibility of determining stellar radial velocities to 0.01 km/s // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1973. – **162**. – P. 243–253.

[45] *Smith M. A.* Precise radial velocities. I. A preliminary search for oscillations in Arcturus // Astrophys. J. – 1982. – **253**. – P. 727–734.

[46] *Serkowski K.* Feasibility of a search for planets around solar-type stars with a polarimetric radial velocity meter // Icarus. – 1976. – **27**. – P. 13–24.

[47] *Schweitzer W. G., Kessler E. G., Deslattes R. D., et al.* Description, performance, and wavelengths of iodine stabilized lasers // Appl. Opt. – 1973. – **12**. – P. 2927–2938.

[48] *Beckers J. M.* Material motions in sunspot umbrae // Astrophys. J. – 1977. – **213**. – P. 900–905.

[49] *Koch A., Woehl H.* The use of molecular iodine absorption lines as wavelength references for solar Doppler shift measurements // Astron. and Astrophys. – 1984. – **134**. – P. 134–138.

[50] *Libbrecht K. G.* Radial velocity observations reveal multimode oscillations in Gamma Equulei // Astrophys. J. – 1988. – **330**. – P. L51–L53.

[51] *Marcy G. W., Butler R. P.* Precision Radial Velocities with an Iodine Absorption Cell // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1992. – **104**. – P. 270–277.

[52] *van de Kamp P.* The planetary system of Barnard's star // Vistas in Astronomy. – 1982. – **26**. – P. 141–157.

[53] *Mayor M., Queloz D.* A Jupiter-mass companion to a solar-type star // Nature. – 1995. – **378**. – P. 355–359.

[54] *Marcy G. W., Butler R. P.* The Planet around 51 Pegasi // Bull. Amer. Astron. Soc. – 1995. – **27**. – P. 1379.

[55] *Santos N. C., Bouchy F., Mayor M., et al.* The HARPS survey for southern extra-solar planets. II. A 14 Earth-masses exoplanet around μ Arae // Astron. and Astrophys. – 2004. – **426**. – P. L19–L23.

[56] *McArthur B. E., Endl M., Cochran W. D., et al.* Detection of a Neptune-Mass Planet in the ρ^1 Cancri System Using the Hobby-Eberly Telescope // Astrophys. J. – 2004. – **614**. – P. L81–L84.

[57] *Matthews J., Kuschnig R., Walker G., et al.* The MOST space mission: a 15-cm telescope in the 8-m-class era // J. R. Astron. Soc. Can. – 1999. – **93**. – P. 183–184.

[58] *Costes V., Bodin P., Levacher P., Auvergne M.* COROT mission: accurate stellar photometry // ESA SP-554 – 2004. – P. 281–284.

[59] *Christensen-Dalsgaard J., Arentoft T., Brown T. M., et al.* The Kepler mission // Comm. Asteros. – 2009. – **158**. – P. 328–329.

[60] *Bruntt H., Kurtz D. W., Cunha M. S., et al.* Asteroseismic analysis of the roAp star α Circini: 84 d of high-precision photometry from the WIRE satellite // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2009. – **396**. – P. 1189–1201.

[61] *Mkrtichian D. E., Hatzes A. P., Saio H., Shobbrook R. R.* The detection of the rich p-mode spectrum and asteroseismology of Przybylski's star // Astron. and Astrophys. – 2008. – **490**. – P. 1109–1120.

[62] *Savanov I. S., Malanushenko V. P., Ryabchikova T. A.* Radial-velocity variations in pulsating Ap stars: Pr III and Nd III lines in the spectrum of gamma Equ // Astron. Lett. – 1999. – **25**. – P. 802–808.

[63] *Sachkov M., Ryabchikova T.* Pulsations in the atmospheres of Ap stars // Memorie della Societa Astron. Ital. Sup. – 2005. – **7**. – P. 93–98.

[64] *Sachkov M., Ryabchikova T., Kochukhov O., Lyashko D.* Vertical structure of the roAp stars atmospheres // Comm. Asteros. – 2007. – **150**. – P. 81–82.

[65] *Ryabchikova T., Sachkov M., Kochukhov O., Lyashko D.* Pulsation tomography of rapidly oscillating Ap stars. Resolving the third dimension in peculiar pulsating stellar atmospheres // Astron. and Astrophys. – 2007. – **473**. – P. 907–922.

[66] *Sachkov M., Kochukhov O., Ryabchikova T., et al.* Pulsations in the atmosphere of the rapidly oscillating Ap star 10 Aquilae // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2008. – **389**. – P. 903–918.

[67] *Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Найденов И. Д.* // Препринт № 135, Нижний Архыз, САО РАН, 1999.

[68] *Kurtz D. W., Elkin V. G., Cunha M. S., et al.* The discovery of 8.0-min radial velocity variations in the strongly magnetic cool Ap star HD 154708, a new roAp star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2006. – **372**. – P. 286–292.

[69] *Nordström B., Mayor M., Andersen J., et al.* The Geneva–Copenhagen survey of the Solar neighbourhood. Ages, metallicities, and kinematic properties of 14 000 F and G dwarfs // Astron. and Astrophys. – 2004. – **418**. – P. 989–1019.

[70] *Malaroda S., Levato H., Galliani S.* Stellar radial velocities bibliographic catalog // VizieR On-line Data Catalog: III/249. – 2006.

[71] *Goncharov G. A.* Radial velocities of 35495 HIPPARCOS stars in a common system // Astron. and Astrophys. Transactions. – 2006. – **25**. – P. 145–148.

[72] *Kharchenko N. V., Scholz R. D., Piskunov A. E., et al.* Astrophysical supplements to the ASCC-2.5: Ia. Radial velocities of $\sim$55 000 stars and mean radial velocities of 516 Galactic open clusters and associations // Astron. Nachr. – 2007. – **328**. – P. 889–897.

[73] *Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A. I., et al.* WSO-UV – ultraviolet mission for the next decade // Astrophys. and Space Sci. – 2009. – **320**. – P. 187–190.

[74] *Sachkov M.* World Space Observatory-Ultraviolet: International Mission for UV Spectroscopy and Imaging // AIP Conf. Proc. – 2007. – **938**. – P. 148–155.