

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ А-ЗВЁЗД

© 2014 М. Е. Сачков

Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 17 декабря 2013 года; принята в печать 24 декабря 2013 года

Быстроосциллирующие химически пекулярные звезды спектрального класса А (rapidly oscillating Ap-stars, roAp) пульсируют в высоких обертонах нерадиальных p -мод и являются одновременно подгруппой магнитных химически пекулярных Ap-звезд. До недавнего времени классические астросейсмологические исследования этих звезд, т.е. анализ частот пульсаций, основывались на фотометрических наблюдениях, получаемых на наземных телескопах и на инструментах космического базирования. Значительный прогресс был достигнут с помощью спутников COROT, Kepler, MOST, позволивших получить непрерывные длительные ряды наблюдений высокой точности. В последнее десятилетие в исследованиях roAp-звезд был достигнут настоящий прорыв, т.к. были получены спектральные наблюдения с высоким временным и спектральным разрешением. Необычные пульсационные характеристики этих звезд, вызванные взаимодействием между распространяющимися в звездной атмосфере пульсационными волнами и сильной стратификацией химических элементов в этой атмосфере позволили исследовать структуру верхних слоев атмосфер roAp-звезд более детально, чем это возможно для любых других звезд. В данной статье рассмотрены результаты наблюдательных исследований пульсаций этих звезд, проведенных за последние годы.

Ключевые слова: *звезды: химически пекулярные—звезды: осцилляции*

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные химически пекулярные Ap-звезды находятся в верхней части главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рассела. Эти звезды отличаются от обычных А- и В-звезд значительно увеличенным атмосферным содержанием таких химических элементов, как Si, Cr, Sr, Eu, и наличием сильного упорядоченного магнитного поля. В этих звездах, как правило, наблюдаются существенные изменения блеска, магнитного поля и профиля спектральных линий с периодами от нескольких дней до нескольких десятков лет. Такие изменения получили объяснение в модели *наклонного ротатора*: ось вращения и ось магнитного поля не совпадают. Линии редкоземельных элементов (REE) в спектрах нормальных А-звезд при солнечном содержании этих элементов очень слабы, а линии вторых ионов не наблюдаются вообще. Чтобы сформировать, например, линию Nd III такой глубины, как в звезде γ Eri, его содержание в атмосфере звезды должно быть на несколько порядков выше, чем в солнечной атмосфере. Это относится и к другим редкоземельным элементам. Детальный анализ спектров Ap-звезд показал, что наблюдаемые особенности спектральных линий успешно описываются только в рамках

стратификационной модели. Как правило, элементы группы железа, Ca, Cr, Fe, а также Si и Ba, концентрируются в более глубоких слоях атмосферы со скачкообразным уменьшением концентрации в верхние слои [1]. Для описания наблюдаемых профилей и интенсивностей линий REE в первой и второй стадиях ионизации приходится, наоборот, допускать, что эти элементы сконцентрированы в тонком верхнем слое атмосферы [2]. Стратификация химических элементов предсказана теорией диффузии [3].

Быстроосциллирующие химически пекулярные звезды спектрального класса А (rapidly oscillating Ap-stars, roAp) являются “пекулярной” подгруппой этой “пекулярной” группы звезд. Самые холодные Ap-звезды попадают в классическую полосу неустойчивости, где расположено подавляющее большинство классических пульсирующих звезд (звезды типа δ Щита, RR Лиры, цефеиды и др.), которые пульсируют в низких обертонах радиальных и нерадиальных мод. Основным источником возбуждения этих колебаний является скачок поглощения в зоне ионизации He II (κ -механизм). Ap-звезды обеднены гелием, и в этом случае пульсаций не должно быть, поскольку гелий почти полностью отсутствует в зоне ионизации He II. Тем не менее, Куртц в 1978 г. [4] обнаружил перемен-

ность блеска звезды Пшибыльского (HD 101065) с периодом 12.15 минут. Это открытие дало начало новому классу пульсирующих звезд, получивших название гоАр (rapidly oscillating chemically peculiar A-stars). Звезды гоАр являются холодными ($T_{\text{eff}} \sim 6400-8500$ К) звездами, пульсирующими с периодами в интервале 5.7–23.6 минут в модах с большим радиальным числом $n \sim 30$. Периоды пульсаций гоАр сравнимы с периодами пульсаций звезд солнечного типа, но амплитуды значительно выше. Типичные амплитуды изменений блеска при пульсациях составляют 0.5–15 тысячных звездной величины, амплитуды изменений лучевых скоростей порядка 0.05–5 км с⁻¹. Большинство звезд мультипериодичны, что делает их одними из важнейших объектов для астросейсмологических исследований. Диапазон поверхностных магнитных полей очень велик, 1–25 кГс. В настоящее время известно 45 холодных пульсирующих Ар-звезд, большинство из них расположены на южном небе. Пульсирующие и неппульсирующие Ар-звезды (гоАр/поАр) сосуществуют в пространстве параметров: фотометрическом, кинематическом, содержания химических элементов и магнитных полей [5]. Для ряда звезд с хорошо известными периодами вращения и кривыми изменения магнитного поля была получена вращательная модуляция амплитуды колебаний, при этом максимум амплитуды совпадает с максимумом магнитного поля. Для объяснения наблюдений была предложена модель наклонного пульсатора, в которой ось пульсаций совпадает не с осью вращения, как у классических пульсаторов, а с осью магнитного поля, которая наклонена к оси вращения звезды под определенным углом.

2. ПОИСК НОВЫХ гоАр-ЗВЁЗД

I. Кейптаунский обзор (Cape survey). До 1990 г. было обнаружено только 14 гоАр с момента их первого обнаружения в 1978 г. Для увеличения числа известных гоАр-звезд, для применения методов астросейсмологии к этим новым гоАр-звездам, для определения связи гоАр-звезд с другими пульсирующими звездами были начаты систематические наблюдения в южном полушарии в Южноафриканской астрофизической обсерватории (SAAO) [6]. Поиск пульсаций проводился высокоскоростной фотометрией у звезд-кандидатов в гоАр, которые были выбраны на основе близости Стрёмгеновских фотометрических параметров $b-y$, m_1 , c_1 и β с параметрами известных гоАр-звезд. Наблюдения проводились с помощью фотометра университета Кейптауна (the University of Cape Town Photometer) на 1-м телескопе SAAO. В результате этого обзора количество известных гоАр-звезд увеличилось в два раза. Кейптаунский

обзор является самым успешным обзором феномена гоАр-звезд до настоящего времени.

II. Обзор Наинитал–Кейптаун (Nainital–Cape survey). Новый обзор для поиска пульсирующих химически пекулярных звезд в северном полушарии небесной сферы был инициирован на 1-м телескопе обсерватории Наинитала, Индия (Uttar Pradesh State Observatory). Были обнаружены пульсации у звезды HD 12098 [7]. На основе данных, полученных в 1999–2008 гг. было опубликовано два каталога звезд, пульсаций в которых найдено не было [8, 9].

III. Обзор университета Загреба (The Hvar survey). Предполагая, что преимущественное расположение известных гоАр-звезд на южном небе объясняется эффектами селекции, после неудач обзора Nainital–Cape по поиску пульсаций у химически пекулярных А-звезд, в университете Загреба (Hvar Observatory) были начаты новые поисковые наблюдения с помощью 1-м телескопа. Все крупные обзоры Ар-звезд, проведенные с помощью наземных телескопов, проводились с применением фотоумножителей. Использование многоканальных фотоумножителей позволяет проводить фотометрические измерения одновременно у исследуемой звезды и звезды сравнения. Однако, абсолютное большинство наблюдений по поиску пульсаций у Ар-звезд проводилось без одновременных наблюдений звезд сравнения [8]. Отчасти это объяснялось отсутствием подходящих звезд в программе наблюдений относительно ярких кандидатов в гоАр, отчасти потому, что временная шкала переменности гоАр короче шкалы переменности атмосферного пропускания при необходимых фотометрических условиях наблюдений. Новый обзор основан на ПЗС-наблюдениях в малом поле зрения. Было выбрано 20 звезд-кандидатов в гоАр в диапазоне блеска $8^{\text{m}9} \leq V \leq 11^{\text{m}6}$. Предел обнаружения амплитуды пульсаций составлял менее $0^{\text{m}002}$ в полосе В (Bessell). Пульсации у исследованных 20 звезд обнаружены не были, но для последующих интенсивных наблюдений предложена звезда Renson 58777 [10].

IV. Обзор космического телескопа Kepler (Kepler survey). В поле зрения космической миссии Kepler первоначально не было известно ни одной пульсирующей Ар-звезды, хотя несколько Ар-звезд попали в число исследуемых объектов. Предполагалось, что с помощью миссии Kepler, которая способна измерять переменность блеска с амплитудами гораздо меньшими, чем это доступно наземным телескопам, будет решена проблема сосуществования гоАр/поАр-звезд. К настоящему времени по наблюдательным данным миссии Kepler обнаружено три новых гоАр-звезды, две из

которых (за исключением КIC 10195926) по результатам исследований с наземными телескопами классифицировались как поАр [11].

V. Спектральные обзоры. Спектральные наблюдения высокого разрешения с крупнейшими телескопами позволяют проводить исследования переменности профилей спектральных линий с высоким временным разрешением. Изменения лучевых скоростей гоАр-звезд вследствие пульсаций более значимы, чем изменения блеска. Поэтому обнаружение пульсаций в Ар-звездах возможно проводить по спектральным наблюдениям [12]. К настоящему времени спектральными методами были обнаружены пульсации у одиннадцати Ар-звезд, у которых изменения блеска обнаружить не удалось [13].

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИЧЕСКОЙ АСТРОСЕЙСМОЛОГИИ

Частотный анализ является основой классической астросейсмологии. Интерпретация набора частот пульсаций дает детальную информацию о внутреннем строении, что позволяет проверять и улучшать теоретические модели. Эволюционный статус звезды и, следовательно, ее возраст может быть получен сравнением моделей с наблюдениями. Такого рода исследования и составляют основу астросейсмологии. Согласно асимптотической теории акустических пульсаций (p -моды для радиального волнового числа, характеризующего количество концентрических поверхностей, являющихся границами между областями внутри звезды, движущимися к центру звезды и ее поверхности $n \gg l$), в адиабатическом приближении для сферически симметричной звезды пульсационные частоты представляются выражением:

$$\nu_{n,l} = \Delta\nu(n + l/2 + \epsilon) + \delta\nu,$$

где $\Delta\nu$ — “большой частотный интервал,” время распространения звуковой волны в звезде, которое определяется средней плотностью и радиусом звезды; $\delta\nu$ — “малый частотный интервал,” зависящий от возраста звезды и чувствительный к массе центрального ядра (массовая доля водорода в ядре); ϵ — постоянная, зависящая от особенностей поверхности звезды.

Одной из основных проблем при исследовании переменных звезд наземными средствами является наличие сопряженных периодов (алиасов) в частотном спектре, вызванное перерывами в наблюдениях днем. В случае гоАр-звезд в частотном спектре наблюдается также вращательное расщепление частот: вместе с частотой, которая наблюдалась бы в невращающейся звезде, появляются еще две. Зная эти частоты, можно определить и

величину скорости вращения звезды. Кроме того, наблюдается модуляция амплитуды, вызываемая биениями близких частот.

Для определения частот с требуемой точностью и для решения проблемы сопряженных периодов необходимо проводить наблюдения гоАр-звезд (квази)непрерывно в течение нескольких дней или недель. Это возможно при организации мониторинга звезд несколькими наземными телескопами, распределенными по долготе, или при проведении наблюдений космическими средствами.

I. Всепланетный телескоп (Whole Earth Telescope). В 2000 г. была организована компания по проведению наблюдений гоАр-звезды HR 1217A в течение 342 часов в полосе В Джонсона в течение 35 дней. С помощью этих наблюдений была достигнута точность определения частот пульсаций 14 миллионов звездной величины, рекордная точность для наземных наблюдений [14].

II. Исследования гоАр-звезд с помощью космического аппарата WIRE. Детальные исследования пульсаций самой яркой гоАр-звезды α Circini были предприняты с помощью звездных датчиков спутника WIRE [15]. Был получен сет наблюдений продолжительностью 84 суток. Были обнаружены две новые моды пульсаций, расположенные симметрично с двух сторон основной частоты. Вращательная модуляция позволила впервые непосредственно определить период вращения, ранее известный из косвенных оценок.

III. Фотометрические наблюдения гоАр-звезд с помощью спутника MOST. Канадский космический телескоп MOST является лидером в астросейсмологических исследованиях гоАр-звезд. Были получены уникальные наблюдательные ряды продолжительностью от трех до четырех недель для звезд HR 1217, γ Equ, 10 Aql, HD 134214, HD 99563. Мониторинг гоАр-звезд HD 9289, HD 99563 и HD 134214 продолжительностью более 25 суток для каждой звезды позволил обнаружить новые частоты пульсаций с точностью определения амплитуды приблизительно 1.0 сотысячная звездной величины [16].

IV. Фотометрические наблюдения гоАр-звезд с помощью спутника Kepler. Миссия Kepler позволила определить малые изменения блеска с амплитудами менее нескольких миллионов звездной величины даже для слабых звезд. Хотя до запуска миссии в 2009 г. в исследуемом поле зрения не было ни одной гоАр-звезды, было открыто три новых гоАр-звезды. Третья открытая по данным миссии Kepler гоАр-звезда KIC 10195926 имеет не встречающуюся ранее особенность. По-видимому, в этой звезде во время цикла вращения видны оба пульсационных полюса. Кроме того, во-видимому, две моды пульсации,

обнаруженные в данной звезде, имеют различные оси пульсации [17].

4. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Первые детальные интерферометрические исследования гоАр-звезд были проведены с помощью звездного интерферометра университета Сиднея (Австралия). Был определен угловой диаметр звезды α Cig. Используя новые данные о параллаксах проекта Hipparcos, был определен линейный радиус звезды $R = 1.967 \pm 0.066 R_{\odot}$ [18].

5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В период 1982–1998 гг. были проведены отдельные исследования лучевых скоростей (RV) гоАр-звезд. С помощью 5-м телескопа Паломарской обсерватории были получены пульсационные лучевые скорости звезды γ Eri и определена амплитуда ее пульсации 0.021 км с^{-1} [19]. С помощью телескопа CFHT была определена амплитуда пульсации RV звезды HR 1217, равная 0.2 км с^{-1} [20].

Спустя десятилетие было обнаружено, что лучевые скорости в звезде γ Eri, полученные по линиям различных участков спектра, различаются от 0.1 км с^{-1} до 1.0 км с^{-1} [21].

В 1994 г. был определен верхний предел амплитуды пульсации RV 0.06 км с^{-1} для звезды α Cig. Измерения проводились методом йодной ячейки по участкам спектра шириной 45 \AA [22]. Однако, при измерениях RV с использованием участков спектра шириной 10 \AA для той же звезды амплитуда пульсации RV достигала 1 км с^{-1} [23]. Измерения лучевых скоростей методом бисекторов в линии $\text{H}\alpha$ [24] показали, что амплитуда и фаза изменения RV зависят от того, на какой глубине в линии определялись скорости, включая “скачок” фаз между ядром и крыльями линии. Была выдвинута гипотеза о наблюдаемом радиальном ноде в атмосфере звезды.

В статье Маланушенко и др. [25] было показано, что максимальные амплитуды RV (до 1 км с^{-1}) в звезде γ Eri получаются по измерениям линий редкоземельных элементов, в частности Pr III и Nd III, в то время как линии Ba II и Fe II не показывают заметных изменений RV. В 2001 г. Кочухов и Рябчикова [26] представили результаты спектрального мониторинга гоАр-звезды γ Eri, проведенного с помощью 3.6-м телескопа ESO: избирательное пульсационное поведение линий всех ионов является результатом комплексного взаимодействия между неравномерным вертикальным и поверхностным распределением химических элементов.

Эффект ван Хоффа [27] — различие фаз кривых лучевых скоростей, полученных по линиям различных элементов и ионов — один из наиболее интересных феноменов, наблюдаемых в гоАр-звездах. Он дает уникальную возможность для изучения вертикальной структуры атмосфер этих звезд [28].

Балона и Лэни [29] определили амплитуды и фазы пульсации лучевых скоростей методом кросс-корреляции для различных групп линий в звезде α Cig. Было подтверждено, что наименьшую амплитуду пульсаций показывают линии группы железа, редкоземельные линии пульсируют с гораздо большей амплитудой, и максимальная амплитуда RV была получена по измерениям линий Nd III. Эффект ван Хоффа в гоАр-звездах накладывает жесткие ограничения на определение лучевых скоростей методами кросс-корреляции и йодной ячейки, т.к. при усреднении данных, полученных по линиям, которые пульсируют по-разному, происходит потеря сигнала [30].

6. НОВЫЕ ВЫСОТЫ АСТРОСЕЙСМОЛОГИИ гоАр-ЗВЁЗД

Как было отмечено в статье Куртца [31], “до недавнего времени идея использования 8- и 10-м телескопов для наблюдения относительно ярких звезд на небе предавалась анафеме.” Проведение спектральных наблюдений гоАр-звезд с высоким спектральным и временным разрешением, с высоким отношением сигнал/шум позволило сделать настоящие открытия.

На основе спектральных исследований был предложен параметр, позволяющий отличить пульсирующие и неппульсирующие Ар-звезды [32]. Этот параметр — величина аномалии содержания редкоземельных элементов, т.е. разница в содержании элементов, полученных по вторым и третьим ионам Pr и Nd, достигающая от 1.5 до 2.5 порядков. В то же время последние открытия малоамплитудных пульсаций Ар-звезд, ранее классифицированных как поАр, позволяют сделать предположение, что реального физического различия между пульсирующими и неппульсирующими Ар-звездами не существует: все Ар-звезды являются пульсирующими, а в поАр-звездах амплитуда пульсации ниже порога обнаружения.

На основе высокоточных измерений RV в звезде Пшибыльского по спектрам, полученным с эшелле-спектрографом HARPS на 3.6-м телескопе ESO, был получен самый богатый частотный спектр для гоАр-звезды, содержащий 15 мод пульсаций [33].

Во многих гоАр-звездах изменения профиля линий при пульсации показывают интересную картину “движения” элементов линии с синего участка

спектра в сторону красного при отсутствии такого движения в обратную сторону — от красного участка линии в сторону синего. Для объяснения указанного феномена была предложена идея существования ударной волны в атмосферах γ Ar-звезд [34]. Однако, предположение о суперпозиции двух типов переменности профиля линии при пульсации — обычного пульсационного изменения лучевой скорости и дополнительного изменения эквивалентной ширины линии синхронно с изменением радиуса звезды при пульсации — позволило объяснить наблюдаемый феномен изменения профиля линии без предположения о наличии ударной волны [35].

7. ТРЕХМЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ АТМОСФЕР γ Ar-ЗВЕЗД

Как было отмечено выше, пекулярные атмосферы магнитных γ Ar-звезд представляют уникальную возможность построения трехмерной модели пульсирующей звездной атмосферы. “Облака” редкоземельных элементов расположены на различной высоте в атмосфере γ Ar-звезд. Изучение пульсационного поведения линий элементов, расположенных на различной высоте в атмосфере, позволяет непосредственно наблюдать распространение пульсационной волны. Как было показано в нашей работе [36], пульсационная модель [37] звезды HD 24712 примерно объясняет распределение амплитуд и фаз пульсации вплоть до $\log \tau_{5000} = -4$. Амплитуды и фазы пульсации увеличиваются к внешним слоям атмосферы. Таким образом, амплитуда и фаза пульсации отражают особенности распространения волны в атмосферах γ Ar-звезд. Метод анализа диаграмм “фаза максимума пульсации—амплитуда пульсации” [38] может быть использован для объяснения наблюдений и исследования структуры пульсирующей атмосферы. Данный подход позволяет использовать для исследования линии различных элементов, в то время как зависимости амплитуды и фазы пульсации от интенсивности линии могут быть корректно применимы только к линиям одного и того же элемента.

8. ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ γ Ar-ЗВЕЗД

Быстропульсирующие Ar-звезды характеризуются наличием сильных глобальных магнитных полей порядка нескольких кГс. Самое сильное магнитное поле величиной $\langle B \rangle = 24.5 \pm 1.0$ кГс было обнаружено у γ Ar-звезды HD 154708, эта величина приблизительно в три раза больше, чем у звезды HD 166473, имеющей $\langle B \rangle \sim 5.5-9.0$ кГс, второе по величине магнитное поле у γ Ar-звезд [39].

При исследовании магнитного поля у звезды γ Equ были обнаружены изменения его значения с периодом, совпадающим с периодом пульсации, 12.1 мин, и амплитудой 240 ± 37 Гаусс. Наблюдения проводились с помощью спектрографа SARG с поляриметром на телескопе TNG [40]. Наблюдения, проведенные с помощью спектрографа МАЭСТРО на 2-м телескопе обсерватории на пике Терскол, подтвердили этот результат [41]. Однако позднейшие исследования [42–45] не подтвердили переменность магнитного поля с периодом пульсации γ Ar. По-видимому, такая переменность в γ Ar-звездах отсутствует.

Было проведено первое магнитное доплеровское картирование распределения элементов по поверхности звезды HR 1217 [46], позволяющее восстанавливать как геометрию магнитного поля, так и распределение элементов по поверхности звезды без априорных предположений.

9. ОДНОВРЕМЕННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Наиболее интересными являются комплексные исследования γ Ar-звезд, основанные на спектральных и фотометрических наблюдениях, желательных одновременных. Такие исследования позволяют определить значения параметра сдвига фаз между кривыми блеска и лучевых скоростей, важного для моделирования структуры γ Ar-звезд. Наблюдательные кампании по спектральному мониторингу на крупнейших наземных телескопах, одновременному с фотометрическими наблюдениями с помощью спутника MOST, были организованы для исследования пульсаций в HD 24712 [36], 10 Aql [48, 49], 33 Lib [50] и γ Equ.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ публикационной активности по тематике исследования пульсаций в γ Ar-звездах, начиная с 1978 г. до настоящего времени, позволяет сделать вывод о постоянном интересе астрономического сообщества к этим ключевым для астросейсмологии объектам. Наибольший всплеск интереса замечен в период 1998–2008 гг., в течение которого ежегодно публиковалось более 40 статей в ведущих астрономических изданиях. Этот период можно назвать “золотой декадой” в исследованиях быстроосциллирующих химически пекулярных A-звезд. Небольшое количество новых звезд-кандидатов в γ Ar свидетельствует, по-видимому, в пользу того, что практически все γ Ar-звезды в ближайшей окрестности Солнца обнаружены. Представляется вероятным, что исследования γ Ar-звезд в ближайшем будущем будут сконцентрированы на получении интенсивных

спектральных наблюдательных данных высокого временного и спектрального разрешения с высоким отношением сигнал/шум и на фотометрических наблюдениях с помощью успешно работающего на орбите спутника MOST, а также на анализе данных миссии Kepler. Новые открытия можно ожидать при исследованиях с космическими обсерваториями следующего поколения, такими как проект “Всемирная космическая обсерватория — ультрафиолет” [51–54].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Kochukhov, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **460**, 831 (2006).
2. L. Mashonkina, T. Ryabchikova, and A. Ryabtsev, *Astronom. and Astrophys.* **441**, 309 (2005).
3. G. Michaud, *Astrophys. J. Suppl.* **160**, 641 (1970).
4. D. Kurtz, *IBVS* **1436**, 1 (1978).
5. S. Hubrig, N. Kharchenko, G. Mathys, and P. North, *Astronom. and Astrophys.* **355**, 1031 (2000).
6. P. Martinez and D. Kurtz, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **271**, 118 (1994).
7. V. Girish, S. Seetha, P. Martinez, et al., *Astronom. and Astrophys.* **380**, 142 (2001).
8. S. Joshi, D. Mary, P. Martinez, et al., *Astronom. and Astrophys.* **455**, 303 (2006).
9. S. Joshi, D. Mary, N.K. Chakradhari, et al., *Astronom. and Astrophys.* **507**, 1763 (2009).
10. E. Paunzen, M. Netopil, M. Rode-Paunzen, et al., *Astronom. and Astrophys.* **542**, A89 (2012).
11. L. Balona, M. Cunha, M. Gruberbauer, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **413**, 2651 (2011).
12. E. Semenko, M. Sachkov, T. Ryabchikova, et al., *Astronomy Letters* **34**, 413 (2008).
13. O. Kochukhov, D. Alentiev, T. Ryabchikova, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **431**, 2808 (2013).
14. D. Kurtz, C. Cameron, M. Cunha, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **358**, 651 (2005).
15. H. Bruntt, D. Kurtz, M. Cunha, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **396**, 1189 (2009).
16. M. Gruberbauer, D. Huber, R. Kuschnig, et al., *Astronom. and Astrophys.* **530**, A135 (2011).
17. D. Kurtz, M. Cunha, H. Saio, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **414**, 2550 (2011).
18. H. Bruntt, J. North, M. Cunha, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **386**, 2039 (2008).
19. K.G. Libbrecht, *Astrophys. J.* **330**, 51 (1988).
20. J. Matthews, W. Wehlau, G. Walker, and S. Yang, *Astrophys. J.* **324**, 1099 (1988).
21. A. Kanaan and A. Hatzes, *Astrophys. J.* **503**, 848 (1998).
22. A. Hatzes and M. Kuerster, *Astronom. and Astrophys.* **285**, 454 (1994).
23. I. Baldry, T. Bedding, M. Viskum, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **295**, 33 (1998).
24. I. Baldry, M. Viskum, T. Bedding, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **302**, 381 (1999).
25. V. Malanushenko, I. Savanov, and T. Ryabchikova, *IBVS* **4650**, 1 (1998).
26. O. Kochukhov and T. Ryabchikova, *Astronom. and Astrophys.* **374**, 615 (2001).
27. A. Van Hoof and O. Struve, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **65**, 158 (1953).
28. M. Sachkov, T. Ryabchikova, O. Kochukhov, et al., *ASP Conf. Ser.* **310**, 208 (2004).
29. L. Balona and C. Laney, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **344**, 242 (2003).
30. V. Panchuk, M. Sachkov, M. Yushkin, and M. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 75 (2010).
31. D. Kurtz, V. Elkin, and G. Mathys, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **343**, L5 (2003).
32. T. Ryabchikova, N. Nesvacil, W. Weiss, et al., *Astronom. and Astrophys.* **423**, 705 (2004).
33. D. Mkrtichian, A. Hatzes, H. Saio, and R. Shobbrook, *Astronom. and Astrophys.* **490**, 1109 (2008).
34. H. Shibahashi, D. Gough, D. Kurtz, and E. Kambe, *PASJ* **60**, 45 (2008).
35. O. Kochukhov, T. Ryabchikova, W. Weiss, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **376**, 651 (2007).
36. T. Ryabchikova, M. Sachkov, W. Weiss, et al., *Astronom. and Astrophys.* **462**, 1103 (2007).
37. H. Saio, T. Ryabchikova, and M. Sachkov, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **403**, 1729 (2010).
38. T. Ryabchikova, M. Sachkov, O. Kochukhov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **473**, 907 (2007).
39. S. Hubrig, D. Kurtz, M. Schöller, et al., *ASP Conf. Proc.* **462**, 318 (2012).
40. F. Leone and D. Kurtz, *Astronom. and Astrophys.* **407**, 67 (2003).
41. I. Savanov, F. Musaev, and A. Bondar, *IBVS* **5468**, 1 (2003).
42. O. Kochukhov, T. Ryabchikova, J. Landstreet, and W. Weiss, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **351**, 34 (2004).
43. O. Kochukhov, T. Ryabchikova, and N. Piskunov, *Astronom. and Astrophys.* **420**, 993 (2004).
44. I. Savanov, S. Hubrig, G. Mathys, et al., *Astronom. and Astrophys.* **448**, 1165 (2006).
45. S. Hubrig, D. Kurtz, S. Bagnulo, et al., *Astronom. and Astrophys.* **415**, 685 (2004).
46. T. Lüftinger, O. Kochukhov, T. Ryabchikova, et al., *Communications in Asteroseismology* **150**, 85 (2007).
47. S. Joshi, T. Ryabchikova, O. Kochukhov, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **401**, 1299 (2010).
48. M. Sachkov, O. Kochukhov, T. Ryabchikova, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **389**, 903 (2008).
49. M. Sachkov, O. Kochukhov, T. Ryabchikova, et al., *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **38**, 323 (2007).
50. M. Sachkov, M. Hareter, T. Ryabchikova, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **416**, 2669 (2011).

51. A.I. Gómez de Castro, I. Pagano, M. Sachkov, et al., in *New Quests in Stellar Astrophysics II*, Ed. by M. Ch. Dagostino, E. Bertone, D. R. Gonzáles, and L. H. Rodríguez-Merino, *Astrophys. Space Sci. Proc.* (Springer, 2007), p. 319.
52. O. Malkov, M. Sachkov, B. Shustov, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **335**, 323 (2011).
53. A.A. Boyarchuk, B.M. Shustov, A.A. Moisheev, and M.E. Sachkov, *Solar System Research* **47**, 499 (2013).
54. M. Sachkov, B. Shustov, I. Savanov, and A.I. Gómez de Castro, *Astronomische Nachrichten* **335**, 46 (2014).

Study of Pulsations of Chemically Peculiar A Stars

M. E. Sachkov

Rapidly oscillating chemically peculiar A stars (roAp) pulsate in high-overtone, low degree p-modes and form a sub-group of chemically peculiar magnetic A stars (Ap). Until recently, the classical asteroseismic research, i.e., frequency analysis, of these stars was based on photometric observations both ground-based and space-based. Significant progress has been achieved by obtaining uninterrupted, ultra-high precision data from the MOST, COROT, and Kepler satellites. Over the last ten years, a real breakthrough was achieved in the study of roAp stars due to the time-resolved, high spectral resolution spectroscopic observations. Unusual pulsational characteristics of these stars, caused by the interaction between propagating pulsation waves and strong stratification of chemical elements, provide an opportunity to study the upper roAp star atmosphere in more detail than is possible for any star but the Sun, using spectroscopic data. In this paper the results of recent pulsation studies of these stars are reviewed.

Keywords: *stars: chemically peculiar—stars: oscillations*