

УДК 524.31

Литий в химически пекулярных CP-звездах с магнитными полями

Н.С. Полосухина¹, А.В. Шаврина²

¹НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

polo@crao.crimea.ua

²Main Astronomical Observatory of NASU, Ukraine

shavrina@mao.kiev.ua

Поступила в редакцию 9 января 2009 г.

1 Введение

Мы представляем обзор исследований содержания лития в атмосферах химически пекулярных CP-звезд.

Литий – это один из наиболее обильных первоначальных элементов Вселенной, возникших после водорода и гелия в результате Большого Взрыва. Вместе с тем он и один из наиболее легко разрушаемых элементов: при температуре около 2 млн. градусов, характерной для звездных недр, происходит его термоядерное горение. За счет конвекции и других механизмов перемешивания обедненное литием вещество выносится в атмосферу звезды, и поэтому атмосферы молодых звезд обычно имеют более высокое содержание этого элемента, чем старые звезды. В результате большая часть проэволюционировавших звезд (поздние гиганты) имеет относительный дефицит лития.

Проблема лития в CP-звездах многие годы была предметом многочисленных дебатов из-за дефицита наблюдений и противоречивости результатов этих наблюдений. Обилие индивидуальных особенностей CP-звезд (высокое содержание тяжелых и особенно REE: Eu, Gd, Ce, Pr, Nd, магнитные поля, сложная структура распределения элементов по поверхности и пульсации у многих CP-звезд) осложняют поиски лития и определение его содержания.

Интенсивные систематические наблюдения лития в Ap-CP-звездах в КрАО на 2.6-м телескопе им Г. Шайна были начаты с 1974 г. и подтвердили результаты наблюдений М. Хак, Валерштейна, Мерчант и др. (с 1963 по 1968 гг.), обнаруживших аномальное содержание лития у ряда CP-звезд.

Однако в обзорах Фараджины и Жербальди (1992, 1996) были собраны наиболее полные данные и самые противоречивые результаты наблюдений 39 Ap-CP звезд в области LiI 6708F Å. Этот обзор продемонстрировал пеструю картину и показал большой разброс в содержании лития в CP-звездах с подобными параметрами атмосферы. Авторы не интерпретировали эти результаты, ибо очевиден был недостаток наблюдений и их неоднородность.

Такая ситуация была обсуждена на международном совещании в Словакии в 1996 году. Результаты исследований лития, полученные в КрАО (с 1974 г.), а также работы Хак, Фараджина и др. легли в основу Международного проекта “Lithium in cool CP-stars with magnetic fields”. Основная цель проекта состоит в том, чтобы используя систематические спектральные наблюдения Ap-CP-звезд на разных фазах вращения звезды в спектральной области линий лития 6708 Å и 6103 Å, полученные на ЗТШ и других телескопах мира,

попытаться создать базу данных, достаточную для исследования физических причин аномального содержания лития в атмосферах этих звезд.

2 Первая часть проекта. Анализ спектров гоАр-звезд HD 83368 и HD 60435 со значительными доплеровскими сдвигами линии лития 6708 Å (I группа)

2.1 Наблюдения

Новая серия наблюдений 12 Ар-СР-звезд в рамках международного проекта (1996) продемонстрировала аномально высокое содержание лития в ряде Ар-СР-звезд и разное поведение резонансного дублета лития 6708 в спектрах этих звезд с фазой вращения.

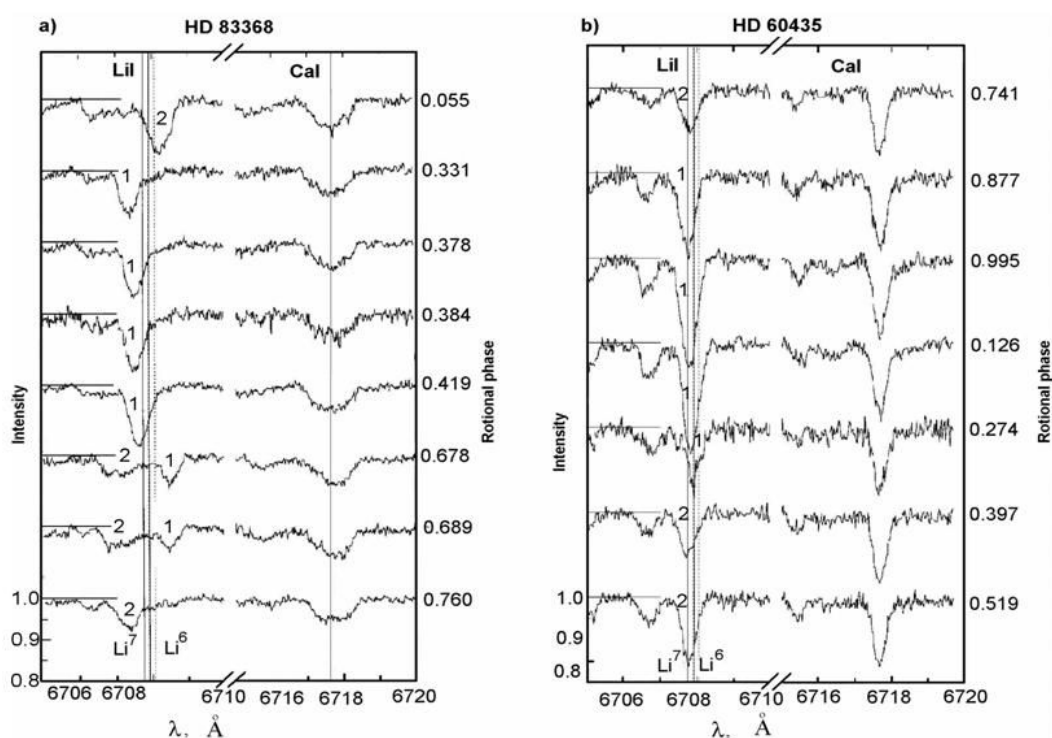


Рис. 1. Оригинальные спектры вблизи линии лития Li I 6708 Å, нормированные к континууму для осциллирующих гоАр-звезд HD 60465 для различных фаз вращения (фазы указаны с правой стороны рисунка)

Серия тестовых наблюдений СР-звезд, полученная П. Нортон в 1996 г. в ESO с телескопом CAT 1.4-м с высоким спектральным разрешением ($R = 100000$) и отношением $S/N = 100$, продемонстрировала для спектральной области лития 6708 Å спектры СР-звезд высокого качества. Наиболее важным и интересным результатом этой серии наблюдений (рис. 1) является открытие уникальной переменности профиля линии лития 6708 Å с фазой вращения для осциллирующих звезд гоАр HD 83368 и HD 60435 (I группа звезд с доплеровскими сдвигами линии Li I 6708 Å, достигающими 0.7 Å для HD 83368). Анализ наблюдений показал, что такой значительный доплеровский сдвиг (рис. 2а) линии лития является результатом вращательной модуляции “запятненной” литием поверхности звезды (Норт и др., 1998).

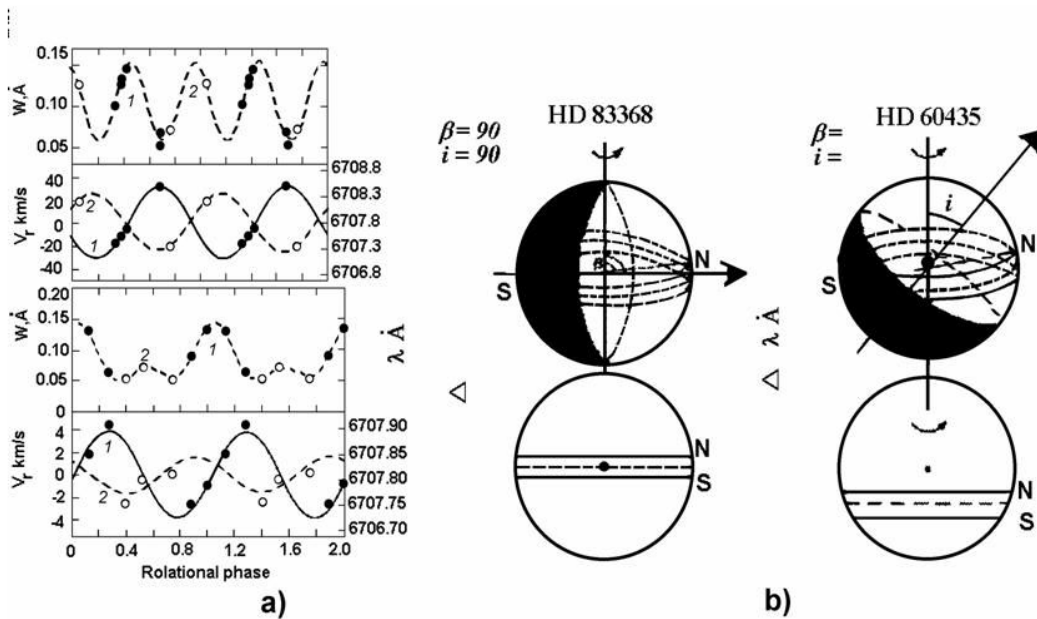


Рис. 2. а) изменения лучевой скорости и интенсивности линии лития с фазой вращения звезд HD 83368, HD 60435; б) индивидуальные модели наклонного ротатора для указанных звезд с траекториями пятен на поверхности звезд. N – положение положительного, S – отрицательного полюсов магнитного поля

2.2 Феноменологическая картина переменности пятнистой осциллирующей α Ap-звезды HD 83368.

Обнаружение уникального изменения профиля линий Li I 6708 Å с фазой вращения у звезд HD 83368 и HD 60435 привели нас к необходимости рассмотреть поведение других характеристик этих звезд. Звезда HD 83368 представляет собой пример классической осциллирующей α Ap-звезды, наиболее хорошо изученной фотометрически, с пекулярностью типа SrCrEu, температурой $T_{\text{eff}} = 7750$ K, радиусом $R = 2.9 \pm 0.1R_{\odot}$ и переменным магнитным полем.

Важнейшим результатом исследования для звезды HD 83368 было обнаружение синхронных изменений положения “литиевых” пятен магнитного поля, блеска звезды, а также амплитуды и фазы пульсации с фазой вращения звезды. Феномен переменности был объяснен индивидуальной моделью “запятненного” пульсатора (Куртц, 1982) с дипольным магнитным полем и литиевыми пятнами на магнитных полюсах. Этот феномен дает указание на связь между локальной структурой атмосферы и конфигурацией магнитного поля (рис. 3) (Полосухина и др., 1999).

2.3 Модельные расчеты

Количественный анализ спектров выполнялся методом синтетического спектра с помощью программ В.В. Цымбала STARSP и ROTATE, которые использовались для расчета профилей спектральных линий, формирующихся во всей фотосфере и в отдельных пятнах вращающейся звезды. Подробно постановка задачи и метод ее решения по программе ROTATE описаны в работе (Шаврина и др., 2001). Были использованы модели атмосфер и списки линий с атомными данными из CDROM-13, CDROM-23, VALD-2.

Параметры моделей атмосфер для анализа T_{eff} , $\lg g$ и $v \sin i$ были взяты из работы (Шаврина и др., 2000):

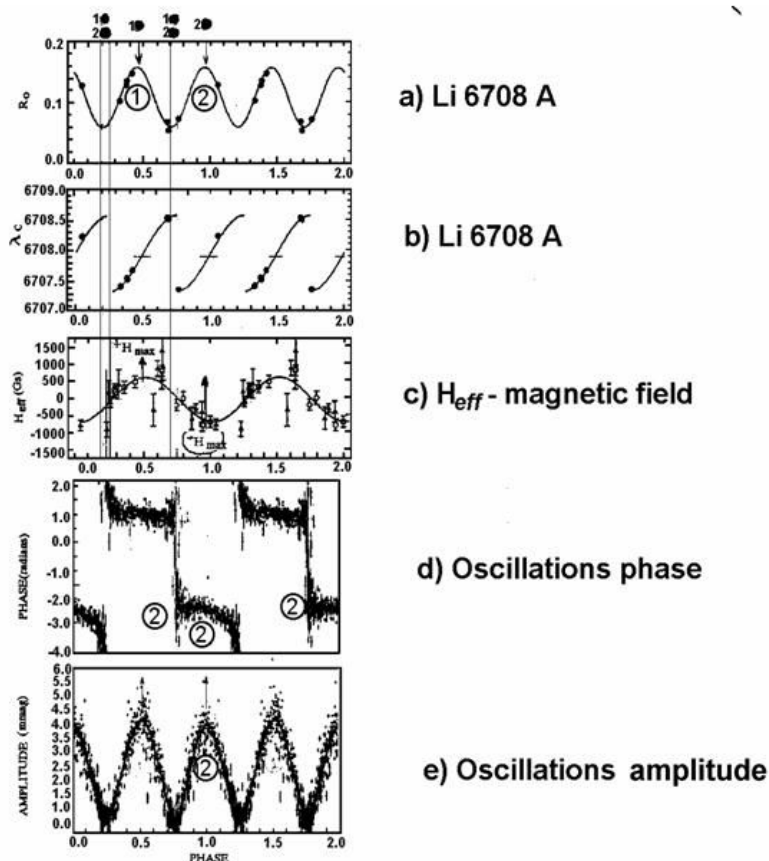


Рис. 3. Вариации физических параметров звезд HD 83368 с фазой вращения

HD 83368 $T_{\text{eff}} = 7750$ K, $\lg g = 4.0$, $v \sin i = 34$ км/с, $[M/H] = 0.0$

HD 60435 $T_{\text{eff}} = 8250$ K, $\lg g = 4.5$, $v \sin i = 11$ км/с, $[M/H] = 0.0$.

Имеющееся изначально количество спектров этих звезд для разных фаз вращения было недостаточно для решения обратной задачи определения физических параметров, описывающих условия образования спектральных линий. Поэтому в качестве первого приближения был выбран метод прямого моделирования профилей спектральных линий для вращающейся звезды. Параметрами задачи при определении содержания лития в пятне являлись:

- i – угол наклона оси вращения звезды к лучу зрения,
- v_e – экваториальная скорость вращения звезды,
- N_s – количество пятен,
- l_s, φ_s, R_s – координаты и размеры каждого пятна,
- ϵ_s – содержание лития в каждом пятне.

Результирующие параметры “литиевых пятен” для обеих звезд таковы:

Для HD 83368 угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 90^\circ$,
 $v_e = 35$ км/с и при содержании лития в фотосфере $\log \epsilon_{\text{ph}}(\text{Li}) = 1.8$
 Пятно 1: $l_1 = 173^\circ \pm 6^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ \pm 6^\circ$, $R_1 = 33^\circ \pm 6^\circ$, $\log \epsilon_1(\text{Li}) = 3.6 \pm 0.2$
 Пятно 2: $l_2 = 337^\circ \pm 6^\circ$, $\varphi_2 = 0^\circ \pm 6^\circ$, $R_2 = 35^\circ \pm 6^\circ$, $\log \epsilon_2(\text{Li}) = 3.5 \pm 0.2$.

Для HD 60435 угол наклона оси вращения к лучу зрения $i = 47^\circ$ (133°),
 $v_e = 15$ км/с и при содержании лития в фотосфере $\log \epsilon_{\text{ph}}(\text{Li}) = 1.8$
 Пятно 1: $l_1 = 11^\circ \pm 6^\circ$, $\varphi_1 = -15^\circ \pm 6^\circ$, $R_1 = 44^\circ \pm 3^\circ$, $\log \epsilon_1(\text{Li}) = 3.8 \pm 0.2$
 Пятно 2: $l_2 = 205^\circ \pm 10^\circ$, $\varphi_2 = 15^\circ \pm 6^\circ$, $R_2 = 40^\circ \pm 7^\circ$, $\log \epsilon_2(\text{Li}) = 2.7 \pm 0.2$.

Программа ROTATE расчета синтетического спектра запятненной поверхности вращающейся звезды дала возможность получить параметры литиевых пятен: положение l , φ , размер R и содержание лития в пятне, $\log \epsilon(\text{Li})$. Лучшее согласие между рассчитанным и наблюдаемым профилями достигается для положения пятна вблизи центра видимого диска звезды.

Эти результаты исследования лития в CP-звездах явились толчком для новых наблюдений в области линии Li I 6708 Å как для этих интересных исследуемых звезд, так и для новых наблюдений CP-звезд, и для проведения мониторингов с фазой вращения. К этой программе подключились коллеги из Санкт-Петербурга и Бразилии, которые внесли существенный вклад в исследования HD 83368 своими наблюдениями на телескопе FEROS (ESO) (Кочухов и др., 2004).

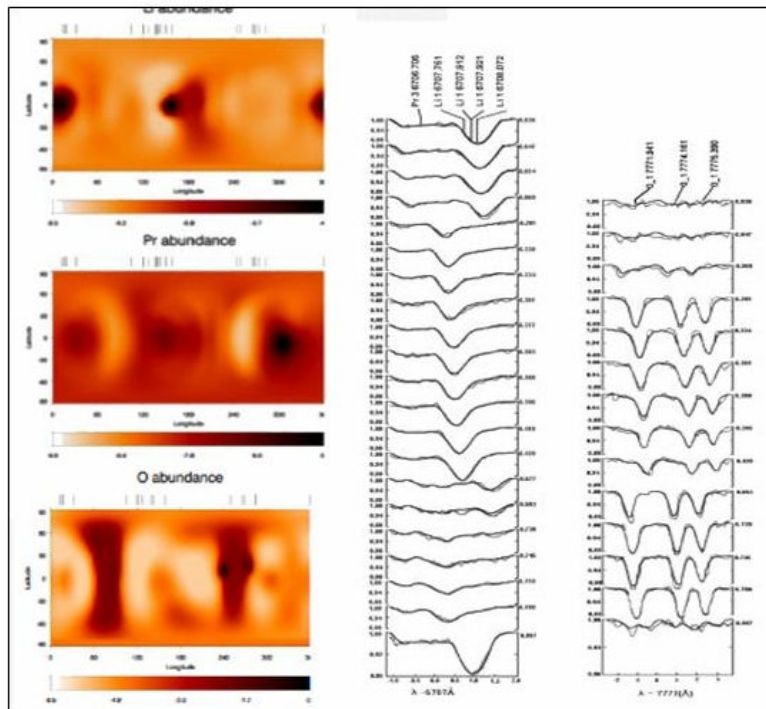


Рис. 4а. Вариации профиля Li I + Pr III и триплета кислорода O с фазой вращения и карты поверхности звезды HD 83368 в прямоугольной системе координат для Li I, Pr III и для сравнения триплета кислорода O (7771Å)

Все полученные наблюдения HD 83368 в спектральной области Li I 6708 Å и PrIII 6706.7 Å были проанализированы при помощи пакета программ для доплеровского картирования (Piskunov Code INVERS 12). Техника доплеровского картирования основана на восстановлении изображения (температуры, химического состава) по модуляции профилей спектральных линий вращения звезды. Для такого анализа необходима большая серия наблюдений с достаточно хорошим фазовым покрытием периода вращения звезды. Результаты этого анализа для HD 83368 были получены Кочуховым и др. (2004) и представлены на рис. 4а, 4б.

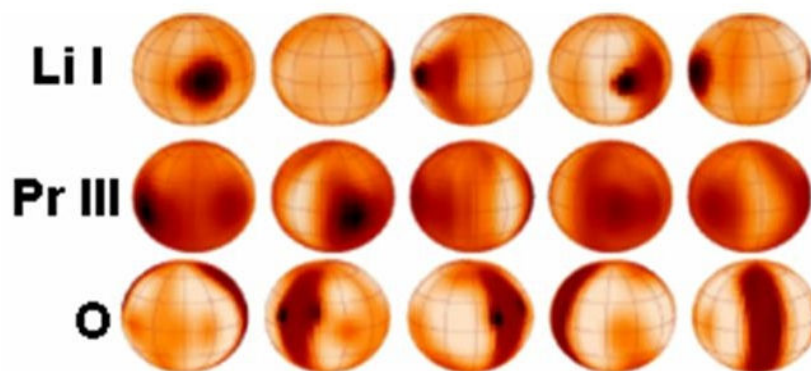


Рис. 4б. Сферическая модель поверхности звезды HD 83368 с “литиевыми пятнами” и пятнами Pr III и кольцевой структурой для кислорода

2.4 Выводы по первой части

Открытие литиевых структур на поверхности холодных CP-звезд, связанных со структурой магнитного поля у этих звезд, ставит проблему звездного магнетизма более широко. Магнитные поля могут быть ответственны за создание и поддержание неоднородности распределения химических элементов, а также температуры.

Важнейшим результатом исследования лития для α Ap-звезд HD 83368 и HD 60435 явилось открытие контрастных “литиевых” пятен вблизи магнитных полюсов дипольного магнитного поля этих звезд.

Анализ литиевых пятен и определение их параметров (размера, положения и содержания лития) был выполнен с использованием программы ROTATE Цымбала. Было показано, что содержание лития в пятне существенно выше, чем в фотосфере.

Мониторинг HD 83368 с CAT (ESO) и спектрографом FEROS (ESO) позволил выполнить анализ DI лития по поверхности звезды HD 83368, и эти результаты находятся в хорошем согласии с результатами прямого моделирования по программе ROTATE.

3 II часть проекта: количественный анализ спектра и моделирование атмосферы медленно вращающихся CP-звезд (вторая группа α Ap-CP-звезд)

Другая группа α Ap-CP звезд с узкими линиями в их спектрах не показывает вращательной переменности линии лития. Эти звезды, как и звезды первой группы, характеризуются большим избытком содержания REE и сильными магнитными полями. Величина поверхностного магнитного поля для них составляет 2–7 кГс. Узкие линии в спектрах выбранных звезд обусловлены небольшими величинами $v_e \sin i$. Для звезд с большими периодами

вращения, как γ Equ и 33 Lib ($P > 70$ лет), узкие линии объясняются медленным вращением (величина v_e близка к нулю), в то время как для звезд с короткими периодами вращения ($v_e \gg 0$) они являются результатом небольшой величины $\sin i$, т. е. незначительного наклона оси вращения к лучу зрения. Поэтому эти звезды наблюдаются с полюса, и наблюдатель видит всегда только одну полусферу.

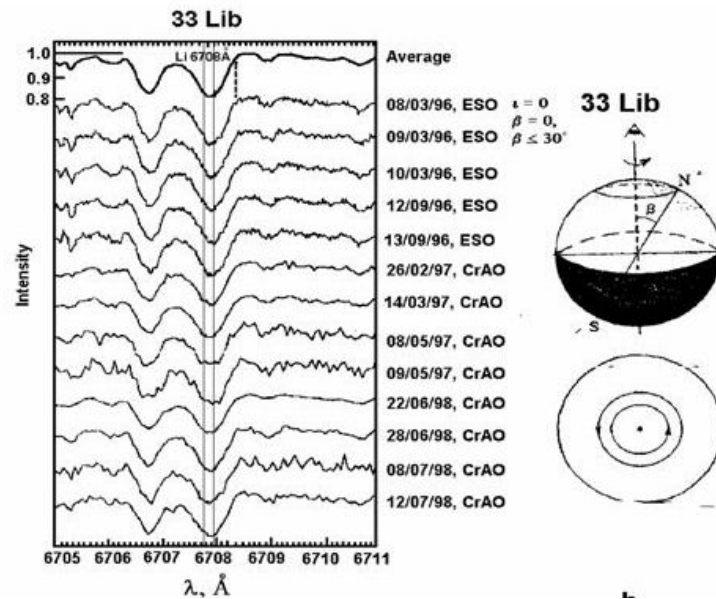


Рис. 5. Спектры звезды 33 Lib, полученные в КРАО (ЗТШ) и ESO (КАТ), демонстрируют постоянство линии лития 6708 Å. Модель наклонного ротатора для этой звезды показана справа

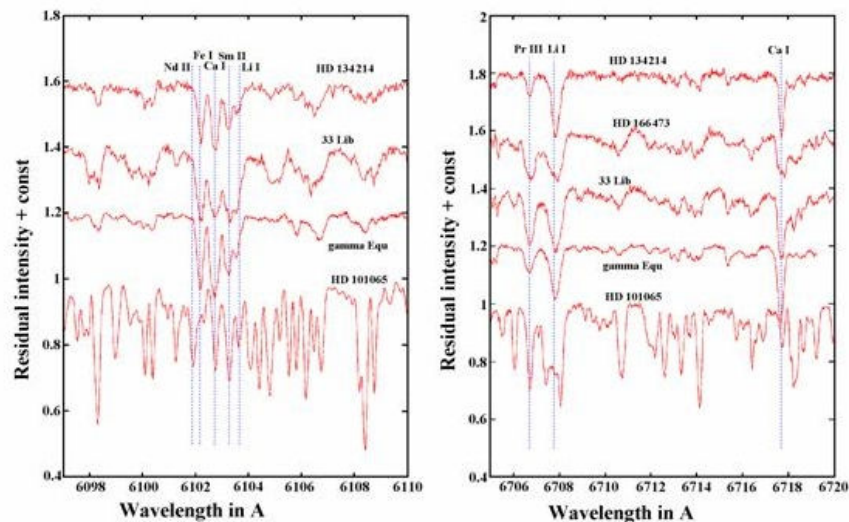


Рис. 6. Оригинальные спектры анализируемых γ Ar-звезд с узкими линиями HD 134214, HD 166473, HD 137919 (33 Lib), HD 201001 (γ Equ) и HD 101065 (звезда Пшибыльского) в двух областях вблизи линии лития 6103 Å (слева) и 6708 Å (справа)

3.1 Наблюдения CP-звезд (II Группа)

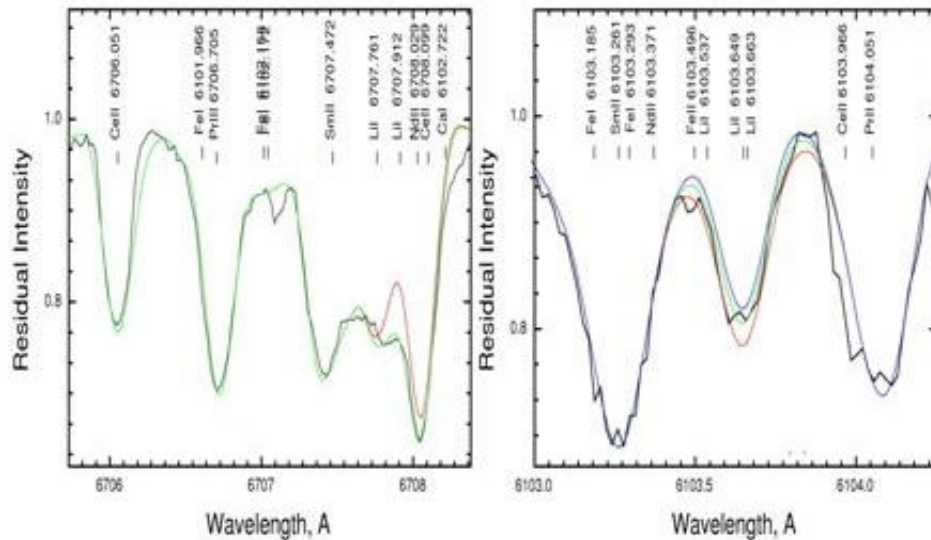


Рис. 7. Сравнение наблюдаемого и рассчитанного спектра для HD 101065 в областях линий LiI 6708 Å (слева) и 6103 Å (справа). Сплошная линия – наблюдаемый спектр; штриховая линия – наилучшее совмещение рассчитанного спектра с наблюдаемым при $\lg \varepsilon(\text{Li}) = 3.10$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.4$, верхняя пунктирная линия – только ${}^7\text{Li}$ (на левом рисунке); справа – наблюдаемый (сплошная линия) и рассчитанный спектры для $\lg \varepsilon(\text{Li}) = 3.35 \pm 0.2$ пунктирные (верхняя пунктирная линия для $\lg \varepsilon(\text{Li}) = 3.35$, средняя пунктирная линия для $\lg \varepsilon(\text{Li}) = 3.55$ и нижняя штриховая линия для $\lg \varepsilon(\text{Li}) = 3.75$)

Важная серия наблюдений, полученная в ESO и КрАО (1996–2001 гг.) для осциллирующих гоАр-звезд 33 Lib, γ Equ, HD 101065, HD 134214, HD 166473, продемонстрировала постоянство сильной линии лития 6708 Å в спектрах этих звезд (II группа гоАр-звезд, пример – 33 Lib (наблюдения ЗТШ КрАО и САТ ESO) (рис. 5)).

Первые спектры звезд HD 101065, HD 134214, HD 137949 и HD 166473 с разрешением $R = 100000$ были получены П. Нортон 8–14 марта 1996 г. на 1.4-м телескопе САТ и кудэ-спектрометре CES в обсерватории Ла Силла. Детектором служила матрица ESO CCD N34 с 2048 пикселями вдоль дисперсии (размер пиксела составлял 15×15 мкм), которая обеспечивала разрешающую силу $R = 100\,000$; спектральные области охватывали 58.2 Å с центральной длиной волны 6705, 6645 и 6150 Å. Для анализа были использованы обе линии лития – резонансный дублет лития LiI 6708 Å и субординатная линия лития LiI 6103 Å (рис. 6).

Примеры расчетных спектров для HD 101065 и 33Lib и сравнение с наблюдаемыми приведены на рис. 7 и рис. 8.

3.3 Выводы по второй части проекта

Наиболее важные результаты наблюдений гоАр-звезд HD 101065, HD 134214, HD 137949, HD 166473, HD 201601 следующие:

- более высокое содержание лития (Li I) по линии 6103 Å, чем по линии 6708 Å;
- изотопный состав лития слегка отличается от звезды к звезде и превышает отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ на Солнце;

- для анализа были использованы три программы расчета синтетического спектра: STARSP, ZEEMAN2, SYNTM. В список линий из базы данных VALD были включены линии редкоземельных элементов из базы данных DREAM и новые линии, рассчитанные авторами на основе уровней энергии из базы данных NIST. При расчетах синтетического спектра были учтены магнитное расщепление линий и другие эффекты, расширяющие спектральные линии.

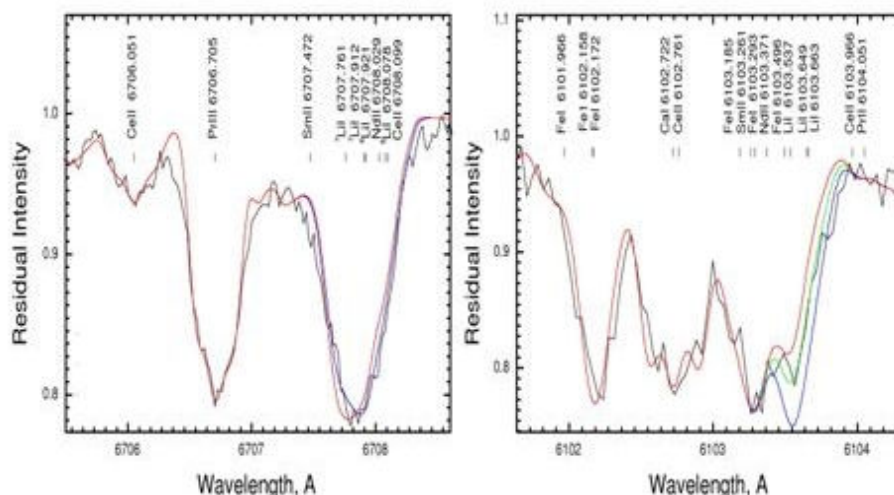


Рис. 8. Сравнение наблюдаемого и расчетного спектра для 33 Li I в спектральной области линии Li I 6708 Å (слева) и Li I 6103 Å (справа). Сплошная линия – наблюдаемый спектр; пунктирная линия (слева) – наилучшее совмещение расчетного спектра с наблюдаемым при $\lg \epsilon(\text{Li}) = 4.10$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.2$, штриховая для $\lg \epsilon(\text{Li}) = 4.17$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.0$. На правом рисунке штриховая линия – наилучшее совмещение расчетного спектра с наблюдаемым при $\lg \epsilon(\text{Li}) = 4.45$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.2$, верхняя точечная и нижняя пунктирная линии – рассчитанный спектр для $\lg \epsilon(\text{Li}) = 4.75$ и $\lg \epsilon(\text{Li}) = 4.15$, и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.2$

- высокое содержание лития в атмосферах указанных выше звезд по обеим линиям лития и высокие оценки изотопического отношения $R = {}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} - (0.2-0.5)$ можно объяснить производством лития в реакциях “скалывания” (spallation reactions) и сохранением изотопов лития (как ${}^6\text{Li}$, так и ${}^7\text{Li}$) сильным магнитным полем в верхних слоях атмосферы вблизи полюсов дипольного магнитного поля;
- для уточнения наших оценок содержания лития у медленно вращающихся CP-звезд и отношения содержаний его изотопов нужны новые лабораторные и теоретические значения сил осцилляторов gf для блендирующих REE-линий.

Интерпретация наблюдательных результатов лития Ар-CP-звезд позволит понять механизм образования этих аномалий и приблизиться к разгадке природы этих звезд. Как известно, вследствие подавления конвективных движений сильными магнитными полями, атмосферы этих звезд обладают недоразвитой тонкой конвективной оболочкой. Поэтому следует ожидать, что наблюдаемая неоднородность химического состава Ар-CP-звезд обусловлена как процессами диффузии, так и особенностями структуры магнитного поля.

Создание и реализация базы наблюдательных данных в спектральной области линий лития 6708 Å и 6103 Å – важнейшая проблема для будущих статистических и теоретических исследований CP-звезд, а наши новые результаты по содержанию лития в Ар-CP-звездах и их

интерпретация открывают новые перспективы в исследованиях физической природы СР-звезд и их эволюционного статуса.

Литература

- Валлерштейн, Мерчант (Wallerstein G., Merchant A.) // Publ. Astron. Soc. Pasif. 1965. V. 77. P. 140.
- Валлерштейн, Хак (Wallerstein G., Hack M.) // Observatory. 1964. V. 84. P. 160.
- Кочухов и др. (Kochukhov P. et al.) // Astron Astrophys. 2004. V. 424. P. 935.
- Куртц (Kurtz D.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1982. V. 200. P. 807.
- Норт и др. (North P., Polosukhina N., Malanushenko V., Hack M.) // Astron. Astrophys. 1998. V. 333. P. 644.
- Полосухина и др. (Polosukhina N., Kurtz D., Hack M. et al.) // Astron/ Astrophys. 1999. V. 351. P. 283.
- Фаражжана и др. (Faraggiana R., Gerbaldi M., Delmos F.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1996. V. 238. P. 196.
- Хак, Фаражжана (Hack M., Faraggiana R.) // Publ. Astron. Soc. Pasif. 1963. V. 75. P. 376.
- Шаврина А.В., Полосухина Н.С. и др. // Астрон. журн. 2006. Т. 83. С. 560.
- Шаврина и др., (Shavrina A. et al.) // Astron. Rep. 2000. V. 44. P. 235.