

УДК 524.33

Результаты спектральных наблюдений БТА (САО) химически пекулярных CP-звезд в области резонансного дублета лития Li I (6708 Å)

Н. Полосухина¹, А. Шаврина², Н. Драке³, Д. Кудрявцев⁴, М. Смирнова¹

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
polo@srao.crimea.ua

² Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03680, Украина, Киев
shavrina@tao.kiev.ua

³ Астрономический институт им. В.В. Соболева, 198504, Российская Федерация, Санкт-Петербург
drake@on.br

⁴ Специальная астрофизическая обсерватория, 369167, Российская Федерация, Нижний Архыз
dkudr@sao.ru

Поступила в редакцию 5 февраля 2010 г.

Аннотация. Новые спектральные наблюдения химически пекулярных (CP) магнитных звезд, полученные с эшелле-спектрометром “NES” на БТА (САО РАН), позволили обнаружить несколько звезд с аномальным содержанием лития.

Тестирование и мониторинг звезд с доплеровскими сдвигами $V_{\sin i} > 10$ км/сек указали на переменность линии лития 6708 Å в спектрах некоторых роАР-CP звезд. Для выделения переменных деталей в спектрах был использован метод дисперсограмм. Среди этих звезд особо выделяется звезда HD 12098. Сильная и переменная линия лития 6708 Å была детектирована в спектре звезды, и продемонстрировано большое различие в содержании лития в противоположных фазах вращения звезды, соответствующих противоположным областям на поверхности звезды. Подобное поведение литиевой бленды было отмечено ранее у звезд HD 83368 и HD 60435 с литиевыми пятнами на поверхности звезды. Наблюдения спектров медленно вращающихся CP-звезд с доплеровскими сдвигами $V_{\sin i} < 10$ км/сек продемонстрировали наличие сильной и неперменной линии лития 6708 Å в спектрах этих звезд. Количественный анализ спектров, используя резонансный дублет лития Li I 6708 Å и линии Li I 6103 Å, показывает, что содержание лития по линии 6103 Å несколько выше, чем по линии 6708 Å.

Было обнаружено для этих звезд более высокое отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ ($\sim 0.3-0.5$). Высказано предположение, что продуцирование ${}^6\text{Li}$ вызвано реакциями “spallation” (скальвания) на поверхности магнитных CP-звезд, и это отношение изотопов сохраняется в сильных магнитных полях.

RESULTS OF THE SPECTRAL OBSERVATIONS OF CP-STARS IN THE LI I 6708Å SPECTRAL REGION WITH THE 6-M BTA TELESCOPE OF SAO RAS, *by N. Polosukhina, A. Shavrina, N. Drake, D. Kudryavtsev, M. Smirnova.* New spectral observations of some Ap-CP stars with echelle-spectrometer “NES” on BTA (SAO RAS) permitted us to discover several stars with abnormal (enhanced) lithium abundance.

Testing and monitorings CP-stars with Doppler shift ($V_{\sin i} > 10$ km/sec) show Variable line lithium 6708 Å in spectra of some roAp stars. Method of dispersogram was used for detection of variable details in spectra.

Among these stars we distinguish especially one rapidly oscillating star HD 12098. The strong and variable lithium line was detected in spectrum of star and considerable difference in lithium abundance in opposite rotational phases corresponding different (opposite) regions on the star surface is similar to the lithium line behaviour from earlier observations stars HD 83368 and HD 60435 with lithium spots.

roAp – slowly rotating stars ($V \sin i < 10$ km/sec) HD 134210, HD 139949, HD 166473) with strong and nonvariable Lithium line 6708 Å.

Analysis of Lithium abundance using two lines Li I 6708 Å and Li I 6103 Å shows more higher abundance of lithium in Li I 6103 Å than in Li I 6708 Å.

Also was received more high ratio ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ ($\sim 0.3-0.5$) for these stars. We propose lithium production (${}^6\text{Li}$) due to spallation reactions and the preservation of both isotopes ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ by strong magnetic field of star.

Ключевые слова: литий, спектральный анализ, магнитные Ap-Cp-звезды

1 Введение

Перед началом формирования первых звезд межзвездный газ содержал продукты Большого Взрыва – изотопы двух самых легких элементов водорода H и гелия He с малой примесью Li, Be, B.

С началом термоядерных реакций в недрах звезды начинает меняться содержание некоторых элементов. Однако во внешних слоях оно остается без изменений, и тем не менее уже в самой начальной стадии могут возникать процессы, приводящие к обмену веществом между поверхностью звезды и более глубокими слоями звезды. И на это указывает появление продуктов C, N, O цикла в атмосферах горячих O- и B-звезд. Процессы перемешивания реализовались через конвекцию и диффузию. Содержание металлов в эту эпоху было практически нулевым. Протогалактическое облако имело приблизительно сферическую форму, и первые поколения звезд образовали сферическую подсистему Галактики, т. е. ее гало. Все старые звезды гало, наблюдаемые в нашу эпоху, имеют низкую металличность $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$.

Обогащение молодой Галактики металлами происходило в основном за счет взрывов массивных, быстро эволюционировавших звезд (сверхновых). Далее звездообразование переместилось из гало сначала в толстый диск, а затем – в тонкий, и все более заметную роль в обогащении межзвездной среды металлами стали играть взрывы менее массивных сверхновых Ia-типа. Таким образом, менялся относительный вклад сверхновых разных типов, и это нашло свое отражение в химическом составе следующих поколений звезд.

После ухода звезды с главной последовательности в область гигантов и сверхгигантов она проходит фазу глубокого конвективного перемешивания, которое существенно влияет на содержание легких элементов, особенно на содержание лития; звезда практически остается без лития.

2 О проблеме лития в общем

Два элемента, литий и бериллий, занимают среди всех элементов особое положение, потому что их содержание в звездных атмосферах может меняться уже на стадии ГП. Это объясняется тем, что разрушение лития и бериллия происходит в термоядерных реакциях при довольно низких температурах $T = \sim 2.5 \times 10^6$ К для лития Li и $T = \sim 3.5 \times 10^6$ К для Be. Поэтому, если в звезде существует перемешивание, захватывающее и наружные слои (конвекция), то оно может привести к тому, что литий, попадая из атмосферы в более глубокие слои, разрушается и содержание вещества, которое выносится в атмосферу, обеднено литием.

Следует отметить, что содержание лития определяется обычно по одной только линии Li I 6708 Å (резонансный дублет), которую можно наблюдать только в спектрах достаточно холодных звезд.

Нормальная звезда, имея заметное начальное содержание лития, в процессе эволюции вдоль

главной последовательности, при изменении температурного режима и условий перемешивания, приходит к концу своего эволюционного пути, практически полностью исчерпав запасы лития.

Большая часть проэволюционировавших звезд – поздние гиганты – имеют дефицит лития. Однако среди некоторых проэволюционировавших звезд (красных гигантов) наблюдается большой разброс в содержании лития – до 6 порядков, и этот разброс указывает на некоторые физические процессы:

- 1) которые тормозят перемешивание звездного вещества и разрушение лития;
- 2) если содержание лития велико, то создаются условия для процессов возникновения лития в этих объектах.

Вращение звезды и сильное магнитное поле способствуют созданию условий для этих процессов.

Что касается синтеза лития в красных гигантах, то в работе (Ламберт, Соер, 1984) высказывались предположения о том, что богатые литием гиганты в своем эволюционном пути проходили стадию химически пекулярной звезды с магнитным полем и о синтезе лития в результате реакций скалывания (“spallation reaction”), которые идут на поверхности звезд с сильными магнитными полями, ускоряющими протоны и альфа частицы. Предположения авторов о том, что Li-rich гиганты в своем развитии проходили стадию химически пекулярной звезды, стимулировали интерес к проблеме лития в магнитных CP-звездах.

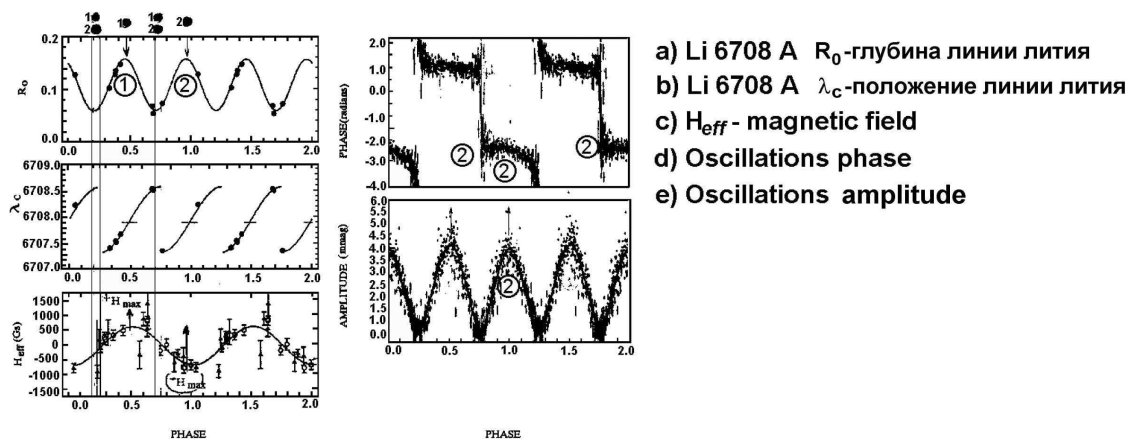


Рис. 1. Вариации физических параметров звезды HD 83368 с фазой вращения

Проблема лития в Ar-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) осложняет поиски лития и определение его содержания.

На Международном совещании в Словакии в 1996 году обсуждалась ситуация с проблемой лития в Ar-CP-звездах. Результаты исследований лития, полученные в КрАО (Полосухина 1973–1976 гг.), а также работы (Хак, Фараджина, 1963; Валерштайн и др., 1964) легли в основу Международного проекта “Lithium in cool CP-stars with magnetic fields”. Основная цель проекта состояла в том, чтобы, используя систематические спектральные наблюдения Ar-CP-звезд на разных фазах вращения звезды в спектральной области резонансного дублета Li I 6708 Å и субординатной линии Li I 6103 Å, полученные на телескопах мира, попытаться создать базу данных, достаточную для понимания физических причин аномального содержания лития в атмосферах этих звезд.

- * Первые наблюдения gAr-CP звезд в рамках Международного проекта продемонстрировали аномально высокое содержание лития в ряде этих звезд и разное поведение дублета лития 6708 \AA с фазой вращения.
- * Наиболее важным результатом этих наблюдений явилось открытие переменности профиля линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ с фазой вращения у двух южных gAr-CP -звезд HD 83368 и HD 60435.
- * Значительный переменный доплеровский сдвиг достигает 0.7 \AA для HD 83368 и является результатом вращательной модуляции “запятненной” литием поверхности звезды.
- * Не менее важным было обнаружение синхронных изменений положения линии лития 6708 \AA , напряженности магнитного поля H_{eff} , блеска звезды и феномена осцилляций, которые были объяснены моделью наклонного ротатора (Норт и др., 1998; Полосухина и др., 1999), рис. 1.
- * Впервые получено указание на связь между локальной структурой атмосферы в литии и конфигурацией магнитного поля.
- * Открытие литиевых структур на поверхности холодных CP-звезд , связанных со структурами магнитного поля, привело к открытию литиевых зон (пятен) вблизи магнитных полюсов дипольного магнитного поля звезды (Шаврина и др., 2001).

3 Программа наблюдений

Программа наблюдений лития в CP-звездах , которая была поставлена на БТА, имела следующие цели:

1. Тестовые наблюдения – поиски линий лития $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ в спектрах отобранных CP-звезд .
2. Наблюдения медленновращающихся gAr-звезд (с узкими линиями) ($v_r \sin i < 10 \text{ км/с}$).
3. Мониторинг быстро вращающихся ($v_r \sin i > 10$) для изучения поведения линии лития 6708 \AA с фазой вращения – поиски CP-звезд с “литиевыми” Li-пятнами .
4. Идентификация слабых линий REE вблизи линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ в спектрах медленно вращающихся CP-звезд .
5. Определение содержания Li , используя линии $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ и $\text{Li I } 6103 \text{ \AA}$, с учетом магнитного поля.
6. Определение отношения изотопов ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$, используя линию 6708 \AA .

Эта долговременная программа предназначена для увеличения количества наблюдательных данных по литию и для построения базы данных CP-звезд в спектральных областях $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ и $\text{Li I } 6103 \text{ \AA}$ с целью лучшего понимания аномального поведения этих линий в CP-звездах .

4 Наблюдения и обработка наблюдений на БТА (2003–2009)

Наблюдения были выполнены в НЭСМИТ-фокусе 6-м телескопа с эшелле-спектрометром “NES” (Панчук, Ключкова, 2002) в спектральной области 6000–6800 с отношением S/N 60–100.

Для обработки спектров был использован пакет программ “Reduce” (Пискунов, Валентини, 2002).

1. **Тестовые наблюдения** позволили нам добавить несколько новых звезд с линией лития 6708 \AA к старому списку: HD 62140, HD 65339, HD 176232, HD 107612, HD 149822, HD 169842. Некоторые из этих звезд короткопериодические, и мы планируем выполнить мониторинг этих звезд с фазой вращения для изучения поведения Li I линии.
2. **gAr-CP-звезды с узкими линиями.** Звезды 33 Lib, HD 134214, HD 166473 – медленно вращающиеся ($V \sin i < 10 \text{ км/с}$), очень богаты REE-линиями и имеют сильные поля (от 1500–5000) – подтвердили полученные ранее результаты и не показали вращательной переменности сильной линии лития $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$. На рис. 2 приведены оригинальные спектры этих звезд, показавшие высокое содержание лития в атмосферах указанных звезд по обеим линиям лития $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$, $\text{Li I } 6103 \text{ \AA}$ с учетом магнитного поля, причем более высокое содержание лития получено по

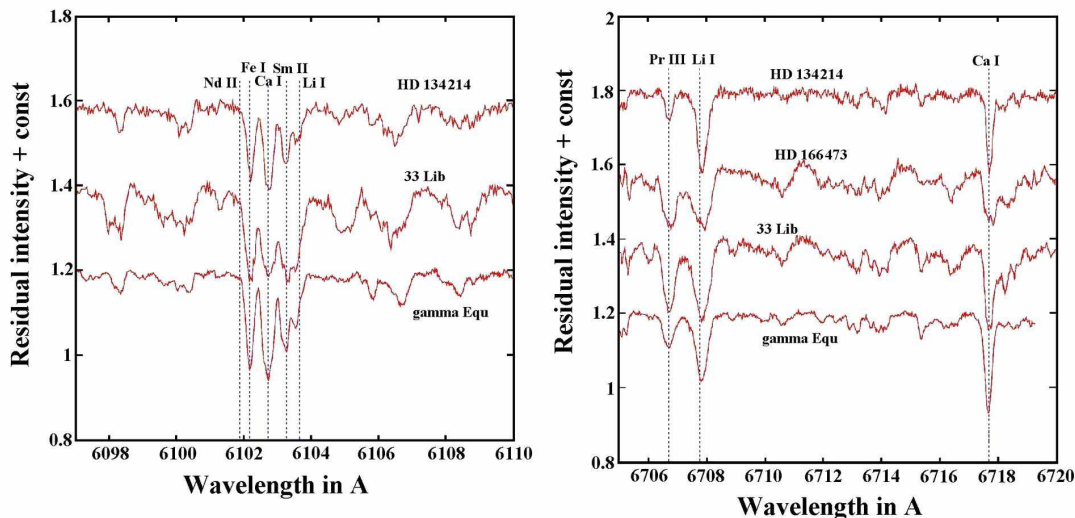


Рис. 2. Оригинальные спектры анализируемых гоАр-звезд с узкими линиями HD 134214, HD 166473, HD 137919 (33 Lib), HD 201001 (g Equ) в двух областях вблизи линии лития 6103 Å (слева) и 6708 Å (справа)

линии 6103. Количественный анализ атмосфер этих звезд и модельные расчеты выполнены в работе (Шаврина и др., 2006).

Для уточнения полученных результатов нужны новые наблюдения этих и других СР-звезд с уточненными значениями сил осцилляторов REE линий, блендирующих линии лития.

5 Метод выделения переменных деталей в спектре (метод дисперсограмм)

Чтобы представить переменность спектра более очевидной, мы рассчитываем спектр “переменно-сти” как величину дисперсии значений интенсивности в каждой длине волны I_i от среднего значения интенсивности I_{mean} :

$$\sigma_{obs} = \frac{1}{I_{mean}} \sqrt{\frac{\sum (I_i - I_{mean})^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

где I_i – значение интенсивности спектров звезды в отдельных длинах волн (i), I_{mean} – соответственно среднее значение интенсивности в этих длинах волн, n – число наблюдаемых спектров.

Дисперсограммы были построены для тестовых звезд и остальных наблюдаемых звезд.

На рисунке 3 мы показываем примеры дисперсограмм для медленно вращающихся звезд с постоянной линией лития Li I 6708 Å: HD 134214, HD 166473, 33 Lib.

3. **Быстровращающиеся Ар-СР звезды** ($V \sin i > 10$ km/sec) HD 65339, HD 169842 HD 12098. Среди этих звезд следует отметить особо HD 12098 ($m = 8.0$, FO), в спектре которой была обнаружена сильная и переменная линия лития 6708 Å, что привело к открытию у первой на северном полушарии осциллирующей гоАр-СР-звезды “литиевых” пятен с аномально высоким содержанием лития (до 4.0 dex).

Из рисунков 4, 5 следует очевидность подобия переменности спектров HD 12098 и HD 60435 (классическая гоАр-СР звезда с литиевыми пятнами).

Количественный анализ и модельные расчеты выполнены в работах (Шаврина и др., 2008).

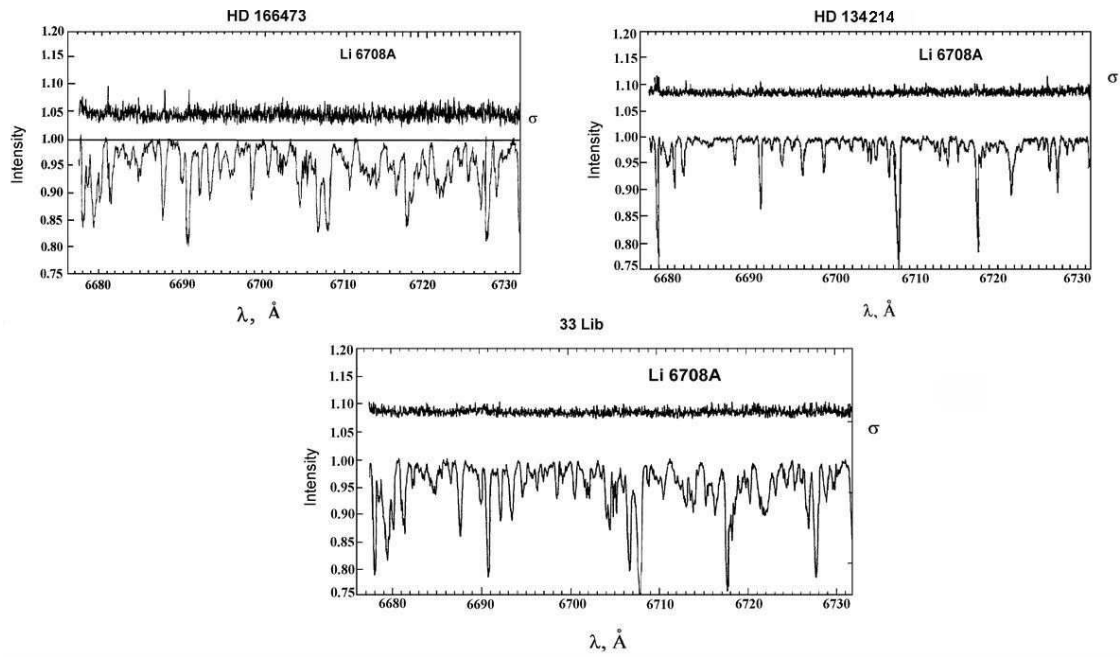


Рис. 3. Примеры дисперсограмм для медленно вращающихся звезд с постоянной линией лития Li I 6708 Å HD 134214, HD 166473, 33 Lib

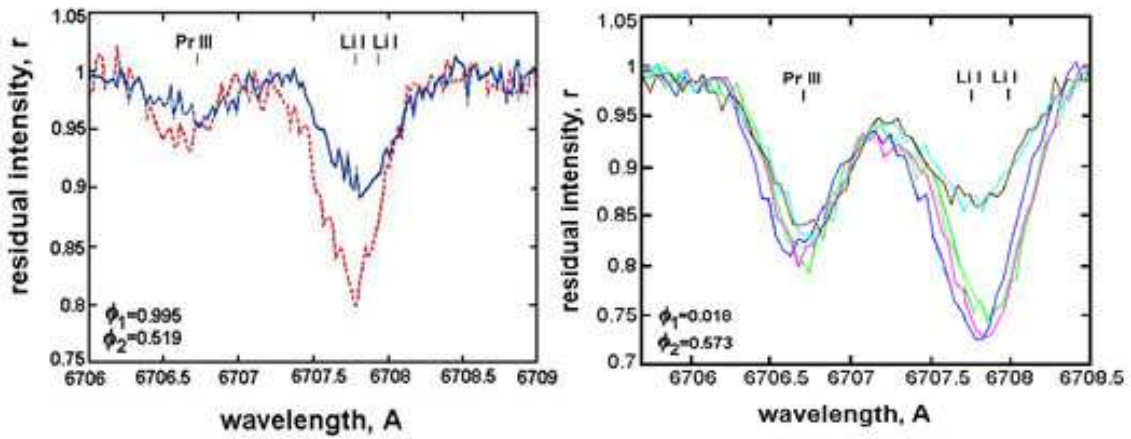


Рис. 4. Спектры HD 60435 (слева) и HD 12098 (справа) в области линии лития 6708 Å для фаз вращения вблизи 0.0 и 0.5

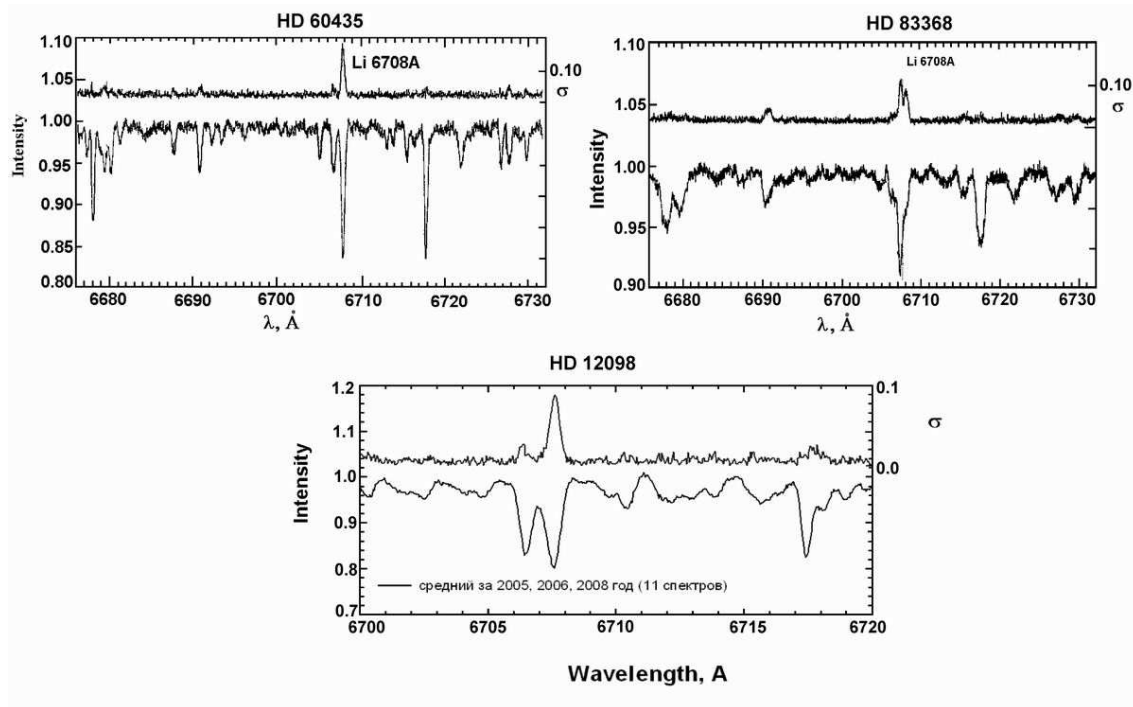


Рис. 5. Дисперсограммы для пятнистых CP-звезд HD 60435, HD 83368 и HD 12098

6 Заключение

- * Дисперсограммы отчетливо продемонстрировали различное поведение линии лития в спектрах медленновращающихся и быстро вращающихся α Ar-Cr-звезд.
- * Наблюдения CP-звезд на БТА подтвердили постоянство интенсивности линии лития Li I 6708 Å в спектрах медленно вращающихся звезд в сравнении с наблюдаемыми в ESO (Норт, 1996). Анализ спектров и модельные расчеты наблюдаемых звезд HD 134214, 33 Lib, HD 166473 показали:
 - * Содержание лития, определенное по субординатной линии 6103 Å несколько выше, чем определенное по резонансной линии лития 6708 Å для всех указанных в этой группе звезд.
 - * Изотопический состав ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ лития слегка отличается от одной звезды к другой и превышает отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ для солнечной атмосферы и космическое содержание лития.
- * По наблюдениям на БТА спектров звезды HD 12098 в области Li I 6708 Å были обнаружены сильные изменения линии Li I 6708, свидетельствующие об открытии еще одной Ar-Cr-звезды с литиевыми пятнами. Рис. 4 отчетливо показывает идентичность поведения спектров HD 12098 со звездой HD 60435 (классическая α Ar-звезда с литиевыми пятнами).
- * Дисперсограммы для HD 12098 и “запятненных литиевых звезд” HD 83368 и HD 60435 отчетливо демонстрируют подобную переменность спектра этих звезд, а также показывают, что амплитуда изменений интенсивности линии лития 6708 Å существенно больше амплитуды изменения интенсивности линий REE Nd III, Pr III, Ce II и др. Этот метод – дополнительное свидетельство принадлежности бледны 6708 Å линии Li I 6708 Å и свидетельство различия вертикальной стратификации лития и REE-линий в CP-звездах с магнитными полями.
- * В завершение данного исследования приводим таблицу результатов определения содержания лития по спектрам БТА и CAT(ESO) (Шаврина и др., 2008).
- * Повышенное содержание лития может быть обусловлено физическими процессами, препятствующими перемешиванию звездного вещества и сохранению в атмосфере его первоначального высокого содержания подавлением конвекции магнитными полями в сочетании с амбиполярной

Таблица 1. Таблица результатов содержания лития в α Ар-Ср-звездах

	HD 101065	HD 134214	HD 137949	HD 137949	HD 166473	HD 201601
$T_{eff} \log g / [m]$	6600/4.2/0	7500/4.0/0	7750/4.5/0	7250/4.5/0	7750/4.0/0	7750/4.0/0
N(Li)6708 Å	3.1	3.9	4.1	3.6	3.6	3.8
N(Li)6103 Å	3.5	4.1	4.4	4.4	4.0	4.0
${}^6Li/{}^7Li, 6708 \text{ \AA}$	0.4:	0.3:	0.2:	0.3:	0.4:	0.5:

Таблица 2. Таблица лития в HD 12098

N	Longitude	Latitude	R	$\epsilon(Li)$
1	30°	-20°	40°	5.0
2	10°	25°	70°	7.05
3	175°	-25°	790°	3.85

диффузией. Другая возможность – это реальные процессы возникновения лития в звездных атмосферах, например, в реакциях скалывания (spallation reactions), при которых ускоренные в магнитных полях протоны и альфа-частицы разрушают более тяжелые атомы C, N, O, и в результате этих реакций продуцируется литий (Гориэлли, 2007).

Литература

- Ламберт Д., Соер С. (Lambert D., Sawyer S.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 283. P. 192.
 Валленштайн, Хак (Wallerstein G., Hack M.) // *Observatory.* 1964. V. 84. P. 160.
 Гориэлли (Goriely S.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 466. P. 619.
 Норт и др. (North P., Polosukhina N., Malanushenko V., Hack M.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 333. P. 644.
 Панчук В., Пискунов Н., Ключкова В. и др. // *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.* 2002.
 Пискунов Н., Валентини (Piskunov N., Valenti J.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 385. P. 1095.
 Полосухина Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1973. Т. 47.
 Полосухина Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1974. Т. 50.
 Полосухина Н. и др. (Polosukhina D., Kurtz M., Hack M., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 351. P. 283.
 Полосухина Н., Шаврина А. // *Астрофизика.* 2008. Т. 50. Выпуск 3.
 Фараджина и др. (Faraggina R., Gerbaldi M., Delmos F.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1996. V. 238. P. 169.
 Хак, Фараджина (Hack M., Faraggina N.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 1963.
 Шаврина А., Полосухина Н. и др. // *Астрон. журн.* 2006. №. 83. С. 560.
 Шаврина А., Полосухина Н., Драке Н., Кудрявцев Д. // *Астрофизика.* 2008. Т. 51. Выпуск 4. С. 607.
 Шаврина А. и др. (Shavrina A., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 372. P. 507.