

УДК 523.4

## О линиях поглощения тория в видимой области спектров сверхгигантов Магеллановых Облаков

*В.Ф. Гопка*<sup>1</sup>, *А.В. Шаврина*<sup>2</sup>, *В.А. Ющенко*<sup>1</sup>, *С.В. Васильева*<sup>1</sup>,  
*А.В. Ющенко*<sup>3</sup>, *С.М. Андриевский*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИИ “Астрономическая обсерватория”, Одесский национальный университет, Одесса, Украина, 65014  
*gopkava@mail.ru*

<sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
*shavrina@mao.kiev.ua*

<sup>3</sup> Sejong University, Seoul, Republic of Korea, 143-747  
*avyushchenko@gmail.com*

Поступила в редакцию 8 января 2013 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования линий поглощения тория в спектрах звезд с дефицитом металлов: обогащенной торием звезды гало Галактики HD221170, сверхгигантов Магеллановых Облаков. Идентификация выполнялась на основании сравнения синтетических спектров с наблюдаемыми спектрами для каждой из исследуемых звезд. В спектрах сверхгигантов Магеллановых Облаков отождествлены линия Th II 6044.433 Å и более слабая линия Th II 6619.943 Å.

ON THE THORIUM ABSORPTION LINES IN THE VISUAL SPECTRAL DOMAIN OF SUPERGIANTS OF THE MAGELLANIC CLOUDS, *by V.F. Gopka, A.V. Shavrina, V.A. Yushchenko, S.V. Vasil'eva, A.V. Yushchenko, S.M. Andrievsky.* The thorium absorption lines in spectra of the metal-deficient stars: Th-rich Galactic halo star HD221170 and supergiants in the Magellanic Clouds are presented. The identification of Th II lines was performed by comparison of the synthetic spectra with the observed ones for each of the investigated stars. Thorium line Th II 6044.433 Å and a weaker thorium line Th II 6619.943 Å in spectra of red supergiants of the Magellanic Clouds were identified.

**Ключевые слова:** звезды и звездные системы; Магеллановы Облака; звезды: HD221170, красные сверхгиганты, химический состав, торий

---

## 1 Введение

В данной работе рассмотрены результаты поиска линий поглощения тория в спектрах звезд поздних спектральных классов с дефицитом металлов в видимой области спектра. Торий, элемент с атомным номером  $Z = 90$ , является самым тяжелым элементом, содержание которого определено в атмосфере Солнца,  $lg\epsilon_{Th} = 0.02 \pm 0.10$ , что близко к содержанию в метеоритном веществе  $lg\epsilon_{Th} = 0.06 \pm 0.03$ , в шкале  $lg\epsilon_H = 12$  (Асплунд и др., 2009).

Торий входит в группу актиноидов (элементы с атомными номерами 89–103), которые являются радиоактивными элементами. Согласно работе Фрая и Тоенессена (2012), в настоящее время известен 31 изотоп тория ( $^{208}\text{Th}$  –  $^{238}\text{Th}$ ), и предполагается, что можно идентифицировать еще

около 70 изотопов. Время жизни недавно открытых изотопов измеряется секундами и миллисекундами. Отличительной особенностью изотопов тория является то, что наиболее распространенный изотоп тория  $^{232}\text{Th}$  является изотопом с наибольшим (среди актиноидов) периодом полураспада  $\tau = 14.05 \pm 0.06$  млрд лет (Ауди и др., 2009).

При исследовании атмосфер звезд, содержание элементов в которых близко к их содержанию в атмосфере Солнца, доминирующими линиями в спектрах являются линии элементов группы железа. Относительно слабые линии тория, расположенные в синей части спектра, где плотность линий особенно высока, теряются в сильных линиях других элементов. Но ситуация резко меняется для звезд с дефицитом содержания элементов группы железа и повышенным содержанием тория: в спектрах этих звезд наблюдается линия поглощения, которая по длине волны точно совпадает с резонансной линией ионизированного тория  $\lambda 4019.129 \text{ \AA}$ , а блендирующие ее линии Ni I  $\lambda 4019.067 \text{ \AA}$ , Fe I  $\lambda 4019.043 \text{ \AA}$ , Ce II  $\lambda 4019.057 \text{ \AA}$  ослаблены. Именно такие звезды гало Галактики с дефицитом металлов, обогащенные тяжелыми элементами нейтронного захвата (Th-rich stars), были изучены в работах Снеден и др. (1996), Хилл (1997), Хилл и др. (2002), Ющенко и др. (2005), Родерер и др. (2009), Рен и др. (2012), Машонкина и др. (2010).

Согласно теории образования химических элементов, изотопы тория образуются в результате r-процесса. Место протекания r-процесса не определено достаточно четко, но наиболее вероятным местом протекания процесса является взрыв сверхновой II типа. Понимание процессов нуклеосинтеза, в результате которых образуются торий, является одним из ключевых моментов как теории эволюции элементов, так и теорий эволюции звезд и галактик.

В настоящее время нет однозначных ответов на многие вопросы эволюционных теорий. Одинаков ли механизм возникновения тория (элемента r-процесса) в нашей Галактике и в других галактиках, или реализуются разные пути образования этих элементов? Образовались ли звезды гало из материи, обогащенной элементами r-процесса (в том числе тория) в результате сброса вещества при взрыве сверхновой в двойной (тройной, кратной) системе, и допустимо ли говорить о локальном обогащении? А возможно, это звезды, образованные из вещества, неоднородно обогащенного продуктами взрыва сверхновых первой генерации звезд в местах их образования. Возможны ли альтернативные сценарии обогащения звездных атмосфер торием, например, распад более тяжелых, чем торий и уран, элементов, или другие процессы, сильно изменившие наблюдаемые содержания тория в атмосферах звезд?

Важным аспектом исследования тория является его роль в космохронологии. Собственно говоря, сама космохронология возникла при установлении связи содержания тория в атмосферах звезд с возрастом этих звезд. Позже, с появлением более качественного спектрального материала, для этих целей стало использоваться и содержание урана ( $Z = 92$ ).

Возраст – это важная характеристика звезды, в ряде случаев космохронология дает результат, полностью совпадающий с возрастом, определенным другими методами, например в работе Гопки и др. (1999) для Аркура. Казалось, что очень просто ответить на вопрос, каков возраст старых звезд Галактики, если известны скорость радиоактивного распада тория и урана –  $\tau = 14.05 \pm 0.06$  и  $\tau = 4.468 \pm 0.003$  млрд лет для наиболее распространенных изотопов тория  $^{232}\text{Th}$  и урана  $^{238}\text{U}$  соответственно (Ауди и др., 2009), и соотношение обилий тория и урана в исследуемых звездах. Но насколько точным является принятое начальное соотношение содержаний тория и урана или тория и европия, большинство изотопов которого также образовано в результате r-процесса? К сожалению, значение этих соотношений известно с большой неопределенностью (Шац и др., 2002).

Одной из актуальных задач астрофизики является объяснение механизмов обогащения атмосфер звезд Галактики элементами r-процесса, одним из наилучших индикаторов которого является торий – элемент, образованный исключительно в результате r-процесса, наиболее долгоживущий изотоп которого имеет время полураспада, сравнимое с возрастом Галактики. Последнее десятилетие было периодом активного накопления информации о содержании тория в звездных атмосферах с использованием не только резонансной линии тория Th II  $\lambda 4019.129 \text{ \AA}$ , блендированной линией железа, никеля, церия, но и других линий тория, интенсивности которых существенно меньше, что обусловило использование наблюдательного материала с высоким спектральным разрешением и отношением сигнала к шуму.

## 2 Идентификация линий тория в видимой области спектров звезд

Идентификация линий тория и урана в звездных спектрах проводилась нами ранее в спектрах Прокциона (Гопка, Ющенко, 1994; Гопка и др., 1995), Арктура (Гопка и др., 1999), HD221170 (Ющенко и др., 2005), звезды Пшибыльского (Гопка и др., 2005а), красных сверхгигантов Магеллановых Облаков (Гопка и др., 2005b, 2007).

В данной работе проведен поиск линий тория в видимой и красной областях спектров звезды гало Галактики HD221170, красных сверхгигантов Магеллановых Облаков и Арктура. Длинноволновая часть спектра выбрана для исследования ввиду меньшего блендирования линий тория линиями поглощения других элементов.

### 2.1 Наблюдения

Одна из ярких ( $V = 7^m7$ ) звезд гало Галактики HD221170 наблюдалась на 1.93-метровом телескопе обсерватории От-Прованс (Франция) с помощью спектрографа SOPHIE. Спектр имеет спектральное разрешение  $R = 75000$  в диапазоне длин волн  $\lambda\lambda$  3900–6800 Å и взят из архивных данных SOPHIE (Перручот и др., 2008).

Изучение сверхгигантов Магеллановых Облаков, звездные величины которых заключены в интервале  $V = 12^m4$ – $13^m4$ , было проведено по наблюдениям, полученным Хилл на 3.6-метровом телескопе ESO (Чили) со спектральным разрешением  $R = 20000$ – $30000$  в диапазоне длин волн  $\lambda\lambda$  5900–7100 Å (Хилл, 1997).

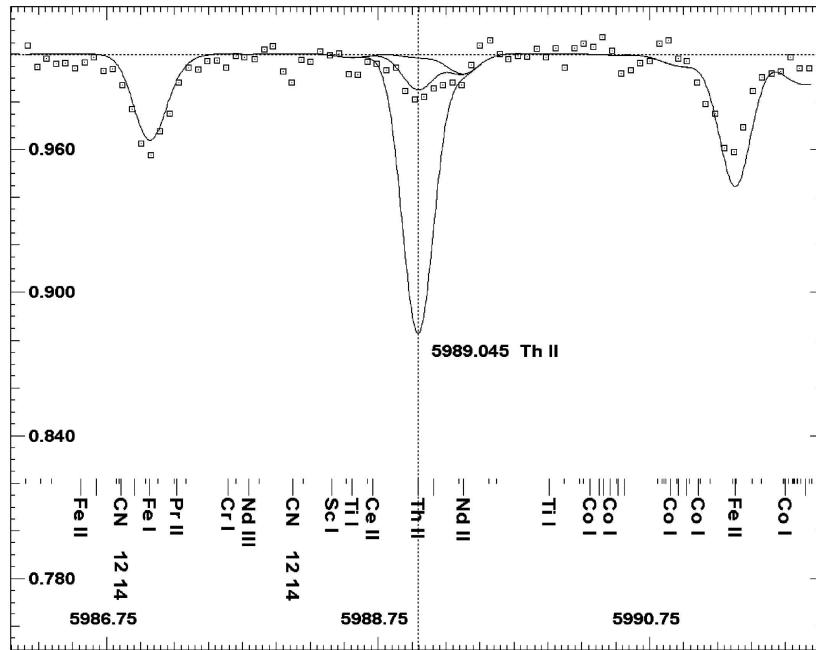
Использовались также наблюдения HD221170 на 2-метровом телескопе обсерватории Терскол (Ющенко и др., 2005) и атлас спектра Арктура (Хинкль и др., 2000).

### 2.2 Линии поглощения тория в спектре звезды HD 221170

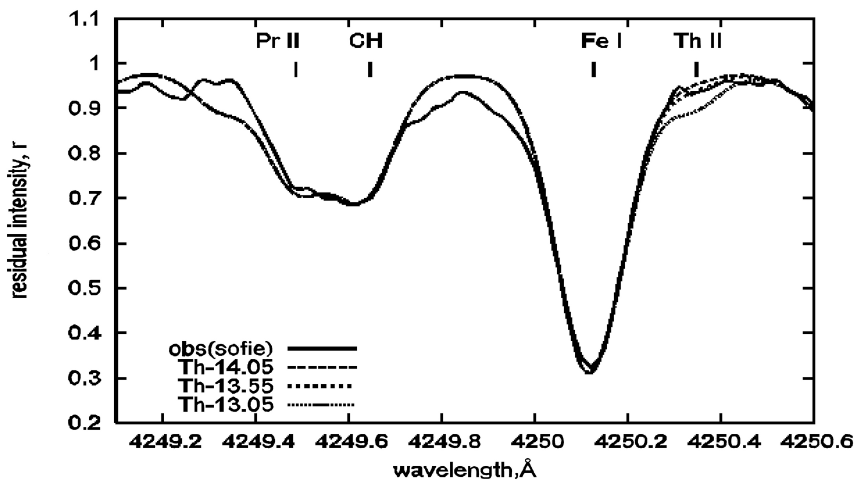
Методика, применяемая нами при анализе спектров разных спектральных классов, в частности при идентификации спектральных линий, основана на сравнении наблюдаемых спектров исследуемых звезд как с синтетическими спектрами, так и с наблюдаемыми спектрами хорошо изученных звезд близких спектральных классов. Анализ содержания химических элементов, выполненный Гопкой и др. (2001) по эквивалентным ширинам линий методом моделей атмосфер для нескольких звезд гало (HD221170, HD37828, HD44008) и Арктура, показал, что звезды HD37828, HD44008 и Арктур имеют аналогичный ход кривых распространенности элементов, но для звезды HD221170 уже в районе лантаноидов наблюдается различие: химический состав более тяжелых элементов показал избыточное содержание.

Предварительный анализ химического состава HD221170 был сделан в работе Ющенко и др. (2002). В работе Гопки и др. (2004) определены значения эффективной температуры  $T_{\text{eff}} = 4475$  К, ускорения силы тяжести  $\log g = 1.0$ , микротурбулентной скорости  $v_{\text{micro}} = 1.7$  км с<sup>-1</sup>, макротурбулентной скорости  $v_{\text{macro}} = 4$  км с<sup>-1</sup>, и содержания железа в атмосфере звезды  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.03$ . Новые наблюдения, полученные на 2-метровом телескопе обсерватории на пике Терскол, показали, что HD221170, как звезда с избыточным содержанием тяжелых элементов, имеет в своем спектре большое количество очень слабых, на уровне шумов, линий тория (Ющенко и др., 2005). Остаточная интенсивность этих линий приближалась к 0.99.

Наиболее сильная, отобранная Ющенко и др. (2005) в видимой области спектра звезды HD221170 линия ионизированного тория  $\lambda$  5989.045 Å, была изучена в ряде работ с использованием высокодисперсионных спектров (Иванс и др., 2006; Аоки и др., 2007). Эквивалентная ширина этой линии в спектре HD221170 не превышает 2–2.5 мÅ, остаточная интенсивность в наблюдаемом спектре близка к 0.98. Как показано на рис. 1, остаточная интенсивность линии сильно меняется при изменении содержания тория. Чтобы сравнить чувствительность этой линии к изменению химического состава, дана для сравнения линия тория на длине волны 4250.091 Å, менее чувствительная к содержанию тория (рис. 2).



**Рис. 1.** Наблюдаемая линия поглощения тория в спектре HD221170 на длине волны  $\lambda$  5989.045 Å (кружки) и синтетические спектры, рассчитанные для трех значений содержаний тория – наилучшей аппроксимации и  $\pm 0.5$  dex от наилучшей (линии). Для построения синтетических спектров использовался комплекс программ URAN (Ющенко, 1998) и программа расчета синтетического спектра Куруца (1993)



**Рис. 2.** Наблюдаемый спектр HD221170 (полученный на 1.93-метровом телескопе обсерватории От-Прованс, спектрограф SOPHIE) и его аппроксимация синтетическими спектрами, рассчитанными для разных содержаний тория (длина волны  $\lambda$  4250.091 Å, атомные данные VALD). Использовалась программа построения синтетического спектра Цымбала (1996). Наилучшее согласие наблюдаемого и синтетического спектра достигается при содержании тория  $\log \epsilon_{Th} = -1.55$  (табл. 1)

**Таблица 1.** Содержание тория в атмосфере HD221170

$\lambda$ ( $\text{\AA}$ )	$\log gf$	$E_{low}$ (eV)	$\log \epsilon_{Th}$ Synt.	Eq. W ( $m\text{\AA}$ )	$\log \epsilon_{Th}$ WIDTH9
4250.091	0.00	0.557	-1.55		
5989.045	-1.414	0.189	-1.46	2.5	-1.41

Отметим, что эквивалентная ширина линии тория  $\lambda$  5989.045  $\text{\AA}$  в спектре красного гиганта COS 82, являющегося членом карликовой галактики Местной Группы в Большой Медведице, составляет около 30  $m\text{\AA}$ , что позволило Аоки и др. (2007) впервые определить содержание тория в объекте, находящемся за пределами Млечного Пути.

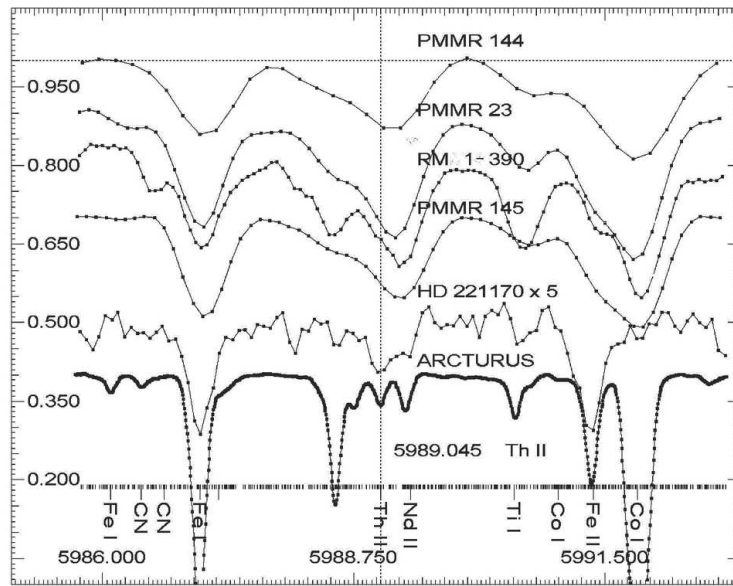
### 2.3 Идентификация линий тория в спектрах сверхгигантов Магеллановых Облаков

Ближайшие к нам и меньшие по размерам и массе галактики Большое и Малое Магеллановы Облака (БМО и ММО) являются спутниками нашей Галактики. Наблюдательные факты свидетельствуют, что Галактика и МО являются прежде всего взаимодействующими галактиками, в результате чего появляются потоки газа, движущиеся с большой скоростью и соединяющие эти системы. Детальное картирование нейтрального водорода HI показало наличие газовых потоков между нашей Галактикой и МО, между БМО и ММО (Ставели-Смит и др., 1997). Хорошо известен поток газа, соединяющий Большое и Малое Магеллановы Облака – Магелланов Поток (Magellanic Bridge).

Среди упомянутых трех галактик (Млечный Путь, или наша Галактика, Большое и Малое Магеллановы Облака) ММО является сильным и наиболее устойчивым источником рентгеновского излучения. В настоящее время зарегистрировано более 50 систем массивных двойных систем с детектируемым рентгеновским излучением (НМХВ) в ММО (Коэ и др., 2010) и лишь 64 таких источника в Млечном Пути, который превосходит ММО по массе примерно в 50 раз. Как полагают Коэ и др. (2010), существование в ММО большого количества НМХВ, в состав которых могут входить остатки сверхновых, свидетельствует о приливном взаимодействии менее массивного ММО с БМО во время их последнего сближения, которое произошло около 100 миллионов лет тому назад и явилось причиной вспышки звездообразования в ММО. Быстро проэволюционировавшие массивные звезды обогатили межзвездную среду ММО тяжелыми элементами, которые сейчас можно детектировать в наблюдаемых спектрах сверхгигантов этой галактики.

Действительно, исследование химического содержания атмосфер 5 сверхгигантов в ММО показали, что содержание железа  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.69 \pm 0.10$  dex, содержание тяжелых элементов избыточно, а средний избыток содержания La, Ce, Nd, Eu по отношению к железу равен 0.4 dex (Хилл, 1997). Обогащение тяжелыми элементами четко обнаруживается в атмосферах пяти из шести исследуемых (Хилл, 1997) сверхгигантов, за исключением PMMR144, показавшей большой дефицит железа. При исследовании звезды методом синтетического спектра нами использовались: эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 4100$  К, ускорение силы тяжести  $\log g = -0.7$ , микротурбулентная скорость  $v_{\text{micro}} = 4$  км  $\text{s}^{-1}$ , макротурбулентная скорость  $v_{\text{macro}} = 9$  км  $\text{s}^{-1}$ . Значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести были взяты из работы Хилл (1997), микротурбулентная скорость на 0.5 км  $\text{s}^{-1}$  больше значения, найденного в этой работе.

Выполненный нами методом синтетического спектра анализ содержаний химических элементов в атмосфере PMMR144 показал избыточное содержание элементов, изученных ранее, и позволил исследовать более тяжелые элементы, в частности торий (рис. 3). В видимом диапазоне спектра PMMR144 идентифицировано три линии тория, которые показали практически одинаковое содержание этого элемента при вычислениях, проведенных как методом синтетического спектра, так и методом моделей атмосфер с использованием сил осцилляторов Нильсона и др. (2002). Полученные значения обилий тория приведены в табл. 2.



**Рис. 3.** Линия Th II  $\lambda$  5989.045 Å в наблюдаемых спектрах сверхгигантов Магеллановых Облаков и звезд с дефицитом металлов в Галактике – HD221170 и Арктура. Спектры сдвинуты вдоль оси абсцисс, остаточные интенсивности в спектре HD221170 (спектр получен на обсерватории пика Терскол) увеличены в пять раз

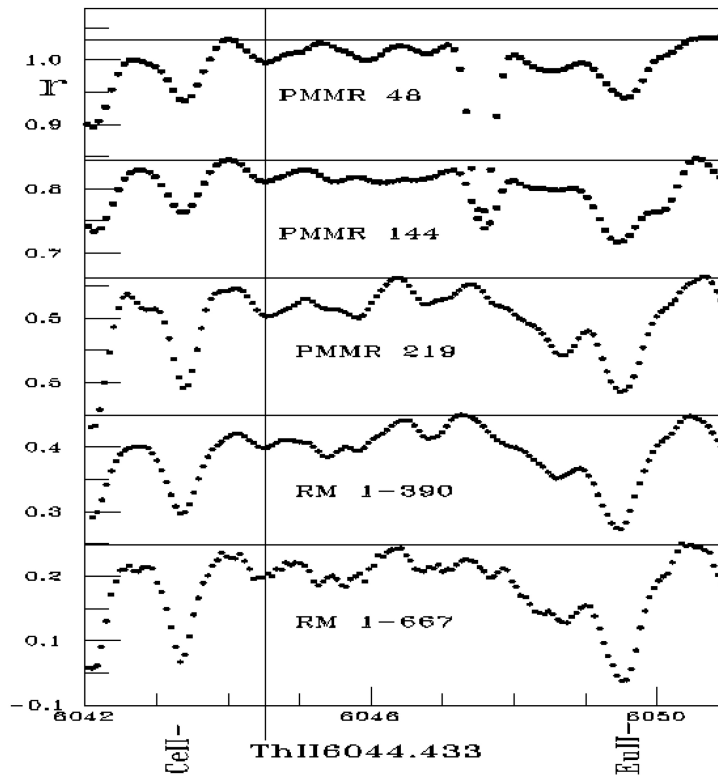
**Таблица 2.** Содержание тория в атмосфере PMMR144

$\lambda$ (Å)	$\log gf$	$E_{low}$ (eV)	$\log \epsilon_{Th}$ Synt.	Eq. W (mÅ)	$\log \epsilon_{Th}$ WIDTH9
5989.045	-1.414	0.189	-0.66	102	-0.56
6044.433	-1.860	0.514	-0.64	20	-0.76
6619.944	-1.812	0.514	-0.66	11	-0.65

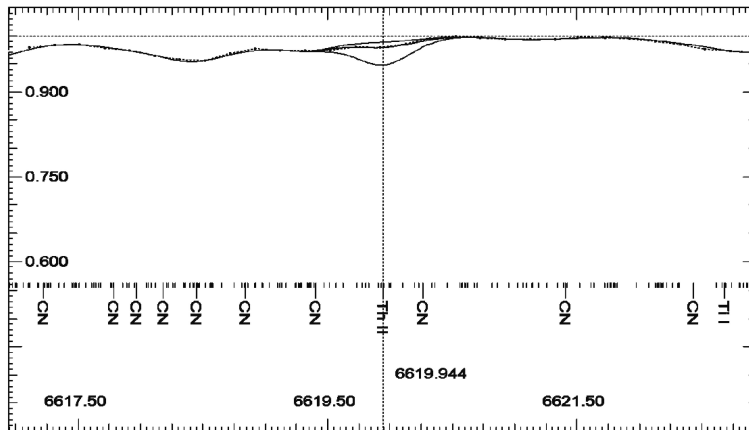
Наиболее сильной является линия ионизированного тория  $\lambda$  5989.045 Å, которая блендируется линией Nd II (рис. 3), поэтому оценка эквивалентной ширины линии этой линии тория проводилась по зависимости эквивалентных ширин неблендированных линий от их остаточных интенсивностей.

Линии тория Th II  $\lambda$  6044.433 Å и Th II  $\lambda$  6619.944 Å – более слабые, но четко идентифицируются в спектрах как PMMR144, так и других сверхгигантов МО (рис. 4, 5, 6). Исследование кинематических свойств звезд и газа в Малом Магеллановом Облаке (Мартин и др., 1989) показало разделение этой галактики на несколько областей с различными лучевыми скоростями нейтрального и ионизированного водорода и лучевыми скоростями звезд. PMMR144 входит в число звезд, расположенных в областях с повышенной скоростью водорода, линия  $H_{\alpha}$  в ее спектре показывает четкие, симметрично расположенные эмиссионные компоненты, наблюдаемые и в других звездах ММО, принадлежащих группе высокоскоростных звезд (H-звезды).

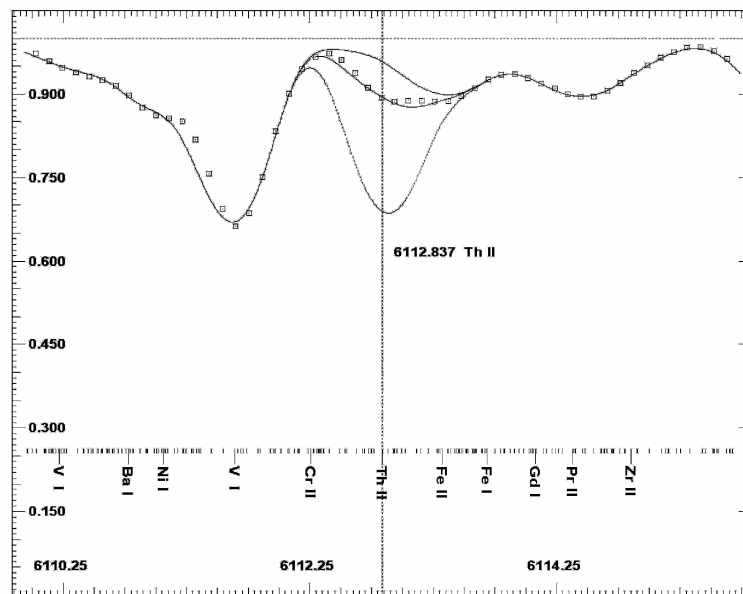
Звезда PMMR23, исследованная ранее Гопкой и др. (2005b, 2007), входит в группу звезд с низкими скоростями, линии тория в ее спектре также усилены и их больше по количеству, содержание тория близко к солнечному значению. Рисунок 6 показывает линию тория  $\lambda$  6112.837 Å в спектре PMMR23 и ее аппроксимацию синтетическим спектром, вычисленным при содержании тория  $\log \epsilon_{Th} = 0.22$ .



**Рис. 4.** Линия Th II  $\lambda$  6044.433 Å в наблюдаемых спектрах сверхгигантов Магеллановых Облаков, эквивалентные ширины линии в спектрах звезд Магеллановых Облаков около 20 mÅ



**Рис. 5.** Аппроксимация линии тория Th II  $\lambda$  6619.944 Å в наблюдаемом спектре сверхгиганта PMMR144 (точки) синтетическим спектром (линии). Наилучшее приближение соответствует содержанию тория  $\log \epsilon_{Th} = -0.6$ , показаны также синтетические спектры, вычисленные при значениях содержания тория, отличающихся от наилучшего значения на  $\pm 0.5$  dex. Использовался комплекс программ URAN (Ющенко, 1998)



**Рис. 6.** Аппроксимация линии тория Th II  $\lambda$  6112.837 Å в наблюдаемом спектре сверхгиганта PMMR23 (квадраты) синтетическим спектром (линии). Наилучшее приближение соответствует содержанию тория  $\log \epsilon_{Th} = +0.22$ , показаны также синтетические спектры, вычисленные при значениях содержания тория, отличающихся от наилучшего значения на  $\pm 0.5$  dex

### 3 Заключение

По спектрам, полученным на 1.93-метровом телескопе обсерватории От-Прованс, спектрограф SOPHIE, определено содержание тория для субгиганта гало HD221170  $\log \epsilon_{Th} = -1.5 \pm 0.04$  dex, что подтверждает результат, полученный в работе Иванс и др. (2006). Идентифицированная нами ранее линия тория  $\lambda$ 5989.045 Å показывает большую чувствительность к изменению содержания тория, чем другие слабые линии (Ющенко и др., 2005).

Содержание тория в атмосфере сверхгиганта PMMR144 равно  $\log \epsilon_{Th} = -0.65 \pm 0.01$  dex. Дефицит содержания тория по отношению к его содержанию в атмосфере Солнца на 0.4 dex меньше дефицита содержания железа.

Идентифицированы линии тория в видимой области спектров сверхгигантов Магеллановых Облаков – линия Th II на длине волны  $\lambda$ 6044.433 Å и более слабая линия  $\lambda$ 6619.944 Å.

Исследованная нами ранее звезда PMMR23 показала более сильные линии тория в видимом спектре и большее количество линий тория, чем PMMR144. Содержание тория в атмосфере PMMR23 близко к солнечному содержанию этого элемента (Гопка и др., 2005b, 2007).

Линии тория, идентифицированные в видимой и красной областях спектра, использованы для исследования содержания тория в звездах с повышенным содержанием тяжелых элементов, входящих в состав Большого и Малого Магеллановых Облаков. Обращено внимание на возможное существование взаимосвязи между обилиями тяжелых элементов в исследованных сверхгигантах ММО, их скоростями, положениями в этой галактике и областями нейтрального и ионизированного водорода.

### 4 Благодарности

Эта работа была частично поддержана грантом по программам “Mid-career and General Researcher Programs” и грантами “Science and Technology” 2011-0028001 и 2011-00106996 NRF Министерства



образования Кореи. В.А.Ю. и С.М.А. поддержаны грантом NSF Швейцарии (SCOPE5), проект IZ73Z0-128180/1. Авторы благодарят В.В. Цымбала и авторов базы данных VALD за возможность использования их программных продуктов.

## Литература

- Аоки и др. (Aoki W., Honda S., Sadakane K., Arimoto N.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2007. V. 59. P. 15.
- Асплунд и др. (Asplund M., Grevesse N., Sauval A., Scott P.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. V. 47. P. 481.
- Ауди и др. (Audi G., Bersillon O., Blachot J., Wapstra A.H.) // *Nucl. Phys.* 2009. V. 729. P. 5.
- Гопка и др. (Gopka V.F., Vasil'eva S.V., Yushchenko A.V., Andrievsky S.M.) // *Odessa Astron. Publ.* 2007. V. 20. P. 58.
- Гопка и др. (Гопка В.Ф., Ющенко А.В., Шаврина А.В., Переход А.В.) // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1999. Т. 15. С. 447.
- Гопка и др. (Gopka V.F., Yushchenko A.V., Dulapchi I.F.) // *ASP Conf. Ser.* 1995. V. 81. P. 568.
- Гопка и др. (Gopka V.F., Yushchenko A.V., Mishenina T.V., Kovtykh V.V.) // *Odessa Astron. Publ.* 2001. V. 14. P. 237.
- Гопка и др. (Gopka V.F., Yushchenko A.V., Mishenina T.V., et al.) // *Astronomy Reports.* 2004. V. 48. P. 577.
- Гопка и др. (Gopka V.F., Yushchenko A.V., Shavrina A.V., Mkrtichian D., et al.) // *IAU Symp.* 2005a. № 224. P. 734.
- Гопка и др. (Gopka V.F., Yushchenko A.V., Andrievsky S.M., et al.) // *IAU Symp.* 2005b. № 228. P. 535.
- Гопка, Ющенко (Gopka V.F., Yushchenko A.V.) // *Astron. Lett.* 1994. V. 20. P. 453.
- Иванс и др. (Ivans I.I., Simmerer J., Sneden C., et al.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 645. P. 613.
- Коэ и др. (Coe M.J., Bird A.J., Buckley D.A.H., et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 406. P. 2533.
- Куруц (Kurucz R.) // *CD-ROM No. 1–18. Smithsonian Astrophysical Obs. Cambridge. MA.* 1993.
- Мартин и др. (Martin N., Maurice E., Lequeut J.) // *Astron. Astrophys.* 1989. V. 215. P. 219.
- Машонкина и др. (Mashonkina L.I., Christlieb N., Barklem P.S., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 516. P. 46.
- Нильсон и др. (Nilsson H., Zhang Z.G., Lundberg S., Nordstrom B.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 382. P. 368.
- Перручот и др. (Perruchot S., Kohler D., Bouchy F., et al.) // *Conf. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II / Eds McLean I.S., Casali M.M. Proceedings of the SPIE.* 2008. V. 7014. P. 70140J.
- Рен и др. (Ren J., Christlieb N., Zhao G.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 537. P. 118.
- Родерер и др. (Roederer I.U., Kratz K.L., Frebel A., et al.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 698. P. 1963.
- Снеден и др. (Sneden C., McWilliam A., Preston G., et al.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 467. P. 819.
- Ставели-Смит и др. (Staveley-Smith L., Saul R.J., Hatzidimitrion D., Kesteven M.J., McConnell D.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1997. V. 289. P. 225.
- Фрай, Тоеннессен (Fry C., Thoennesen M.) // *Eprint.* 2012. arXiv:1203.1194.
- Хилл (Hill V.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 324. P. 435.
- Хилл и др. (Hill V., Plez B., Cayrel R., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 387. P. 560.
- Хинкль и др. (Hinkle K., Wallace L., Valenti J., Harmer D.) // *ASP Conf. Ser. San Francisco.* ISBN: 1-58381-037-4. 2000.
- Цымбал (Tsymbal V.) // *ASP Conf. Ser.* 1996. V. 108. P. 198.
- Шац и др. (Schatz H., Toenjes R., Pfeiffer B., et al.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 579. P. 626.
- Ющенко (Yushchenko A.V.) // *Proceedings of the 20-th Stellar Conf. of the Czech and Slovak Astronomical Institute. 5–7th November 1997. Brno. Czech Republic. / Ed. Dusek. J. Brno.* 1998. ISBN 80-85882-08-6. P. 201.

Ющенко и др. (Yushchenko A.V., Gopka V.F., Kim Chulhee, et al.) // J. Kor. Astron. Soc. 2002. V. 35. P. 209.

Ющенко и др. (Yushchenko A.V., Gopka V.F., Goriely S., et al.) // Astron. Astrophys. 2005. V. 430. P. 255.