

УДК 524.3

Сверхтяжелые элементы в атмосферах магнитных звезд

Л.С. Любимков

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,
АР Крым, Украина, 98409
lyub@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 26 сентября 2013 г.

Аннотация. Исследование содержаний сверхтяжелых химических элементов в магнитных звездах было стимулировано в Крымской астрофизической обсерватории запуском космической станции “Астрон” в 1983 году, что позволило получать ультрафиолетовые спектры таких звезд. В настоящем кратком обзоре обсуждаются содержания очень тяжелых элементов (Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U) в атмосферах магнитных Ap-звезд и HgMn-звезд. Эти результаты были получены по спектрам звезд как в видимой, так и в ультрафиолетовой области. Данные, накопленные в течение более чем 30 лет, показывают, что для этих звезд характерны большие избытки таких элементов, достигающие 6–7 dex. Отмечается следующий важный факт: аномалии сверхтяжелых элементов являются продолжением тренда в аномалиях, характерных для менее тяжелых элементов. Поэтому можно предположить, что все эти аномалии, включая большие избытки сверхтяжелых элементов, имеют одно и то же объяснение. Кратко обсуждаются некоторые нерешенные проблемы.

SUPERHEAVY ELEMENTS IN ATMOSPHERES OF MAGNETIC STARS, *by L.S. Lyubimkov.* Study of abundances of superheavy chemical elements in magnetic stars was stimulated in the Crimean astrophysical observatory by a launching of the space station “Astron” in 1983, that allowed ultraviolet spectra of such stars to be obtained. In the present short review the abundances of very heavy elements (Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th and U) in atmospheres of magnetic Ap stars and HgMn stars are discussed. These results were inferred from spectra of the stars both in visual and ultraviolet regions. Data accumulated during more than 30 years show that the large overabundances of such elements, up to 6–7 dex, are typical for these stars. The following important fact is noted: anomalies of superheavy elements are a continuation of the trend in anomalies that are incident to less heavy elements. Therefore, one may suppose that all these anomalies including the large excesses of superheavy elements have the same explanation. Some unresolved problems are discussed briefly.

Ключевые слова: Ap-звезды, HgMn-звезды, химический состав, сверхтяжелые элементы

1 Введение

Академик А.Б. Северный, 100-летие которого отмечалось в 2013 году, в своих исследованиях магнитных полей на звездах проявлял интерес не только к магнитным свойствам таких звезд, но и к другим их физическим особенностям. В 1980-х годах его особенно заинтересовали

содержания очень тяжелых элементов в атмосферах этих звезд, что было связано с запуском космической станции “Астрон” в 1983 году (А.Б. Северный был инициатором ее создания). Основной целью запуска было исследование ультрафиолетовых спектров звезд, а многие линии элементов, о которых идет речь, как раз находятся в ультрафиолетовой области спектра.

В данном кратком обзоре рассматриваются самые тяжелые из найденных в природе химических элементов, которые в периодической таблице элементов Менделеева заканчиваются ураном. Эти элементы – Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U с атомными номерами Z от 78 до 92, иногда называют сверхтяжелыми. В атмосферах большинства звезд их содержания очень малы; они на много порядков меньше содержаний самых легких элементов – H, He или C, N и O. В спектре Солнца их линии либо очень слабы, либо совсем не видны, поэтому солнечные содержания известны не для всех сверхтяжелых элементов.

Таблица 1. Содержания некоторых сверхтяжелых элементов в фотосфере Солнца и в метеоритах (Асплунд и др., 2009)

| Элемент | Z | $\log \varepsilon(\text{El})$ Солнце | $\log \varepsilon(\text{El})$ метеориты |
|---------|-----|---|--|
| Pt | 78 | – | 1.62±0.03 |
| Au | 79 | 0.92±0.10 | 0.80±0.04 |
| Hg | 80 | – | 1.17±0.08 |
| Tl | 81 | 0.90±0.20 | 0.77±0.03 |
| Pb | 82 | 1.75±0.10 | 2.04±0.03 |
| Bi | 83 | -0.02±0.10 | 0.65±0.04 |
| Th | 90 | – | 0.06±0.03 |
| U | 92 | – | -0.54±0.03 |

Однако содержания всех названных элементов определены с высокой точностью для метеоритов (хондритов). Учитывая, что химический состав метеоритов в целом показывает очень хорошее согласие с химическим составом фотосферы Солнца, можно принять метеоритное содержание указанных элементов в качестве солнечного, то есть нормального. Как солнечные, так и метеоритные содержания представлены в обзоре Асплунда и др. (2009). В табл. 1 приведены взятые из этого обзора солнечные содержания (там, где они известны), а также метеоритные содержания ряда сверхтяжелых элементов, рассмотренных в данном обзоре. Использована стандартная логарифмическая шкала, где для водорода принято содержание $\log \varepsilon(\text{H}) = 12.00$.

2 Данные, полученные на станции “Астрон”

До запуска станции “Астрон” (март 1983 г.) предпринимались попытки идентифицировать линии некоторых сверхтяжелых элементов по видимой области спектра для ряда магнитных Ар-звезд. Как было отмечено в работе Северного и Любимкова (1986), эти попытки обычно носили качественный характер и, за редкими исключениями, не приводили к каким-либо уверенным количественным оценкам. В качестве исключений можно указать определение содержания урана для Ар-звезды HR 465 (Каули и Хартуг, 1972) и содержания висмута для HgMn-звезды HR 7775 (Джекобс и Дворецкий, 1982); здесь был обнаружен большой избыток U и Bi ~ 6 dex. Каули (1977) нашел избытки платины ~ 5 dex для нескольких Ар-звезд. Следует отметить также определение содержания ртути для 21 HgMn-звезды, выполненное Хикоксом (1979); здесь был получен избыток Hg, достигающий 6–7 dex. Благодаря этим первым работам возникло предположение, что содержания сверхтяжелых элементов в атмосферах магнитных

Ar-звезд и HgMn-звезд очень сильно повышены. Этот факт, в случае его подтверждения, мог бы сыграть важную роль в понимании природы этих химически пекулярных звезд.

Запуск станции “Астрон” в 1983 г. позволил предпринять в КрАО поиск таких элементов по спектрам в ультрафиолетовой области. В частности, проводился поиск линий U II 2556.19 Å, Th II 2368.05 Å и Pb II 2203 Å в спектрах некоторых магнитных Ar-звезд. О первых результатах Северный и Любимков (1986) доложили на Коллоквиуме МАС № 90 “Звезды верхней части главной последовательности с аномальными содержаниями”, состоявшемся в мае 1985 г. в Крымской астрофизической обсерватории. Дополнительные детали можно найти в сборнике по “Астрону”, изданному под редакцией Боярчука (1994, см. с. 214–219).

Полученные из наблюдений на станции “Астрон” УФ-спектры в области названных линий урана, тория и свинца были сравнены с синтетическими спектрами, рассчитанными по программе SYNTHEL (Любимков, 1986а). В расчетах учитывались инструментальный профиль и скорость вращения звезды. Наиболее детально анализировались спектры трех звезд; это магнитные Ar-звезды 73 Dra ($T_{eff} = 8150$ К) и ω Oph ($T_{eff} = 9500$ К), а также HgMn-звезда κ Snc ($T_{eff} = 13600$ К). Следует отметить, что эффективные температуры T_{eff} этих звезд заметно различаются, что сыграло важную роль при анализе их спектров.

Действительно, как показали расчеты, интенсивности исследуемых линий сильно зависят от T_{eff} ; с ростом T_{eff} эти линии быстро ослабевают. Поэтому наиболее уверенные результаты из трех названных звезд были получены в случае наиболее холодной звезды 73 Dra (это магнитная переменная Ar-звезда типа SrCrEu). В частности, для нее по линии U II 2556.19 Å было найдено содержание урана $\log \epsilon(U) = 4.4$, что на 4.9 dex больше современной оценки для метеоритов (табл. 1). Важно, что высокое содержание урана для 73 Dra вскоре было подтверждено по линии U II 3859.58 Å в видимой области спектра; ее анализ дал значение $\log \epsilon(U) = 4.1$, что соответствует избытку урана 4.6 dex (Илиев и др., 1986). Отметим, что различие в содержании U между линиями в УФ и видимой области спектра может быть обусловлено не только неточностями в атомных данных для этих линий, но и существованием пятен химического состава на поверхности 73 Dra. В частности, переменность линий Eu II в течение периода вращения звезды 73 Dra свидетельствует о вариациях содержания европия около 0.7 dex (Любимков, 1986б). Если на поверхности 73 Dra существуют пятна урана, тогда линии U должны быть переменными и показывать разное содержание U в зависимости от фазы вращения звезды.

Высокое содержание урана, найденное для 73 Dra как по видимой, так и по УФ-области спектра, явилось одним из первых уверенных подтверждений того, что избыток этого самого тяжелого элемента в атмосферах магнитных Ar-звезд может достигать величины ~ 5 dex.

Содержания Th и Pb в атмосфере 73 Dra, как оказалось, превышают солнечное содержание более чем на 3 dex. Было отмечено, что отсутствие линии U II 2556.19 Å и линий других сверхтяжелых элементов в УФ-спектрах более горячих Ar-звезд вовсе не свидетельствует о низком содержании этих элементов; вследствие сильной зависимости от T_{eff} отчетливые их линии могут наблюдаться лишь при достаточно больших избытках этих элементов.

3 Магнитные Ar-звезды

Спустя 10 лет после упомянутого выше Коллоквиума МАС № 90 в Крыму была опубликована книга “Химический состав звезд” (Любимков, 1995), в которой были суммированы накопленные к тому времени сведения о химическом составе звезд разных типов, в том числе магнитных Ar-звезд. На рис. 1, заимствованном из этой книги, представлены содержания многих элементов с атомными номерами Z от 6 до 64 для двух магнитных звезд – α^2 CVn и 41 Tau (точнее, здесь приведена разница в содержаниях $\log \epsilon$ между звездой и Солнцем). Из этого рисунка видна следующая важная особенность, общая для магнитных Ar-звезд: наличие

тренда в содержании элементов, заключающегося в увеличении избытка с ростом атомного номера Z . Такой тренд приводит к тому, что наиболее тяжелые элементы на рис. 1, редкие земли Ce-Gd с $Z = 58-64$, показывают избыток ~ 4 dex. И это не предел для редкоземельных элементов; например, для Ар-звезды HD 147010 с сильным переменным магнитным полем получен избыток 5 dex (Бейли и Ландстрит, 2013а).

Экстраполируя указанный тренд на сверхтяжелые элементы с $Z \sim 80-90$, можно ожидать для них повышения содержаний на 5–6 dex. Теперь становится вполне объяснимым высокий избыток урана ~ 5 dex, полученный на станции “Астрон” для Ар-звезды 73 Dra.

Обсуждая содержания сверхтяжелых элементов в атмосферах магнитных Ар-звезд, следует отметить работу Каули и др. (2000), в которой были определены содержания 54 элементов для уникальной звезды HD 101065, известной как звезда Пшибыльского (Przybylski’s star). Она имеет следующие параметры: $T_{eff} = 6600$ К и $\log g = 4.2$. Содержания элементов определены для двух значений параметра микротурбулентности $V_t = 1$ и 2 км/с. Для сверхтяжелых элементов эти два случая мало различаются, поэтому в табл. 2 приводятся средние содержания $\log \epsilon(EI)$. В ее последнем столбце даны избытки в содержаниях пяти элементов – Pt, Au, Hg, Th и U, определенные с помощью данных табл. 1. Все избытки оказались близкими к 3 dex.

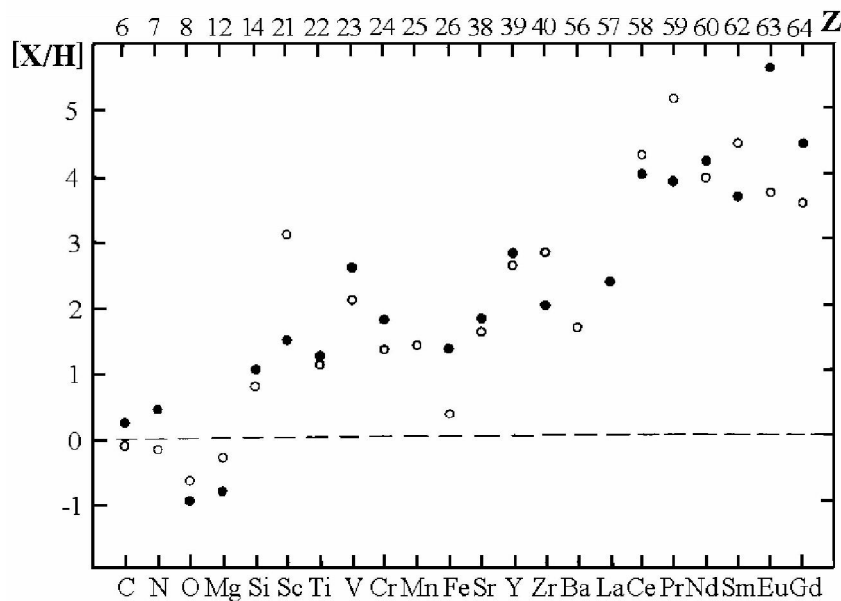


Рис. 1. Разница в содержаниях элементов между двумя Ар-звездами и Солнцем (здесь $[X/H] = \log \epsilon(X)_{star} - \log \epsilon(X)_{Sun}$). Заполненные кружки соответствуют звезде α^2 CVn, открытые кружки – звезде 41 Tau (Любимков, 1995). Видно, что избытки элементов в среднем увеличиваются с ростом атомного номера Z

Интересно сравнить эти данные с содержаниями менее массивных редкоземельных элементов от La до Dy, полученными в той же работе. Избытки этих элементов (при $V_t = 2$ км/с) относительно метеоритных содержаний (последние практически не отличаются от солнечных содержаний, см. Асплунд и др., 2009) оказались очень близкими к избыткам сверхтяжелых элементов. Это хорошо видно из табл. 3, из которой следует, что у звезды Пшибыльского нет никакого заметного систематического различия при переходе от редких земель к сверхтяжелым элементам.

Сверхтяжелые элементы в атмосферах магнитных звезд

Интересно, что в спектре звезды Пшибыльского, а также Ар-звезды HR 465 заподозрено присутствие линий некоторых радиоактивных элементов, в частности, радия (Ra, $Z = 88$) и актиния (Ac, $Z = 89$) (Куинет и др., 2007). Некоторые гипотезы, объясняющие возможное наличие в атмосферах этих звезд короткоживущих радиоактивных изотопов, обсуждаются в работах Гопки и др. (2006, 2008).

Таблица 2. Содержание сверхтяжелых элементов в атмосфере звезды Пшибыльского (Каули и др., 2000)

| Атом или ион | Z | Число линий | $\log \epsilon(EI)$ | Избыток $[E/H]$ |
|--------------|-----|-------------|---------------------|-----------------|
| Pt I | 78 | 4 | 4.60 ± 0.25 | 3.0 |
| Au I | 79 | 1 | 3.88: | 3.1 |
| Hg I | 80 | 2 | 4.28 ± 0.10 | 3.1 |
| Th II | 90 | 13 | 2.80 ± 0.18 | 2.7 |
| U II | 92 | 1 | 2.28: | 2.8 |

Таблица 3. Сравнение избытков редкоземельных и сверхтяжелых элементов для звезды Пшибыльского

| Элементы | Число элементов | Атомные номера Z | Избытки $[E/H]$ | Средний избыток |
|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Редкие земли | 9 | 57–66 | 2.4–3.3 | 2.9 ± 0.3 |
| Сверхтяжелые | 5 | 78–92 | 2.7–3.1 | 2.9 ± 0.2 |

Для указанной выше звезды HR 465 было оценено содержание урана по 7 линиям в видимой области спектра (Каули и Хартуг, 1972). В среднем по этим линиям получилось содержание $\log \epsilon(U) = 5.57 \pm 0.35$, что соответствует избытку урана $[U/H] = 6.1$ dex. В УФ-спектре HR 465 были идентифицированы линии еще двух сверхтяжелых элементов – висмута и платины, однако содержания Bi и Pt не анализировались (Каули, 1987). Выше уже отмечалось, что Каули (1977) нашел избытки платины ~ 5 dex для нескольких Ар-звезд.

Просмотр литературы показывает, что содержания сверхтяжелых элементов определены для небольшого числа магнитных Ар-звезд. Некоторые авторы ограничивались тем, что просто сообщали о присутствии в спектрах некоторых Ар-звезд линий таких элементов, но не определяли их содержания. Возможно, малое число определений связано с тем обстоятельством, что исследования таких звезд уже давно показали наличие пятен химического состава на их поверхности. После открытия пятен исследователи потеряли интерес к определению усредненного химического состава Ар-звезд; вместо этого, анализируя вариации спектральных линий, они стали строить карты распределения элементов по поверхности. К сожалению, для сверхтяжелых элементов такие карты еще не строились.

4 Ртутно-марганцевые звезды

Магнитные Ар-звезды входят в более обширный класс химически пекулярных звезд (CP-звезд). К этому классу относятся также Am-звезды и B-звезды типов HgMn, He-weak и He-rich (два последних типа, как видно из их названия, имеют аномалии гелия). Не у всех таких CP-звезд обнаружены магнитные поля. В частности, долгое время считалось, что ртутно-марганцевые звезды не имеют заметных магнитных полей. В последние годы такой вывод о HgMn-звездах подвергался сомнению, однако единого мнения по этому вопросу нет до сих пор (см., например, дискуссию в работе Кочухова и др., 2013). По-видимому, если у HgMn-звезд и существует глобальное поле, оно мало; однако не исключена возможность существования

более сильных локальных полей, связанных с какими-то структурами на поверхности звезд (аналогия – пятна на поверхности Солнца).

Несмотря на то, что у HgMn-звезд не найдено сильных магнитных полей, у них обнаружены такие же сильные аномалии сверхтяжелых элементов, как и у магнитных Ap-звезд. Например, содержания Pt, Au, Hg, Tl и Bi в атмосфере HgMn-звезды HR 7775, исследованные по спектрам как в видимой, так и УФ-области, показали для всех пяти элементов избыток 4–5 dex (Валгрэн и др., 2000, 2001). Интересно отметить существование тренда в химических аномалиях HgMn-звезд, аналогичного тренду для магнитных Ap-звезд (рис. 1).

Примером детального исследования химического состава HgMn-звезды может служить работа Лекрона и др. (1999), в которой были определены содержания 51 элемента для звезды χ Lup, включая несколько сверхтяжелых элементов. В табл. 4 приведены содержания пяти сверхтяжелых элементов в атмосфере этой звезды, найденные по линиям Pt II, Au II, Hg II, Tl II и Bi II в УФ-области спектра. Избытки этих элементов, найденные по отношению к метеоритным содержаниям (табл. 1), варьируются от 1.55 dex в случае висмута до 5.07 dex в случае ртути.

Таблица 4. Содержание сверхтяжелых элементов в атмосфере HgMn-звезды χ Lup (Лекрон и др., 1999)

| Элемент | Z | $\log \alpha(EI)$ | Избыток [E/H] |
|---------|----|-------------------|---------------|
| Pt | 78 | 6.05 | 4.43 |
| Au | 79 | 5.26 | 4.46 |
| Hg | 80 | 6.24 | 5.07 |
| Tl | 81 | 4.66 | 3.89 |
| Bi | 83 | 2.20 | 1.55 |

Таблица 5. Содержание Au в атмосферах четырех HgMn-звезд (Адельман и др., 2004)

| Звезда | T_{eff} | $\log g$ | $\log \alpha(Au)$ | Избыток [E/H] |
|--------------|-----------|----------|-------------------|---------------|
| κ Cnc | 13470 | 3.8 | 5.15 | 4.35 |
| HR 7775 | 10750 | 4.0 | 6.07 | 5.27 |
| χ Lup | 10680 | 3.9 | 5.77 | 4.97 |
| HR 3383 | 9750 | 4.0 | 2.77 | 1.97 |

В табл. 5 приведено содержание золота в атмосферах четырех HgMn-звезд, найденное по УФ-спектрам (Адельман и др., 2004). Из сравнения с метеоритным содержанием (табл. 1) следует, что две звезды в этой таблице, а именно HR 7775 и χ Lup, показывают избыток золота ~ 5 dex. С другой стороны, у HR 3383 аномалия Au существенно меньше – всего лишь 2 dex. Такой разброс подтверждает, что в содержаниях сверхтяжелых элементов у HgMn-звезд могут существовать значительные вариации. Следует отметить разницу около 0.5 dex между значениями $\log \alpha(Au)$ для звезды χ Lup в таблицах 4 и 5.

Наиболее подробно из всех сверхтяжелых элементов у HgMn-звезд исследовано содержание ртути (Hg, Z = 80). Согласно оценкам, полученным для 26 HgMn-звезд по УФ-спектрам, содержание ртути $\log \alpha(Hg)$ варьируется в очень широких пределах – от 2.0 до 6.8–6.9 (Смит, 1997). Из сравнения с метеоритным значением (табл. 1) следует, что наблюдаемый избыток ртути [Hg/H] меняется среди этих звезд от 0.8 до 5.7 dex. Таким образом, снова подтверждается тот факт, что в содержаниях сверхтяжелых элементов у разных HgMn-звезд могут существовать сильные различия.

5 Некоторые нерешенные проблемы

Перечислим ряд нерешенных проблем по рассмотренной теме, которые требуют дальнейшего исследования.

1. Каково происхождение больших аномалий сверхтяжелых элементов, достигающих 6–7 dex?

Как известно, синтез сверхтяжелых элементов возможен в результате быстрого захвата нейтронов (r -процесс), который требует специфических условий и происходит, например, при взрыве сверхновой. Такие условия невозможно осуществить в обычной звездной атмосфере.

Ответ на поставленный вопрос следует искать на основе рис. 1, который показывает, что даже максимальные аномалии этих элементов $\sim 6\text{--}7$ dex не выглядят резким диссонансом на фоне избытков, характерных для менее тяжелых элементов, например, редких земель (их избытки могут достигать 4–5 dex). Они являются лишь продолжением общего тренда в химических аномалиях CP-звезд. Это обстоятельство позволяет предположить, что очень большие избытки сверхтяжелых элементов в атмосферах CP-звезд, казавшиеся поначалу загадочными, имеют то же самое объяснение, что и аномалии менее тяжелых элементов.

Наиболее вероятное объяснение, принятое в настоящее время, – это процесс диффузии, который обусловлен совместным действием гравитации, радиативного давления и, возможно, магнитного поля. Процесс диффузии приводит к тому, что атомы легких элементов в наружных слоях звезды опускаются вниз (в этом случае преобладает действие гравитации), а атомы тяжелых элементов поднимаются вверх (здесь доминирует световое давление). В результате химические аномалии демонстрируют тренд, пример которого представлен на рис. 1. Следует подчеркнуть, что диффузия затрагивает только поверхностные слои звезды и не влияет на химический состав ее глубоких слоев. Чтобы подтвердить это предположение, необходимо выполнить соответствующие расчеты для атомов сверхтяжелых элементов.

2. Выше было отмечено, что как среди магнитных Ap-звезд, так и среди HgMn-звезд при максимальных избытках сверхтяжелых элементов $\sim 6\text{--}7$ dex наблюдается, тем не менее, большой разброс в их содержаниях.

Какова причина такого большого разброса?

Аналогичный вопрос возникает и в отношении менее тяжелых элементов, в частности, редких земель. Например, избыток Eu ($Z = 63$) у магнитных Ap-звезд типа SrCrEu варьируется в диапазоне от 2 до 6 dex (Смит, 1996). Напомним, что все рассматриваемые звезды находятся на стадии главной последовательности (ГП), когда в ядре звезды горит водород. Возможно, что уже в начале этой стадии CP-звезды имеют разные содержания тяжелых и сверхтяжелых элементов, показывающие сильные вариации от звезды к звезде.

Другое возможное объяснение – эволюция наблюдаемого химического состава CP-звезды в течение стадии ГП. Недавно появилось краткое сообщение об открытии эволюции содержания некоторых элементов в течение этой стадии (Бейли и Ландстрит, 2013b). Обнаружено уменьшение содержаний Ti, Cr, Fe, Pr и Nd в атмосферах магнитных Ap-звезд при эволюции от начала ГП к концу этой стадии. Если это открытие подтвердится, возникает гипотеза, что уменьшение наблюдаемого содержания в течение фазы ГП имеет место и для сверхтяжелых элементов. Тогда CP-звезды вблизи завершения фазы ГП должны показывать меньшие избытки, чем CP-звезды в начале ГП.

Чтобы проверить эту гипотезу, следует выполнить сначала для группы CP-звезд аккуратные определения двух фундаментальных параметров – эффективной температуры T_{eff} и ускорения силы тяжести $\log g$. Затем с помощью эволюционных треков по найденным величинам T_{eff} и $\log g$ определяются масса M и относительный возраст t/t_{MS} звезд (здесь t – абсолютный возраст, а t_{MS} – время жизни на ГП звезды с массой M). Следует подчеркнуть, что высокая точность параметра $\log g$ особенно важна для аккуратного определения возраста t/t_{MS} ; такую точность в

оценке $\log g$ для достаточно близких звезд обеспечивает применение звездных параллаксов (Любимков и др., 2010, 2013). Далее следует сравнить содержания $\log \varepsilon$ для звезд в начале ГП ($t/t_{MS} \sim 0$) и в конце ГП ($t/t_{MS} \sim 1$). Если будет обнаружено систематическое различие в значениях $\log \varepsilon$, это послужит подтверждением изложенной выше гипотезы.

3. Как уже отмечалось, многие элементы у CP-звезд с магнитными полями показывают неоднородное распределение по поверхности. Иначе говоря, на поверхности таких звезд наблюдаются пятна с повышенным содержанием этих элементов. Часто расположение таких пятен связано с конфигурацией магнитного поля: пятна одних элементов расположены в районе магнитных полюсов, пятна других элементов, напротив, избегают полюсов. В качестве примера можно указать магнитную Ap-звезду HD 3980, для которой были построены карты распределения для 13 элементов от Li ($Z = 3$) до Gd ($Z = 64$) (Несвасил и др., 2012). Интересно, что некоторые HgMn-звезды, несмотря на отсутствие заметного магнитного поля, подобно магнитным Ap-звездам демонстрируют пятна на своей поверхности. Примером служит звезда ϕ Phe (HD 11753), для которой по периодической переменности спектральных линий Cr, Ti, Y и Sr был сделан вывод о существовании пятен названных элементов (Макаганюк и др., 2012).

Существуют ли пятна сверхтяжелых элементов на поверхности Ap-звезд? На этот вопрос пока нет ответа.

Для решения этой проблемы следует провести поиск периодической переменности линий указанных элементов. Необходимо получить спектры высокого разрешения в области таких линий для разных фаз периода вращения Ap-звезды. Несмотря на наличие ряда интересных линий в УФ-области, с практической точки зрения для решения подобной задачи лучше подходят спектральные наблюдения в видимой области, так как необходимо получать спектры звезды достаточно часто, с хорошим покрытием всего периода вращения (он может составлять лишь несколько дней). Хорошим кандидатом для таких наблюдений может быть, например, линия Th II 4019.13, которую Любимков и Саванов (1985), а затем Любимков и Рачковская (1986) использовали для анализа содержания тория в четырех Am-звездах и четырех переменных типа δ Sct (эти пульсирующие звезды классов A и F тоже имеют пекулярный химический состав). При этом для пяти из восьми исследованных звезд, показавших довольно резкую линию Th II 4019.13, были найдены избытки тория $[Th/H] = 1.2-1.6$. Поскольку в случае магнитных Ap-звезд возможны избытки сверхтяжелых элементов до 5–6 dex, линия Th II 4019.13 в их спектрах может оказаться довольно сильной.

4. Стратификация элементов по глубине – еще одна особенность CP-звезд с магнитными полями. В качестве примера можно указать исследование стратификации многих элементов в атмосфере Ap-звезды 10 Aql; в частности, были найдены сильные изменения с глубиной в содержаниях Ca и Sr – до 6 dex (Несвасил и др., 2013).

Существует ли стратификация сверхтяжелых элементов в атмосферах Ap-звезд? Этот вопрос не исследован.

5. Дискуссия, изложенная выше, затрагивает относительно холодные CP-звезды, а именно: магнитные звезды спектральных классов A и F ($T_{eff} \approx 6600-10000$ K) и HgMn-звезды ($T_{eff} \approx 10000-15000$ K). Существуют более горячие CP-звезды с магнитными полями (He-week, He-rich), для которых не исследованы содержания не только сверхтяжелых, но и просто тяжелых элементов. В их спектрах видны линии легких элементов – H, He, C, N, O, Si, но очень слабы или вовсе отсутствуют линии тяжелых или, тем более, сверхтяжелых элементов. Возможное решение проблемы – поиск и анализ соответствующих линий в УФ-области спектра.

Интересно отметить, что у некоторых вполне “нормальных” O- и ранних B-звезд ГП неожиданно были обнаружены магнитные поля порядка сотен гаусс и даже около 1500–1700 гаусс (см., например, Валдер и др., 2012). Возникает следующий вопрос: **Всегда ли наличие поля в звезде связано с химическими аномалиями?**

Сверхтяжелые элементы в атмосферах магнитных звезд

Если это так, тогда для упомянутых горячих O- и B-звезд ГП с магнитными полями, подобно более холодным магнитным Ap-звездам ГП, можно ожидать избытка тяжелых и сверхтяжелых элементов.

О возможном влиянии магнитного поля у некоторых O- и ранних B-звезд ГП на их наблюдаемый химический состав может свидетельствовать следующий факт. Как известно, в видимой области спектров O- и ранних B-звезд преобладают линии легких элементов – H, He, C, N и O. Анализ линий гелия и азота привел к заключению, что **к концу** стадии ГП может происходить заметное повышение содержаний He и N в атмосферах таких звезд (Любимков и др., 2004, 2008). Современная теория эволюции звезд объясняет такое повышение быстрым вращением достаточно массивных звезд, которое уже на стадии ГП приводит к выносу продуктов CNO-цикла из звездных недр на поверхность (см., например, Хегер и Лангер, 2000; Фришкнехт и др., 2010). Однако данные из обзора Морел (2012) говорят о том, что звезды классов O и B с магнитными полями показывают повышенное отношение N/C, то есть избыток азота, даже если эти звезды находятся **в начале** стадии ГП и имеют **медленное вращение**.

К сожалению, вследствие высоких температур ($T_{eff} \sim 20000\text{--}35000\text{ K}$) линии тяжелых элементов в видимой области спектров поздних O- и ранних B-звезд практически отсутствуют. Выход может состоять в том, чтобы искать линии ионов тяжелых (и сверхтяжелых) элементов в УФ-спектрах этих звезд.

6 Заключение

Исследования содержаний сверхтяжелых элементов Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U в атмосферах магнитных Ap-звезд и HgMn-звезд привели к выводу, что эти элементы показывают значительные избытки относительно солнечных и метеоритных значений. Эти избытки достигают 5–6 dex, даже 7 dex в случае ртути у HgMn-звезд. При этом аномалии в содержании одного элемента могут сильно варьироваться от звезды к звезде, а аномалии разных элементов могут показывать значительные вариации в атмосфере одной и той же звезды. Исключением является звезда Пшибыльского, где все исследованные сверхтяжелые элементы показали приблизительно одинаковый избыток ~ 3 dex.

Еще девять лет назад Адельман и др. (2004) писали, что аномалии сверхтяжелых элементов остаются крайне загадочными (“*The anomalies of the heaviest elements remain extremely mysterious*”). Однако теперь мы понимаем, что даже максимальные аномалии этих элементов $\sim 6\text{--}7$ dex не выглядят резким диссонансом на фоне избытков, характерных для менее тяжелых элементов, например, редких земель (избытки последних могут достигать 4–5 dex). Они являются лишь продолжением общего тренда в химических аномалиях CP-звезд, примером которого служит рис. 1. Это обстоятельство позволяет предположить, что очень большие избытки сверхтяжелых элементов в атмосферах CP-звезд, казавшиеся поначалу загадочными, имеют то же самое объяснение, что и аномалии менее тяжелых элементов. Наиболее вероятным объяснением химических аномалий, наблюдаемых в атмосферах CP-звезд, в настоящее время считается процесс диффузии, обусловленный совместным действием гравитации, радиативного давления и, возможно, магнитного поля.

Содержания сверхтяжелых элементов в атмосферах CP-звезд исследованы еще недостаточно, поэтому в этой проблеме остается ряд нерешенных вопросов. Перечислим кратко некоторые из них. Обнаружен значительный разброс в содержаниях некоторых сверхтяжелых элементов среди магнитных Ap-звезд и HgMn-звезд. Одно из возможных объяснений состоит в эволюции химического состава атмосфер таких звезд в течение стадии ГП. Чтобы проверить это предположение, следует сравнить содержания элементов для звезд в начале фазы ГП и в ее конце. Нет пока ответа на вопрос, существуют ли пятна сверхтяжелых элементов на поверхности рассматриваемых звезд. Совершенно не исследован вопрос о

возможной стратификации этих элементов по глубине в атмосферах звезд. Особый интерес представляет поиск линий сверхтяжелых элементов в УФ-спектрах более горячих CP-звезд типов He-weak и He-rich. Очевидно, что для решения перечисленных проблем могут потребоваться значительные усилия не только наблюдателей, но и теоретиков.

Литература

- Адельман и др. (Adelman S.J., Proffitt C.R., Wahlgren G.M., Leckrone D.S., Dolk L.) // *Astrophys. J. Suppl.* 2004. V. 155. P. 179.
- Асплунд и др. (Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., Scott P.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. V. 47. P. 481.
- Бейли и Ландстрит (Bailey J.D., Landstreet J.D.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013a. V. 432. P. 1687.
- Бейли и Ландстрит (Bailey J., Landstreet J.D.) // *American Astron. Soc. Meeting.* 2013b. N. 221. N. 443.02.
- Боярчук А.А. // *Астрофизические исследования на космической станции "Астрон"*. Наука: Москва. 1994.
- Валгрэн и др. (Wahlgren G.M., Dolk L., Kalus G., Johansson S., Litzen U.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 539. P. 908.
- Валгрэн и др. (Wahlgren G.M., Brage T., Brandt J.C., et al.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 551. P. 520.
- Валдер и др. (Walder R., Folini D., Meynet G.) // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 166. P. 145.
- Гопка и др. (Gopka V., Yushchenko A., Goriely S., Shavrina A., Woon Kang Y.) // *American Inst. Conf. Proc.* 2006. V. 847. P. 389.
- Гопка В.Ф., Ульянов О.М., Андриевский С.М. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2008. Т. 24. С. 50.
- Джекобс и Дворецкий (Jacobs J.M., Dworetzky M.M.) // *Nature.* 1982. V. 299. P. 535.
- Илиев И.Х., Любимков Л.С., Саванов И.С. // *Астрофизика.* 1986. Т. 25. С. 237.
- Каули (Cowley C.R.) // *Astrophys. J.* 1977. V. 213. P. 451.
- Каули (Cowley C.R.) // *Observatory.* 1987. V. 107. N. 1080. P. 188.
- Каули и Хартуг (Cowley C.R., Hartoog M.R.) // *Astrophys. J.* 1972. V. 178. P. L9.
- Каули и др. (Cowley C.R., Ryabchikova T., Kupka F., Bord D.J., Mathys G., Bidelman W.P.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2000. V. 317. P. 299.
- Кочухов и др. (Kochukhov O., Makaganiuk V., Piskunov N., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 554. A61.
- Куинет и др. (Quinet P., Argante C., Fivet V., Terranova C., Yushchenko A.V., Biemont E.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 474. P. 307.
- Лекрон и др. (Leckrone D.S., Proffitt C.R., Wahlgren G.M., Johansson S.G., Brage T.) // *Astron. J.* 1999. V. 117. N. 1719. P. 1454.
- Любимков Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1986а. Т. 74. С. 3.
- Любимков Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1986б. Т. 75. С. 155.
- Любимков Л.С. // *Химический состав звезд: метод и результаты анализа.* Астропринт: Одесса. 1995.
- Любимков Л.С., Саванов И.С. // *Астрофизика.* 1985. Т. 22. С. 63.
- Любимков Л.С., Рачковская Т.М. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1986. Т. 74. С. 14.
- Любимков Л.С., Ламберт Д.Л., Ростопчин С.И., Рачковская Т.М., Поклад Д.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008. Т. 104. № 2. С. 187.
- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2004. V. 351. P. 745.
- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Rostopchin S.I., Rachkovskaya T.M., Poklad D.B.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 402. P. 1369.

Сверхтяжелые элементы в атмосферах магнитных звезд

- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Poklad D.B., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 428. P. 3497.
- Макаганюк и др. (Makaganiuk V., Kochukhov O., Piskunov N., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 539. A142.
- Морел (Morel T.) // *ASP Conf. Ser.* 2012. V. 465. P. 54.
- Несвасил и др. (Nesvacil N., Lüftinger T., Shulyak D., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 537. A151.
- Несвасил и др. (Nesvacil N., Shulyak D., Ryabchikova T.A., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 552. A28.
- Северный и Любимков (Severny A.B., Lyubimkov L.S.) // *Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances. IAU Colloq. № 90. / Eds Cowley C.R., Dworetsky M.M. and Megessier C. Reidel: Dordrecht. 1986. P. 327.*
- Смит (Smith K.C.) // *Astrophys. Space Sci.* 1996. V. 237. P. 77.
- Смит (Smith K.C.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 319. P. 928.
- Фришкнехт и др. (Frischknecht U., Hirschi R., Meynet G., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 522. A39.
- Хегер и Лангер (Heger A., Langer N.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 544. P. 1016.
- Хикокс (Heasox W.D.) // *Astrophys. J. Suppl.* 1979. V. 41. P. 675.