ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА В ЗВЕЗДНЫХ СПЕКТРАХ

И. И. Романюк, Д. О. Кудрявцев, Е. А. Семенко

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
369167 Россия, Нижний Архыз
e-mail: roman@sao.ru

В обзоре продемонстрированы проявления эффекта Зеемана в звездных спектрах. Даны основные определения, приведен список магнито-чувствительных и магнито-нечувствительных спектральных линий, наблюдаемых в спектрах звезд. На модельных расчетах и реальных спектрах, полученных на 6-м телескопе САО, показано влияние магнитного поля на профили спектральных линий.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие Кирхгофом спектрального анализа повлекло за собой череду новых открытий и изобретений, позволивших получить новые фундаментальные знания в физике, возникла новая наука — астрофизика.

В данном обзоре мы рассмотрим астрофизические проявления эффекта Зеемана, изучение которого позволило найти космические магнитные поля. Обнаруженное Зееманом влияние магнитных полей на спектральные линии оказалось справедливым не только в лаборатории, но и в условиях космоса. Удобным полигоном для проверки различных теорий образования и эволюции космического магнетизма являются так называемые магнитные A- и B-звезды главной последовательности: результаты анализа их крупномасштабных магнитных полей, полученные путем измерения эффекта Зеемана, однозначны и мало зависимы от применяемых моделей, магнитные особенности ярко выражены.

Сверхсильные магнитные поля белых карликов и других вырожденных звезд в представляемой работе не анализируются.

ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА

В 1896 г. голландский физик П. Зееман открыл явление расщепления и поляризации спектральных линий в магнитном поле. Первое объяснение обнаруженному эффекту дал Х. Лоренц, но для этого ему пришлось сделать революционное предположение: неделимый прежде атом должен иметь сложную структуру — состоять из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженного электрона. Ученый мир на удивление быстро воспринял новую идею, и в 1901 г. П. Зееману и Х. Лоренцу была присуждена Нобелевская премия по физике.

Эксперимент Зеемана и классическая теория Лоренца многократно описаны в учебниках по физике (например “Атомная физика” Шпольского [1]), поэтому нет необходимости здесь их приводить. Укажем вкратце лишь наиболее важные моменты, которые необходимо знать при измерениях магнитных полей звезд.

Теория Лоренца смогла объяснить только простой (нормальный) зееман-эффект, в котором линия расщепляется на три эллиптически поляризованные составляющие разной интенсивности. Видимая картина расщепления зависит от направления наблюдателя по отношению к направлению магнитных силовых линий поля. Крайние случаи: 1) при наблюдении перпендикулярно полю (поперечный эффект) — все составляющие линии поляризованы линейно; 2) при наблюдении вдоль поля (продольный эффект) остаются видимыми лишь две составляющие, поляризованные по кругу.

Дальнейшие исследования показали, что в большинстве случаев наблюдается сложный (аномальный) эффект Зеемана, объяснение которому было дано в 1913 г. в планетарной модели атома Н. Бором. Полностью явление Зеемана объясняется в квантовой теории: в нормальном эффекте синглетные уровни атома (спин $S=0$) расщепляются в магнитном поле, вследствие чего каждая спектральная линия расщепляется на три составляющие (несмещенный π и симметрично смещенные σ). В случае аномального эффекта в спектральных линиях атомов вместо несмещенной π-составляющей наблюдается группа π-составляющих, а вместо каждой σ-составляющей — группа соответствующих составляющих, причем картина расщепления остается симметричной относительно первоначальной нерасщепленной линии. Расстояния между соседними π- и σ-составляющими (шаг расщепления) — одинаковы, общее число составляющих может достигать нескольких десятков, особенно для линий тяжелых и редкоземельных элементов. На практике, при измерениях магнитных полей звезд аномальный эффект Зеемана встречается примерно у 80% линий, представляющих астрофизический интерес [2].

В линиях поглощения наблюдается обратный эффект Зеемана. Знаки параметров Стокса для них противоположны знакам для эмиссионных линий — это обстоятельство особенно актуально при спектрополяриметрии звезд со сложными эмиссионно-абсорбционными линиями (можно ложно получать поля разной полярности по эмиссиям и абсорбциям).

ФАКТОРЫ ЛАНДЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Общие сведения. Чувствительность спектральных линий к магнитному полю неодинакова. Для каждого перехода можно вычислить так называемый фактор Ланде (имеющий размерность в единицах магнетона Бора).

Фактор Ланде g каждого уровня определяется как:

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)},$$

где L и S — орбитальный и спиновый моменты, J — полный момент количества движения. Нормальный эффект — частный случай аномального зееман-эффекта, возникает между уровнями, имеющими один и тот же фактор Ланде, или уровнями с $J = 0$. В нормальном триплете значение g определяет величину расщепления.

В аномальном эффекте в качестве меры чувствительности линии к магнитному полю используется эффективный фактор Ланде z — смещение центров тяжести групп π- и σ-составляющих.

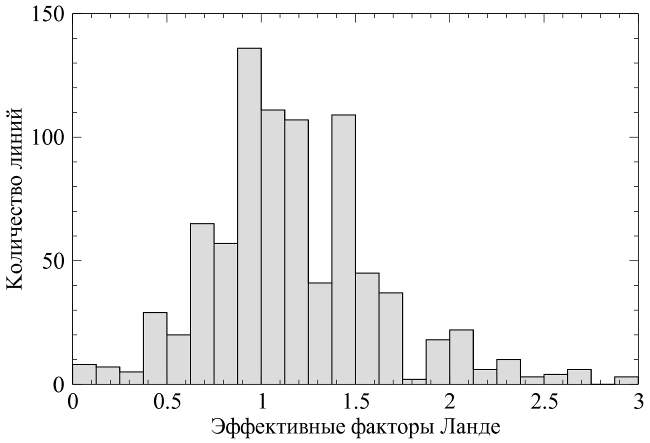

Рис. 1. Распределение факторов Ланде 850 линий, представляющих астрофизический интерес

На рис. 1 приведена картина распределения 850 линий, по которым производят измерения магнитных полей в звездных спектрах. Отметим два обстоятельства: 1) средний фактор Ланде z для всех линий равен 1.23, в пределах спектрального интервала от 3000 до 7000 Å эта величина не меняется с длиной волны, доля простых триплетов Лоренца в среднем составляет 19%; 2) факторы Ланде z более 80% линий находятся в узком интервале от 0.8 до 1.5 — это означает, что в присутствии магнитного поля все линии в зеемановском спектре будут сдвинуты в одну и ту же сторону, а различия в величинах сдвигов будут небольшими. Ошибочное отождествление и/или блендирование при большом количестве (>30–40) измеренных линий не играет существенной роли. Указанное обстоятельство позволяет использовать экспресс-методы для поисков новых магнитных звезд (не проводя отождествления линий, используя только средний фактор Ланде). Разумеется, при детальных исследованиях, магнитные измерения проводятся с учетом индивидуальных факторов Ланде.

В целом, линии тяжелых и редкоземельных атомов имеют более сложную структуру и больший эффективный фактор Ланде.

Теоретические и экспериментальные факторы Ланде. Между определенными экспериментально в лабораторных условиях и рассчитанными теоретически факторами Ланде существуют различия, особенно большие (до 2–3 раз) для тяжелых атомов. Вплоть до конца 80-х гг. XX века использовались преимущественно теоретические факторы, вычисленные в предположении L–S связи (например [3]). В настоящее время ситуация существенно улучшилась. В широко используемой базе спектральных данных VALD [4] используются лабораторные факторы для всех линий тяжелее Ni (если есть измерения) и рассчитанные Р. Куручем для Ca–Ni в предположении L–S связи, а также с учетом отклонений от нее. “Звездные” факторы Ланде не используются.

Еще Бэбкок [5] заметил, что некоторые линии дают систематически отличающиеся от расчетных сдвиги. В наших наблюдениях эти аномалии подтвердились. Однако, на практике звездными факторами практически не занимались — для определения магнитных полей звезд значительно проще и надежнее измерить большое количество линий, чем выполнять анализ отдельных из них с учетом трудоемкой процедуры учета блендирования. Тем не менее, сравнение лабораторных и звездных факторов Ланде может представлять фундаментальный интерес, поэтому выполнение таких работ необходимо.

Магниточувствительные линии. Величина магнитного расщепления прямо пропорциональна z, поэтому линии с большими факторами Ланде полезны при детальных исследованиях, однако, таких линий мало и они слабы. В качестве иллюстрации, в левой части таблицы 1 приведены некоторые линии с $z \geq 3.0$ (согласно данным, взятым из VALD). Интенсивности линий рассчитаны для типичной магнитной CP-звезды с эффективной температурой $T_{\text{эф}} = 8500\,\text{K}$, содержанием металлов, превышающим солнечное на 1 порядок, и редких земель — на 3 порядка.

Таблица 1. Магниточувствительные и маловосприимчивые к полю линии

Ион	λ	$\lg gf$	z	Интенсивность	Ион	λ	$\lg gf$	z	Интенсивность
V I	3815.511	−1.58	3.28	< 0.01	Cr II	3402.396	−1.20	−0.02	0.63
Gd II	3867.259	−1.12	3.00	< 0.01	Fe I	3533.198	−0.11	0.55	0.51
Mn I	4070.278	−0.95	3.32	0.09	Fe I	3608.859	−0.10	0.51	0.74
V I	4116.563	−0.83	3.29	< 0.01	Fe I	3745.899	−1.34	−0.01	0.90
Fe I	4210.343	−0.92	3.00	0.73	Fe I	3767.191	−0.39	−0.02	0.91
Gd II	4327.151	−0.69	2.95	0.01	Fe I	3849.966	−0.87	−0.01	0.88
Gd II	4558.080	−1.19	3.13	< 0.01	Ti II	4064.353	−1.60	0.51	0.34
Cr I	4654.724	−1.05	2.99	0.01	Cr II	4284.188	−1.89	0.52	0.49
Fe I	4878.208	−0.88	3.00	< 0.01	Ca I	4425.437	−0.36	0.50	0.62
Fe I	5250.208	−4.93	3.00	0.01	Fe I	4443.193	−1.04	0.56	0.56
					Ti II	4464.448	−1.81	0.49	0.72
					Fe II	4491.405	−2.76	0.42	0.78
					Fe II	4508.288	−2.35	0.50	0.81
					Cr II	4634.070	−1.24	0.51	0.68
					Cr II	5334.869	−1.83	0.41	0.38
					Fe I	5434.523	−2.12	−0.01	0.55

Из таблицы видно, что только линия Fe I 4210.3 Å с $z = 3.00$ достаточно интенсивна для проведения анализа в выбранной нами области спектра. В более холодных звездах увеличивается интенсивность линии Fe I 5250.2 Å с $z = 3.00$, поэтому она широко используется при исследованиях магнитного поля Солнца и холодных звезд.

Магнитные нулевые переходы. Магнитные нулевые переходы возникают между уровнями с нулевым фактором либо между уровнями с нулевым фактором и имеющим орбитальный момент $J = 0$. Профили нулевых линий не искажаются полем, поэтому они подходят для определения параметров звездных атмосфер.

Линии с малым z в спектре типичной магнитной звезды (с параметрами, указанными в предыдущем параграфе) приведены в правой части таблицы 1.

Наиболее часто для оценки параметров атмосфер магнитных CP звезд используются линии Fe II 4508.2 Å ($z = 0.50$) и 4491.4 Å ($z = 0.42$) — они практически не искажаются блендами в спектрах горячих звезд.

Эффект Пашена–Бака и квадратичный зееман-эффект. В очень сильных магнитных полях, когда магнитное расщепление больше мультиплетного, проявляется эффект Пашена–Бака — превращение сложной картины расщепления в простой триплет Лоренца. На практике, проявление эффекта Пашена–Бака необходимо учитывать для некоторых спектральных линий при полях, превышающих 10 кГс. В отличие от симметричного аномального зееман-эффекта при частичном эффекте Пашена–Бака наблюдаются нарушения симметрии: 1) линия в целом смещается по длине волны; 2) картина расщепления несимметрична относительно центров групп составляющих; 3) при изменениях в величине поля меняются не только ширины линий, но и их глубины.

Квадратичный зееман-эффект сводится к фиолетовому смещению спектральных линий и проявляется в спектрах магнитных белых карликов при полях более 1 МГс.

ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА В СПЕКТРАХ МАГНИТНЫХ СР-ЗВЕЗД

Для исследования особенностей картины расщепления в спектрах магнитные СР-звезды наиболее удобны: они достаточно яркие, имеют сильные магнитные поля простой структуры и достаточное количество спектральных линий. Магнитные солнечно-подобные звезды имеют поля сложной структуры, что существенно затрудняет анализ, поля разной полярности взаимно компенсируются, что делает практически невозможными традиционные измерения продольного компонента. В спектрах магнитных белых карликов практически нет линий, к тому же в условиях сверхсильных магнитных полей эффект Зеемана в классическом виде не наблюдается. В солнечных пятнах поля достаточно слабые, но в единичных случаях для некоторых линий можно ожидать проявления эффекта Пашена–Бака.

Поэтому, в дальнейшем будем рассматривать влияние сильных магнитных полей на профили спектральных линий на примере магнитных СР-звезд. Характеристики этих объектов и методика измерений магнитных полей подробно описаны в обзорах Романюка [6, 7]. Большинство сведений об их крупномасштабных полях (в основном дипольной структуры) получено лишь из измерений продольного компонента магнитного поля (или V-параметра Стокса в терминах характеристик поляризации). Магнитные поля этих объектов находятся в широком интервале — от предела обнаружения (десятки Гс) до десятков кГс. Это позволяет проводить исследования линий искаженных как классическим зееман-эффектом, так и изучать влияние частичного или полного эффекта Пашена–Бака.

На 6-м телескопе САО РАН за время эксплуатации было обнаружено около 120 магнитных СР-звезд (более 1/3 всех известных), из них 80 — за последние 10 лет. Нами получен обширный наблюдательный материал — несколько тысяч зеемановских спектров. Найдены объекты с полностью расщепленными зеемановскими составляющими, но их чрезвычайно мало. Эффект Зеемана — очень слабый, а реальные спектры зашумлены, линии часто блендированы, поэтому проявления поля часто могут быть не обнаружены. Поэтому для демонстрации различных проявлений эффекта Зеемана лучше воспользоваться модельными спектрами.

Модельные спектры. Для наглядности здесь и далее методом моделирования синтетических спектров в двух фазах (0.00 и 0.33 – т. е. при повороте звезды на 120°) показана переменность четырех параметров Стокса. Была взята линия Fe I 4210.34 Å с $z = 3.0$.

В абсолютном большинстве случаев слабого поля наблюдается продольный компонент поля. Поперечный компонент в несколько раз (иногда на порядок) слабее продольного. Кроме того, для измерения поперечного компонента необходимо измерить два параметра – Q и U. Поэтому измеряют, как правило, только продольный компонент поля.

В присутствии дипольного поля с напряженностью на полюсе 12 кГс в спектре видны полностью расщепленные составляющие (рис. 2). В данном примере сигнал от линейной поляризации сравним по величине с сигналом от круговой.

В случае квадрупольной конфигурации поля (рис. 3), сигнал продольного поля упал и по величине почти равен сигналу от поперечного поля. Картины параметров линейной поляризации очень сильно меняются с фазой периода.

Звездные спектры. На рис. 4 приведены два примера расщепления в одном из спектров, полученных на 6-м телескопе САО. Спектр высокого разрешения был получен на эшеле-спектрометре НЭС БТА. По величине расщепления линий с разными факторами Ланде найдено поле на поверхности звезды, равное 23 кГс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие Кирхгофом спектрального анализа имеет фундаментальное значение для исследования Вселенной: появилась возможность изучать не только химический состав небесных тел, но и их движение (эффект Доплера) и магнитные поля (эффект Зеемана).

На основании измерений эффекта Зеемана можно сделать достоверный вывод, что магнитные поля широко распространены в космической среде. Тем не менее, несмотря на 60 лет исследований, количество звезд с измеренными магнитными полями не превышает 1 тысячи (что на два порядка меньше числа звезд с измеренными лучевыми скоростями).

Исследование большого числа магнитных звезд, расположенных в разных частях Галактики, позволит понять – существует ли связь между полями отдельных звезд и полем Галактики, что, в свою очередь, даст ключ к пониманию природы звездного магнетизма.

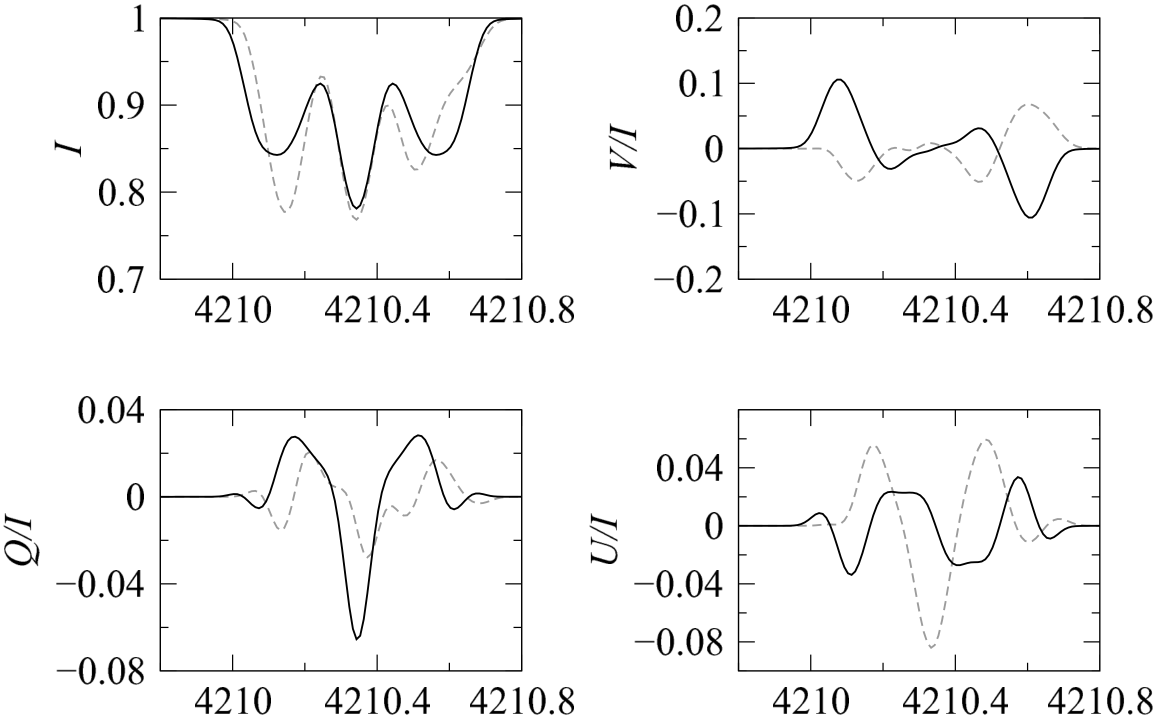

Рис. 2. Моделирование линии Fe I 4210.35 Å. Дипольное поле $B_{\rm p} = 12$ кГс. По оси абсцисс отложены длины волн в ангстремах

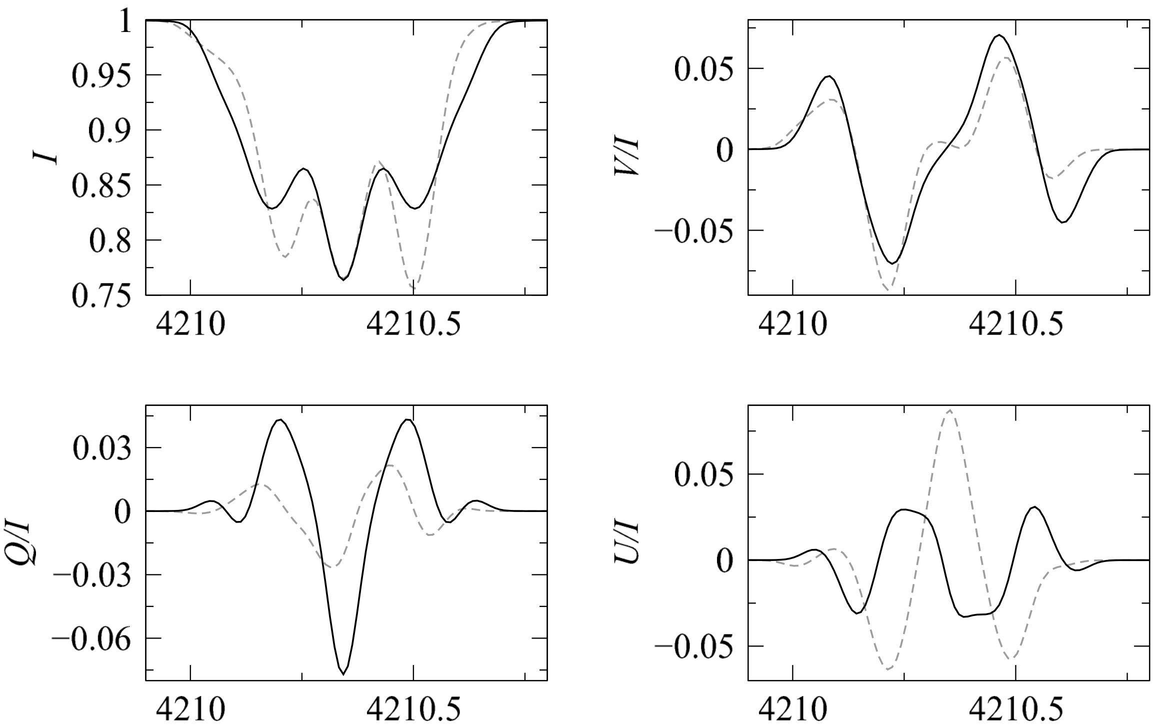

Рис. 3. Моделирование линии Fe I 4210.35 Å. Квадрупольное поле $B_{\rm q} = 12$ кГс. По оси абсцисс отложены длины волн в ангстремах

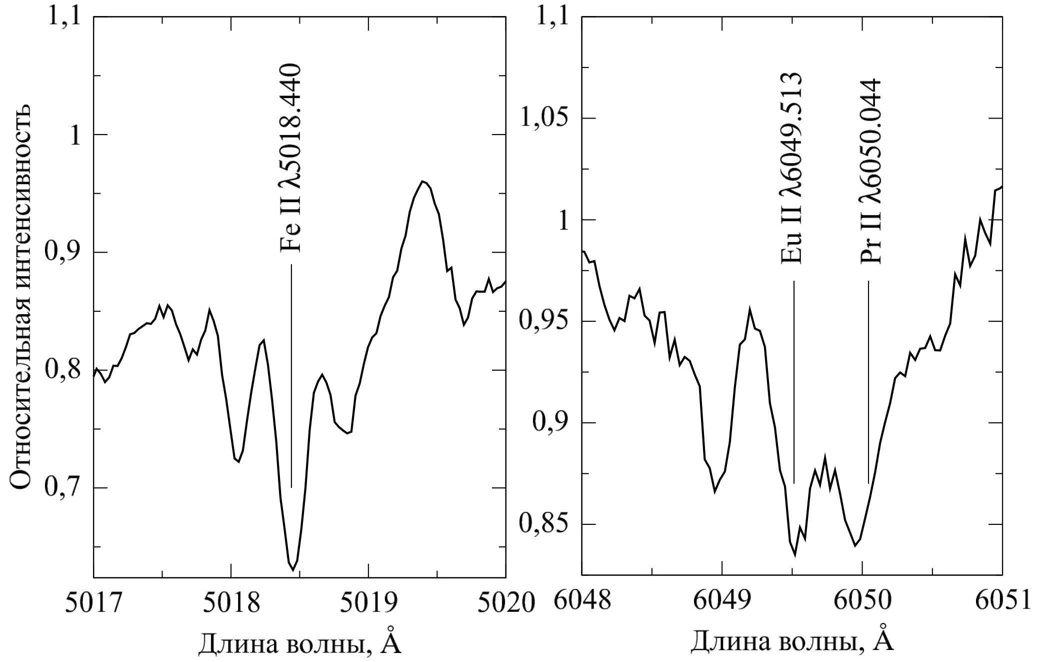

Рис. 4. Расщепление линии в спектре звезды HD 178892, вызванное влиянием магнитного поля величиной 23 кГс

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку работы (грант РФФИ 09-02-00002а) и программу Президиума РАН "Эволюция звезд и галактик" за финансирование участия в конференции "Кирхгоф-150".

[1] *Шпольский Э. В.* Атомная физика. Том I. – М.: Наука, 1984. – 245 с.

[2] *Романюк И. И.* О некоторых проявлениях магнитного усиления линий поглощения в спектрах пекулярных звезд // Известия Спец. астрофиз. обсерв. – 1984. – **18**. – С. 37–56.

[3] *Beckers J. M.* A Table of Zeeman Multiplets // Sacramento Peak Observatory Contrib. – 1969. – **141**.

[4] *Kupka F., Piskunov N. E., Ryabchikova T. A., et al.* VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. – 1999. – **138**. – P. 119–133.

[5] *Babcock H. W.* A Catalog of Magnetic Stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1958. – **3**. – P. 141–210.

[6] *Романюк И. И.* Магнитные CP-звезды Главной последовательности. I. Методы диагностики магнитных полей // Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв. – 2005. – **58**. – С. 64–89.

[7] *Романюк И. И.* Магнитные CP-звезды Главной последовательности. II. Физические параметры и химический состав атмосфер // Астрофиз. бюлл. – 2007. – **62**. – С. 72–101.