

УДК 524.3

Магнитное поле пульсирующих звезд

*В.В. Бутковская, С.И. Плачинда*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
vb@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 3 декабря 2021 г.

Аннотация. На сегодняшний день магнитное поле зарегистрировано у разных типов пульсирующих звезд. У нескольких пульсирующих звезд подтверждена переменность продольного компонента магнитного поля с периодом радиальных пульсаций. Физический механизм пульсационной переменности магнитного поля остается неизвестным. Мы представляем обзор современного состояния исследований проблемы переменности магнитного поля с периодом пульсаций у радиально пульсирующих звезд.

Ключевые слова: звезды, пульсации, магнитное поле, спектрополяриметрия

1 Введение

К настоящему моменту пульсации обнаружены у звезд, находящихся на разных стадиях эволюции. В последнее десятилетие параллельное развитие двух астрофизических методик способствовало значительному прогрессу в исследовании физики пульсирующих звезд:

1. Быстрое развитие астросейсмологии, в том числе благодаря космическим фотометрическим миссиям MOST, CoRoT, Kepler и TESS при поддержке наземными спектроскопическими кампаниями, дало возможность с высокой точностью исследовать звездные пульсации и внутреннюю структуру звезд.
2. С другой стороны, новое поколение спектрополяриметров высокого разрешения и совершенствование методов высокоточного измерения магнитных полей позволило приступить к детальному изучению магнитных полей пульсирующих звезд.

Оба этих метода сегодня успешно комбинируют с целью улучшения понимания физики пульсирующих звезд.

Одним из открытых вопросов является возможность генерации магнитного поля в результате пульсационных движений звездной атмосферы и механизм переменности магнитного поля с периодом пульсаций. В течение пульсационного цикла изменяются форма и размеры звезды. И поскольку в астрофизических объектах магнитное поле вморожено в плазму (то есть магнитные силовые линии движутся вместе с плазмой), можно предположить, что абсолютная величина и направление интегрального вектора магнитной индукции могут изменяться в течение пульсационного цикла.

Мы представляем краткий обзор современного состояния проблемы исследования переменности магнитного поля с периодом пульсаций у радиально пульсирующих звезд разных спектральных классов и типов светимости.

2 Метод измерения магнитных полей звезд

Сектрополяриметрические исследования звездных магнитных полей обычно подразумевают измерение продольного компонента магнитного поля путем вычисления расщепления спектральных линий, вызванного расщеплением энергетических уровней атомов во внешнем магнитном поле (эффект

Зеемана). Если магнитное поле параллельно лучу зрения, исходная спектральная линия расщепляется на два набора σ -компонент (в этом случае линейно поляризованные π -компоненты не видны). Эти σ -компоненты циркулярно поляризованы в противоположных направлениях.

Величина смещения σ -компонент относительно центральной (несмещенной) длины волны рассчитывается по формуле:

$$\Delta\lambda_B = \frac{e}{4\pi m_e c^2} z\lambda^2 B_e = 4.67 \times 10^{-13} z\lambda^2 B_e, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, m_e – масса электрона, c – скорость света в вакууме, z – эффективный фактор Ланде, λ – центральная (несмещенная) длина волны в ангстремах, B_e – продольный компонент магнитного поля в гауссах.

3 Магнитные поля пульсирующих звезд

3.1 Переменные типа β Сер

3.1.1 Малоамплитудный пульсатор γ Рег

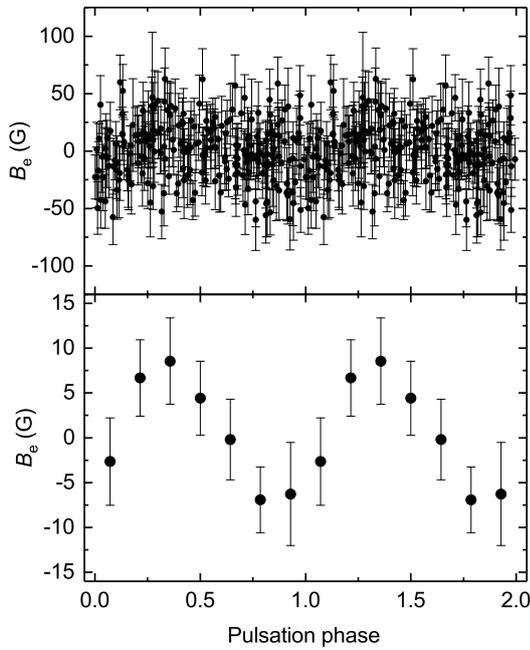


Рис. 1. Продольное магнитное поле γ Рег, свернутое с фазами 0.15-дневного периода пульсаций. На верхней панели представлены отдельные измерения (из каждого значения вычтено среднее за ночь магнитное поле, чтобы исключить возможную переменность, вызванную вращением звезды), на нижней – те же данные, усредненные на семи интервалах (бинах) пульсационного периода

переменности продольного компонента магнитного поля γ Рег не должна превышать нескольких десятых гаусса, что на порядок меньше регистрируемой амплитуды.

3.1.2 Медленно вращающийся пульсатор ξ^1 СМа

ξ^1 СМа (HD 46328, B0.5 IV) – радиально пульсирующая переменная типа β Сер, которая идентифицирована [Shultz et al. \(2017\)](#) как медленно вращающаяся звезда с периодом вращения более 30 лет.

γ Рег (HD 886, Sp B2 IV) – малоамплитудная переменная типа β Сер. Полная амплитуда переменности лучевой скорости звезды составляет $2K = 7$ км/с, период пульсаций – 0.15 дня (3.6 часа). Первые попытки измерить магнитное поле у γ Рег в работах [Babcock \(1958\)](#), [Rudy, Kemp \(1978\)](#), [Landstreet \(1982\)](#) оказались безуспешными из-за больших ошибок, достигающих несколько десятков гаусс. Однако на основе статистического критерия χ^2 [Rudy, Kemp \(1978\)](#) пришли к выводу, что вероятность того, что у γ Рег есть магнитное поле, очень высока. Первые высокоточные измерения магнитного поля γ Рег выполнены [Butkovskaya, Plachinda \(2007\)](#). Авторы также исследовали переменность магнитного поля с 0.15-дневным периодом радиальных пульсаций звезды и обнаружили, что продольный компонент магнитного поля изменяется синусоидально с амплитудой около 7 Гс. Продольное магнитное поле γ Рег, свернутое с фазами пульсационного периода, представлено на рисунке 1. Пульсационная переменность магнитного поля более заметна для усредненных данных. На нижней панели рисунка 1 те же данные разбиты на 7 интервалов (бинов) и для каждого бина приведены среднее значение и его ошибка. В каждый бин попадает около 30 отдельных измерений магнитного поля.

Следует отметить, что пульсационная кривая магнитного поля имеет экстремумы вблизи фаз максимального сжатия и расширения звезды. Поэтому можно предположить, что переменность магнитного поля обусловлена его вмороженностью в плазму. Однако выполненное авторами численное моделирование показало, что в этом случае наблюдаемая амплитуда

показало, что в этом случае наблюдаемая амплитуда

Магнитное поле у звезды обнаружено в работе [Hubrig et al. \(2006\)](#) и позже подтверждено в работах [Silvester et al. \(2009\)](#) и [Shultz et al. \(2017\)](#). ξ^1 CMa – единственная медленно вращающаяся звезда спектрального класса В, чья магнитосфера видна в линии H_α , и единственная горячая звезда с магнитным полем, у которой эмиссия в H_α модулирована пульсациями и вращением ([Shultz et al., 2017](#)), а магнитосферная эмиссия в рентгеновском диапазоне модулирована пульсациями ([Oskinova et al., 2014](#)).

[Shultz et al. \(2017\)](#) обнаружили, что продольный компонент магнитного поля ξ^1 CMa изменяется не только с 30-летним периодом вращения, но и демонстрирует более кратковременную переменность с 0.2-дневным (5-часовым) периодом пульсаций звезды (см. рисунок 21 в работе авторов). [Shultz et al. \(2017\)](#) пришли к заключению, что максимум поля наблюдается вблизи фазы $\phi = 0.25$ (фаза максимального сжатия звезды), а минимум – вблизи фазы $\phi = 0.75$ (фаза максимального расширения звезды). Исходя из этого авторы сделали вывод, что наиболее очевидным механизмом, который мог бы объяснить наблюдаемую переменность магнитного поля, является “консервация магнитного потока в течение цикла радиальной пульсации”.

3.1.3 Высокоамплитудный пульсатор BW Vul

BW Vul (HD 199140, Sp B2III, $V = 6.52^m$) отличается самыми большими амплитудами переменности блеска (0.2^m в визуальной области) и лучевой скорости (около 200 km s^{-1}) среди переменных типа β Сер. Звезда пульсирует в радиальной моде с периодом около 0.2 дня (около 5 часов) и демонстрирует сложную кривую лучевой скорости, на которой присутствуют два разрыва, окружающие фазовый интервал, на котором лучевая скорость практически не меняется. Эти детали, наряду с раздвоением линий в спектре BW Vul, объясняют прохождением мощных ударных волн в атмосфере звезды ([Fokin et al., 2004](#)).

Спектрополяриметрические наблюдения BW Vul выполнялись в течение двух ночей, 21.06.2011 и 03.07.2011, на спектрополяриметре CFHT ESPaDOnS. Первая попытка измерить магнитное поле у этой звезды и исследовать его поведение с периодом пульсаций сделана в работе [Butkovskaya et al. \(2017\)](#). Из-за коротких экспозиций (25 секунд для $V = 6.52^m$) максимальное отношение сигнал/шум в единичном спектре было очень низким (около 70), чем обусловлены большие ошибки вычисления магнитного поля. Среднее за ночь магнитное поле оказалось статистически не значимым. Однако свёртка отдельных измерений магнитного поля с известным периодом пульсаций позволила авторам предположить, что звезда может иметь магнитное поле, которое сложным образом меняется в течение пульсационного цикла.

На рисунке 2 продольное магнитное поле BW Vul, измеренное в линиях водорода и гелия, свернуто с фазами периода пульсаций. Пульсационные фазы вычислены согласно эфемериде $\text{HJD}_{\text{max}} = 2455758.769 + 0.2010439 \times E$ из работы [Odell \(2012\)](#), где фаза $\phi = 0$ соответствует максимальному блеску и минимальному радиусу звезды. В статье [Butkovskaya et al. \(2017\)](#) представлены пульсационные кривые магнитного поля, построенные по трем линиям водорода и восьми линиям гелия (см. рисунки 1 и 2 в цитируемой статье). Здесь на рисунке 2 мы привели только две из них: построенные по линиям He I 4921 Å и H_α . Пульсационные кривые, построенные по другим линиям, также показывают сложную переменность магнитного поля с периодом пульсаций, но, вероятно из-за больших ошибок, переменность эта не столь наглядна. Магнитное поле, измеренное по линии гелия, как и в случае γ Peg, максимально вблизи фазы максимального

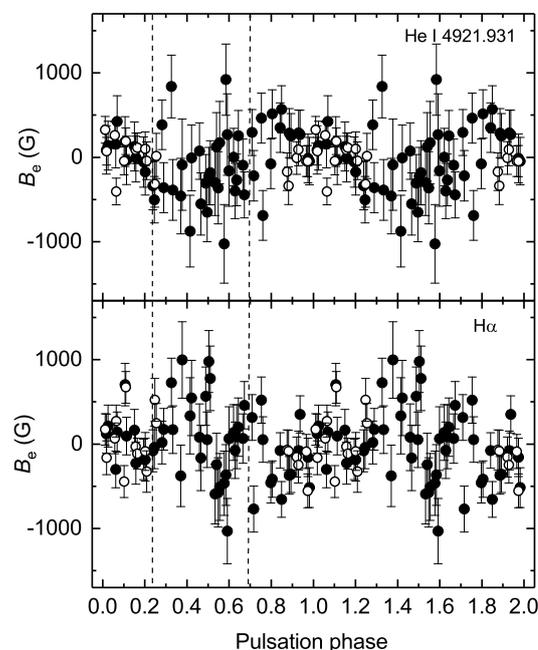


Рис. 2. Продольное магнитное поле BW Vul, измеренное по линиям He I 4921 Å (верхняя панель) и H_α (нижняя панель), свернутое с фазами 0.2-дневного периода пульсаций. Фазовый интервал от $\phi \sim 0.25$ до $\phi \sim 0.7$, когда в атмосфере звезды распространяются мощные ударные волны, показан пунктирными линиями

сжатия звезды. Магнитное поле, измеренное по водородной линии, демонстрирует более сложную переменность на фазах вероятного прохождения ударных волн. Вне сомнения, требуются более точные спектрополяриметрические наблюдения для измерения магнитного поля этой звезды и более детального исследования его переменности с периодом пульсаций.

3.2 Переменные типа RR Lyr

Переменные типа RR Lyr – старые маломассивные гиганты спектральных классов А–F. Эти звезды пульсируют в фундаментальной радиальной моде (подкласс RRab) или первом овертоне радиальной моды (подкласс RRc), или в обеих этих модах одновременно (подкласс RRd). Их периоды пульсаций лежат в интервале 0.2–1.2 дня, амплитуда блеска достигает 2^m . У значительной части переменных типа RR Lyr наблюдается эффект Блажко (Blazhko, 1907), состоящий в периодической модуляции амплитуды/фазы блеска на временной шкале от десятков до сотен пульсационных периодов (Kolenberg, Bagnulo, 2009). На сегодняшний день природа эффекта Блажко не установлена. Наибольшее распространение получили следующие гипотезы, объясняющие этот эффект:

1. Нелинейный резонанс между радиальной фундаментальной модой и нерадиальной модой (Cox, 1993).
2. Адаптация к эффекту Блажко сформулированной для α Cen-звезд модели наклонного пульсатора (Kurtz, 1982). В рамках этой модели предполагается, что дипольное магнитное поле искажает радиальную моду, что ведет к появлению квадрупольной составляющей ($l = 2$), ось симметрии которой совпадает с осью магнитного диполя. И поскольку звезда вращается, на разных фазах периода вращения мы видим разные суперпозиции пульсационных компонент, что приводит к наблюдаемой амплитудной модуляции кривой блеска (Cousens, 1983; Shibahashi, Takata, 1995). Согласно этой модели, для воспроизведения наблюдаемой амплитудной модуляции требуется магнитное поле с напряженностью около 1 кГс.
3. Турбулентная конвекция в зонах ионизации водорода и гелия может циклически усиливаться и ослабляться в присутствии магнитного поля, сгенерированного либо турбулентными, либо вращательными динамо-механизмами (Stothers, 2006).

На сегодняшний день вопрос о наличии магнитного поля у звезд типа RR Lyr остается предметом дискуссий. Переменные типа RR Lyr – достаточно слабые звезды, поэтому возможности спектрополяриметрического исследования этих объектов сильно ограничены. До недавнего времени RR Lyr ($V = 7, 2 - 8, 2$) была единственной звездой этого класса переменных, которую наблюдали методами спектрополяриметрии. Но результаты наблюдений оказались противоречивыми. Babcock (1958) и Romanov et al. (1987, 1994) обнаружили у RR Lyr сильное магнитное поле с напряженностью до 1.5 кГс. Babcock не обнаружил зависимости величины поля от фазы периода пульсации, тогда как Романов с коллегами показали, что поле меняется с амплитудой до 1.5 кГс с фазами 0.567-дневного пульсационного цикла, при этом среднее за цикл магнитное поле изменяется также с 40.8-дневным периодом Блажко. С другой стороны, в работах Preston (1967) и Chadid et al. (2004) у RR Lyr вообще не зарегистрировано статистически значимого магнитного поля.

В работе Kolenberg, Bagnulo (2009) выполнено измерение магнитного поля у 17 относительно ярких звезд типа RR Lyr, доступных для наблюдений в южном полушарии. Сспектрополяриметрические наблюдения были выполнены на спектрографе FORS1 (в режиме спектрополяриметрии), установленном на 8-метровом телескопе ESO VLT. Авторы измерили продольный компонент магнитного поля этой выборки звезд с типичными ошибками < 30 Гс. Ни у одной из звезд выборки статистически значимого поля зарегистрировать не удалось. Авторы определили, что верхний предел дипольного поля для этих звезд составляет 130 Гс с достоверностью 95%. На рисунке 3 в работе Kolenberg, Bagnulo (2009) проиллюстрированы абсолютные значения продольного поля как функция фазы пульсационного цикла. Хотя разные точки на графике принадлежат отдельным звездам с потенциально разной геометрической конфигурацией магнитного поля, максимальные значения поля сосредоточены вблизи фазы $\phi = 0$. По мнению авторов, это может говорить о существовании циклической переменности магнитного поля с периодом пульсаций. Поскольку радиус и площадь поверхности у этого класса пульсирующих переменных минимальны непосредственно перед фазой $\phi = 0$ и максимальны вблизи фазы $\phi = 0.5$, авторы предполагают, что переменность магнитного поля может быть связана с вмороженностью поля в плазму, и, как следствие, консервацией магнитного

потока в течение пульсационного цикла. [Kolenberg, Bagnulo \(2009\)](#) не подтверждают для звезд типа RR Lyr гипотезу о том, что модуляция магнитного поля с периодом Блажко может быть вызвана сильным магнитным полем квазидипольной топологии, но отмечают, что при спектрополяриметрических наблюдениях с более высоким разрешением у этих переменных могут быть обнаружены более сложные конфигурации магнитного поля.

3.3 Классическая цефеида η Aql

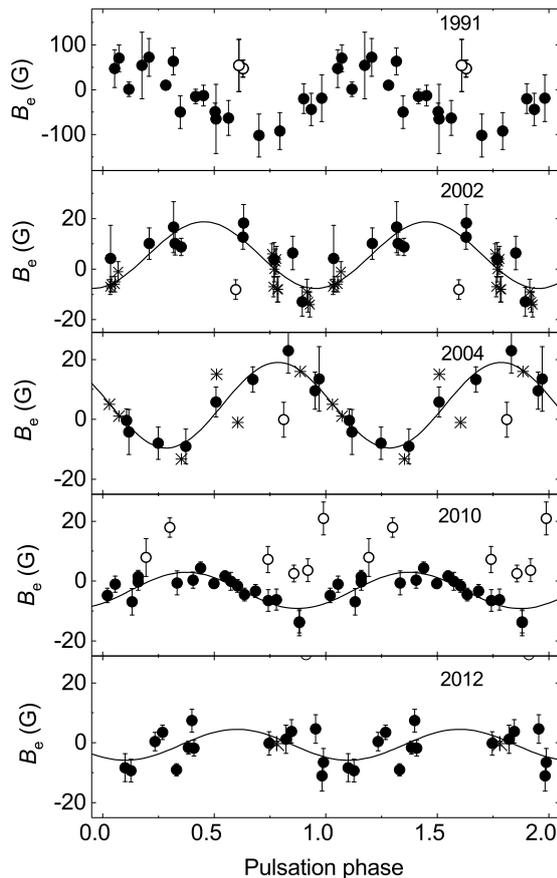


Рис. 3. Продольное магнитное поле η Aql, свернутое с фазами 7.176726-дневного периода пульсаций. Наши данные, полученные в разные годы, показаны открытыми и заполненными кружками. Данные других авторов показаны снежинками: [Wade et al. \(2002\)](#) и [Grunhut et al. \(2010\)](#) на второй сверху панели; [Borra et al. \(1981\)](#) и [Borra et al. \(1984\)](#) на третьей панели; [Grunhut et al. \(2010\)](#) на нижней панели. Аппроксимирующие синусоиды показаны сплошными линиями. Открытыми кружками показаны данные, которые не учитывались при аппроксимации. Причина их отклонения от основных кривых пока не ясна

крупных мониторинговых программ, в которых поле одного объекта измеряется один или несколько раз. Поэтому, несмотря на то, что на сегодняшний день магнитное поле с высокой достоверностью зарегистрировано у разных типов пульсирующих звезд, его переменность с периодом пульсаций

Первые попытки измерить магнитное поле у классической цефеиды η Aql ([Borra et al., 1981, 1984](#)) не обнаружили статистически значимого магнитного поля у этой звезды. [Plachinda \(2000\)](#) зарегистрировал магнитное поле у η Aql и показал, что продольный компонент магнитного поля меняется с периодом пульсаций в диапазоне от -100 до 50 Гс. Автор также указал на скачок в изменении магнитного поля, возникающий на фазе $\phi = 0.62$ и интерпретировал его как резкое изменение конфигурации магнитного поля, связанное с прохождением ударной волны через атмосферу. Два года спустя [Wade et al. \(2002\)](#) не обнаружили статистически значимого магнитного поля у η Aql и сделали вывод, что η Aql – не магнитная звезда, по крайней мере в пределах 10 Гс. Однако в более поздней работе [Grunhut et al. \(2010\)](#) обнаружили явные признаки эффекта Зеемана в V -параметре Стокса у η Aql и еще 8 сверхгигантов.

На рисунке 3 проиллюстрирована пульсационная модуляция продольного магнитного поля η Aql в разные годы. Из рисунка видно, что, в отличие от пульсирующих переменных типа β Cep, у η Aql амплитуда, среднее за пульсационный цикл магнитное поле и фазы экстремумов меняются от года к году. Причина этих изменений пока не известна.

4 Заключение

За последнее десятилетие астросейсмология и спектрополяриметрия значительно углубили наше понимание физики пульсирующих звезд. Сегодня у нас есть возможность комбинировать эти два метода, чтобы получить еще больше информации о пульсирующих звездах и задать дополнительные ограничения на их модели.

Для поиска и исследования пульсационной модуляции магнитного поля звезд необходимы длительные временные ряды измерений магнитного поля, перекрывающие (желательно многократно) пульсационный период каждой конкретной звезды. Однако большинство измерений магнитного поля пульсирующих переменных выполнены в рамках

исследована и подтверждена только для нескольких объектов, а причина этой переменности остается неустановленной и ограничивается отдельными гипотезами. Без решения этой задачи магнито-гидродинамическое моделирование физических процессов в атмосферах пульсирующих звезд будет неполным.

Благодарности. С. Плачинда благодарит за поддержку Министерство науки и высшего образования Российской Федерации – грант № 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

Литература

- Babcock H.W., 1958. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 3, pp. 141–210.
- Blazhko S., 1907. *Astron. Nachr.*, vol. 175, pp. 325–327.
- Borra E.F., Fletcher J.M., Poeckert R., 1981. *Astrophys. J.*, vol. 247, pp. 569–576.
- Borra E.F., Edwards G., Mayor M., 1984. *Astrophys. J.*, vol. 284, pp. 211–222.
- Butkovskaya V., Plachinda S., 2007. *Astron. Astrophys.*, vol. 469, pp. 1069–1076.
- Butkovskaya V.V., Plachinda S.I., Pankov N.F., 2017. *Astron. Nachr.*, vol. 338, pp. 938–943.
- Chadid M., Wade G.A., Shorlin S.L.S., Landstreet J.D., 2004. *Astron. Astrophys.*, vol. 413, pp. 1087–1093.
- Cousens A., 1983. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 203, pp. 1171–1182.
- Cox A.N., 1993. *Proc. IAU Coll.*, vol. 139, pp. 409.
- Fokin A., Mathias Ph., Chapellier E., et al., 2004. *Astron. Astrophys.*, vol. 426, pp. 686–693.
- Grunhut J.H., Wade G.A., Hanes D.A., Alecian E., 2010. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 408, pp. 2290–2297.
- Hubrig S., Briquet M., Scholler M., et al., 2006. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Letters*, vol. 369, iss. 1, pp. L61–L65.
- Kolenberg K., Bagnulo S., 2009. *Astron. Astrophys.*, vol. 498, no. 2, pp. 543–550.
- Kurtz D.W., 1982. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 200, pp. 807–859.
- Landstreet J.D., 1982. *Astrophys. J.*, vol. 258, pp. 639–650.
- Odell A.P., 2012. *Astron. Astrophys.*, vol. 544, pp. A28–A31.
- Oskinova L.M., Nazé Y., Todt H., et al., 2014. *Nature Communications*, vol. 5, p. 4024.
- Plachinda S.I., 2000. *Astron. Astrophys.*, vol. 360, pp. 642–646.
- Preston G.W., 1967. in: *The Magnetic and Related Stars*, R.C. Cameron (ed.), pp. 3.
- Romanov Yu.S., Udovichenko S.N., Frolov M.S., 1987. *Sov. Astr. Lett.*, vol. 13, pp. 29–31.
- Romanov Yu.S., Udovichenko S.N., Frolov M.S., 1994. *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*, vol. 38, pp. 169–170.
- Rudy R.J., Kemp J.C., 1978. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 183, pp. 595–603.
- Shibahashi H., Takata M., 1995. *ASP Conf. Ser.*, vol. 83, pp. 42–43.
- Shultz M., Wade G.A., Rivinius Th., et al., 2017. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 471, iss. 2, pp. 2286–2310.
- Silvester J., Neiner C., Henrichs H.F., et al., 2009. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 398, pp. 1505–1511.
- Stothers R.B., 2006. *Astrophys. J.*, vol. 652, no. 1, pp. 643–649.
- Wade G.A., Chadid M., Shorlin S.L.S., et al., 2002. *Astron. Astrophys.*, vol. 392, pp. L17–L20.

Magnetic field of pulsating stars

V.V. Butkovskaya, S.I. Plachinda

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409, Crimea
vb@craocrimea.ru

Abstract. To date, magnetic fields have been detected in various types of pulsating stars. For several of these stars, the variability of the magnetic field with their radial pulsation period was confirmed. The physical mechanism of the pulsation variability of the magnetic field remains unknown. We discuss the current state of the problem of magnetic field variability over pulsation cycles in radially pulsating stars.

Key words: stars, pulsations, magnetic field, spectropolarimetry