
Българска академия на науките
Институт по Астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

Магнитна активност при избрани проеволюирали звезди

Светла Валентинова Цветкова

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на образователна и научна
степен "доктор"

София, 2014 г.

Заштитата на дисертационния труд ще се състои на 20.10.2014 г. от 14:00 часа в зала 301 на Институт по електроника, БАН, бул. "Цариградско шосе" № 72. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на ИА с НАО, БАН и на адрес <http://www.astro.bas.bg/~stsvetkova/PhD/>

Българска академия на науките
Институт по Астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

Магнитна активност при избрани проеволюирали звезди

Светла Валентинова Цветкова

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на образователна и научна степен "доктор"
в професионално направление 4. Природни науки, математика и информатика,
4.1 Физически науки (Астрофизика и звездна астрономия)

Научен ръководител:
доц. д-р Ренада Константинова-Антова

Комисия:

проф. д-н Иlian Илиев
проф. д-н Диана Кюркчиева
доц. д-р Антоанета Антонова
доц. д-р Петко Недялков
доц. д-р Ренада Константинова-Антова

София, 2014 г.

Дисертационният труд е обсъден и на срочен за защита от обединения научен семинар на Институт по Астрономия с НАО, БАН и катедрата Астрономия при ФзФ на СУ “Св. Климент Охридски”, проведен на 30.06.2014 г.

Дисертационният труд съдържа 123 страници, включващи 43 фигури, 5 таблици и 258 цитирани източника.

Дисертантът работи в Институт по Астрономия с Национална астрономическа обсерватория, БАН, като асистент.

Съдържание

1	Червените гиганти сред другите магнитно активни звезди	5
2	Измерване на звездни магнитни полета	10
3	β Ceti и EK Eri	13
3.1	β Ceti	13
3.2	EK Eri	16
4	V390 Aur	19
	Основни приноси	22
	Списък с публикации	23
	Забелязани цитати в ADS	24
	Благодарности	25
	Използвана литература	26

1 Червените гиганти сред другите магнитно активни звезди

Звезди в различни стадии на еволюция по цялата диаграма на Херцшprung-Ръсел (ДХР) проявяват магнитна активност – звезди преди Главната Последователност (ГП), звезди от слънчев тип, M джуджета, променливи от тип RS CVn и FK Com, единични G , K и M гиганти.

Магнитната активност на звездите преди Главната Последователност се дължи на действието на динамо или на фосилно поле, което произхожда от магнитното поле на междузвездната среда, от която звездата се образува. Тези звезди показват сложна структура на повърхностното магнитно поле, като доминира диполната компонента, но често значима е и октополната компонента (Donati et al. 2007, 2008 a и други). Магнитното поле по лъча на зрение B_l , което е измерено чрез Стокс V профилите, е от порядъка на няколкостотин гауса. Тъй като звездите преди ГП за напълно конвективни, то е възможно при тях да действа т. нар. “distributed” динамо – при него тороидалната компонента на магнитното поле се наблюдава близо до повърхността на звездата (Donati et al. 2003 a). Това е видимо в реконструираните азимутални магнитни карти на звездите.

Звездите от слънчев тип също показват сложна структура на повърхностното магнитно поле. При тях често се наблюдава смяна на полярностите и переход от доминираща тороидална към доминираща полоидална компонента (Petit et al. 2009, Morgenthaler et al. 2012 и други). Магнитното поле B_l достига до няколко десетки гауса (Marsden et al. 2014). При тези звезди действа слънчево динамо – тороидалната компонента на магнитното поле се генерира в слоя между радиативното ядро и конвективната обвивка, а полоидалната компонента се генерира в основата на конвективната обвивка.

Магнитното поле B_l при M джуджетата е няколко десетки до почти 2000 гауса (Donati et al. 2008 b, Morin et al. 2008 a, b, 2010). При M джуджетата от спектрален клас $M3/M4$ се осъществява преход към

напълно конвективни звезди. Изследванията на джуджетата преди и след тази граница показват, че доминира предимно полоидалната компонента на магнитното поле.

RS CVn са тесни двойни системи, при които основният компонент е $G - K$ гигант, а вторичната компонента е субгигант. Бързото им въртене и магнитна активност се дължат на ефекта на синхронизация. Изследваните гиганти от тези системи показват сложна структура на повърхностното магнитно поле с доминираща и стабилна тороидална магнитна компонента (Donati 1999, Donati et al. 2003 a, Petit et al. 2004 b, Kochukhov et al. 2013).

FK Com звездите са гиганти от спектрален клас G до ранни K и вероятно са резултат от сливане на две звезди от тясна двойна система тип W UMa (Bopp & Rucinski 1981, Bopp & Stencel 1981). Реконструирани са няколко магнитни карти на звездата HD 199178, които показват доминираща тороидална компонента на магнитното поле (Petit et al. 2004 a).

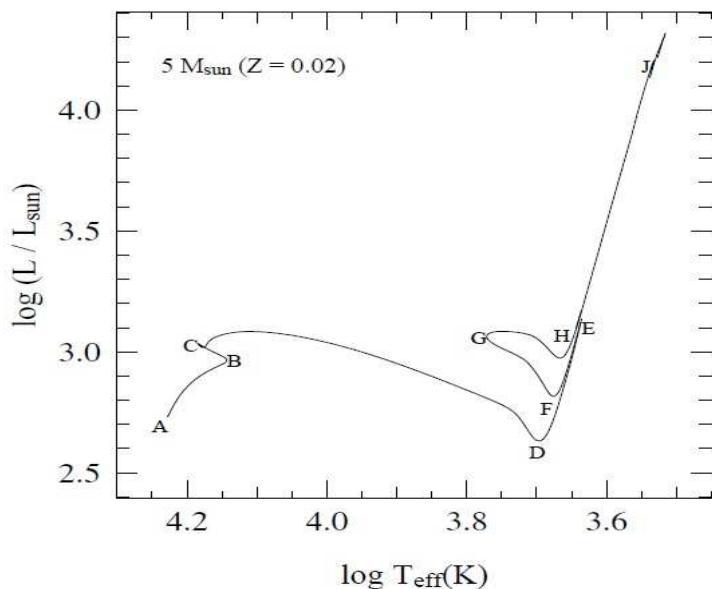
Изследванията на магнитните полета при единичните G и K гиганти започва през 2008 г. Измерените магнитни полета B_l са от порядъка на няколко гауса (Konstantinova-Antova et al. 2008 a, b, 2009, Aurière et al. 2009 a). Подробно изследвани са бавно въртящите се Pollux (Aurière et al. 2009 b) и Arcturus (Sennhauser & Berdyugina 2011), при които най-вероятно магнитната активност се дължи на действието на динамо.

Първият M гигант, с регистрирано магнитно поле, е EK Boo (Konstantinova-Antova et al. 2009).

Извадка от 50 G и K и 9 M гиганти е изследвана от Konstantinova-Antova et al. (2013) and Aurière et al. (2014, in prep.). Измерените магнитни полета са от порядъка на 0.25 G до 100 G . Периодите на звездите са в интервала 5-200 дни. Почти всички G и K гиганти се намират около основата на клона на гигантите на ДХР. Това дава основание на авторите да нарекат тази област “магнитна ивица”. За четири гиганта от извадката се предполага, че тяхната магнитна активност се дължи на фосилно поле. За останалите се предполага,

че действа динамо. Това се потвърждава и от показаната от авторите връзка между големината на магнитната индукция и периода на въртене.

Теоретичен еволюционен трек на звезда със средна маса ($2 - 8 M_{\odot}$) е показан на Фиг. 1.1. Клонът на червените гиганти се намира между точки D и E , където звездата има радиативно ядро и конвективна обвивка. В тънък слой около ядрото гори водород. Между точки E и G звездата е в етап на горене на хелий в ядрото, а между точките G и H горенето на хелий преминава в тънък слой около ядрото. Над този слой се намира слойт, в който продължава да се извършва водородното горене. След точка H звездата се превръща в гигант на асимптотичния клон.



Фигура 1.1: Теоретичен еволюционен трек от ДХР за звезда с маса $5 M_{\odot}$ (Iben 1967). (Фиг. 1.8 от дисертацията)

Около основата на клона на гигантите, точка D , звездата се намира в етапа на първо смесване – конвективната обвивка се разширява в посока към ядрото, в резултат на което се пренася вещество от приядрените области към повърхността.

За звезди със средна маса е трудно да се определи дали се намират в основата на клона на гигантите или в етапа на горене на хелий в ядрото. Затова, като индикатор се използва отношението $^{12}C/^{13}C$.

Еволюционните хипотези за магнитна активност при червените ги-

гани са две – действие на динамо или фосилно поле. От динамо теорията се знае, че α -эффектът генерира полоидално магнитно поле от тороидално чрез кориолисови сили и конвекция, а ω -эффектът генерира тороидално магнитно поле от полоидално чрез меридионална циркулация и радиално диференциално въртене (преглед по темата от Moffatt 1978).

От друга страна, фосилното магнитно поле произхожда от магнитното поле на междузвездната среда, от която звездата се образува. За описанието му се използва моделът на наклонения ротор – при него звездата се разглежда като магнитен дипол, чиято магнитната ос е наклонена под даден ъгъл спрямо оста на въртене на звездата, и под друг ъгъл спрямо лъча на зрение (Stibbs 1950).

Предполага се, че магнитната активност на химически пекулярните магнитни звезди (Ap/Bp звезди или само Ap звезди) се дължи на фосилно поле. Тези звезди са подобни на нормалните A и късни B звезди от ГП, но показват завишено и/или занижено обилие на някои химични елементи, имат по-ниски стойности за $v \sin i$ и имат магнитни полета. Те са около 5-10 % от A и B звездите от ГП (Wolff 1968, Moss 2001, Power et al. 2008). Очаква се Ap звездите да имат проста структура на повърхностното магнитно поле (Donati & Landstreet 2009, Landstreet 1992). В повечето случаи кривата, която показва времевите промени на B_l , е синусоида (Aurière et al. 2007, Wade et al. 2000 a, b, Kochukhov & Wade 2010, Silvester et al. 2012).

Наблюдало е установено при Ap звездите, че големината на магнитната индукция на полето, създадено от дипола, е по-голяма от 300 G (Aurière et al. 2007).

Цели на изследването

За настоящото изследване са избрани три гиганта – два от тях са бавно въртящите се β Ceti (K0 III, $v \sin i = 3.5 \text{ km/s}$) и ЕК Eri (G8 III, $v \sin i = 0.5 \text{ km/s}$), а третият е бързо въртящият се гигант

V390 Aur ($G8\ III$, $v \sin i = 29\ km/s$). Тези три звезди са избрани, защото от литературата е известно, че проявяват магнитна активност. Те имат подобни маси ($3.5\ M_{\odot}$ за β Ceti, $1.9\ M_{\odot}$ за EK Eri, $2.25\ M_{\odot}$ за V390 Aur), но са на различни стадии на еволюция – EK Eri се намира в началото на етапа на първо смесване, V390 Aur се намира в основата на клона на гигантите, а β Ceti се намира в етап на горене на хелий в ядрото. Отчитайки тези важни параметри, $v \sin i$, маса и положение на ДХР, могат да се изучат характеристиките на магнитните полета и причините за магнитната активност при гиганти от късен спектрален клас, както и да се проверят хипотезите за произход на магнитните полета (действие на динамо или фосилно поле).

2 Измерване на звездни магнитни полета

Атомна спектрална линия се получава, когато електрон прави преход между две дискретни енергийни нива. Когато атомът се намира в магнитно поле, тогава атомните спектрални линии се разцепват на няколко компоненти и това се нарича *ефект на Зееман*. Разрешените преходи между две енергийни нива следват правилото $\Delta m_j = -1, 0, 1$, където Δm_j е магнитното квантово число. При преход $\Delta m_j = 0$, се получава π -компонентата; при преход $\Delta m_j = -1$, се получава σ_{blue} -компонентата; при преход $\Delta m_j = 1$, се получава σ_{red} -компонентата. В спектъра, π -компонентата е централна и неотместена по дължина на вълната, докато σ_{blue} - и σ_{red} -компонентите се намират от двете страни на π -компонентата и тяхното отместване по дължина на вълната може да се намери чрез формулата $\Delta\lambda_{\sigma-\pi} = 4.67\bar{g}\lambda_0^2 B$, където λ_0 (μm) е дължина на вълната при отсъствие на магнитно поле, B (kG) е големината на магнитната индукция, \bar{g} е ефективен фактор на Ланде.

Когато векторът на магнитната индукция е успореден на лъча на зрение, π -компонентата не се наблюдава, а само двете σ -компоненти, които носят информация за кръгово поляризираната светлина. Поляризираната светлина се характеризира чрез четирите компоненти на вектора на Стокс – I (пълен интензитет), Q и U (линейно поляризирана светлина), V (кръгово поляризирана светлина). Кръговата поляризация е на порядък по-силна от линейната поляризация (Leroy 2000). Освен това, при гигантите измерените магнитни полета са много малки, от порядъка на няколко гауса. Поради тези две причина, при гигантите е възможно да се получат наблюдателни данни само за Стокс I и V профилите.

Наблюдателните данни, представени в дисертацията, са получени с два спектрополариметъра – *Narval* (Aurière 2003) на 2-m телескоп TBL в обсерваторията Pic du Midi, Франция, и *ESPaDOnS* (Donati et al. 2006 a) на 3.6-m CFHT, Хаваи. Те имат спектрално разрешение от 65 000 и интервал от дължини на вълните 370 – 1050 nm.

За детектиране и измерване на магнитното поле B_l е използван методът *LSD* (*Least Squares Deconvolution*) (Rees & Semel 1979, Donati et al. 1997, Wade et al. 2000 a, b). Чрез този метод се осредняват от няколко хиляди до десетки хиляди линии от един ешел спектър и по този начин се получават средни *LSD* Стокс I и V профили. Осреднените *LSD* профили имат по-високо отношение сигнал/шум. За осредняването се използва предварително създадена маска по атмосферните модели на Kurucz (1993). Звездните параметри, които са необходими за избор на маска, са ефективна температура T_{eff} , $\lg g$ и микротурбуленция. От осреднените *LSD* I и V профили на Стокс се получават стойностите за B_l по формулата:

$$B_l = -2.14 \times 10^{11} \frac{\int v V(v) dv}{\lambda g_{eff} c \int [1 - I(v)] dv} \quad (2.1)$$

където v (km/s) е радиалната скорост, λ (nm) е средна дължина на вълната, g_{eff} е ефективния фактор на Ланде и c (km/s) е скоростта на светлината във вакуум.

Структурата на магнитното поле на повърхността на звездата е реконструирана чрез метода *ZDI* (*Zeeman Doppler Imaging*) (Semel 1989, Donati & Brown 1997, Donati et al. 2006 b). Основава се на метода на максимална ентропия за възстановяване на изображения (Skilling & Bryan 1984). При *ZDI*, векторът на магнитната индукция се изразява в сферични координати B_r , B_θ и B_ϕ чрез сферични хармоники, като това позволява да се разграничават полоидалната и тороидалната компоненти на магнитното поле.

Чрез методът се генерират синтетични Стокс I и V профили и итеративно се сравняват с *LSD* I и V профили на Стокс, които са получени от наблюдателните данни. Синтетичните профили на Стокс се получават от изкуствена звезда, чиято повърхност се представя като мрежа от 2000 пиксела. Всеки пиксел има свой локален I и V профил на Стокс. Синтетичните Стокс I профили имат Гаусова форма, чиято ширина и дълбочина се нагласят така, че да има най-добро съвпадение между синтетичния профил и профила, получен

от наблюдения.

Звездните параметри, които са необходими при създаването на магнитна карта чрез ZDI , са T_{eff} , $\lg g$ и микротурбуленция (използва се същата маска, която вече е избрана при LSD), период на въртене, ъгъл на наклона i , $v \sin i$ и радиална скорост. Също така, необходимо е наблюдалителните данни да са добре разпределени по фаза.

3 β Ceti и ЕК Eri

3.1 β Ceti

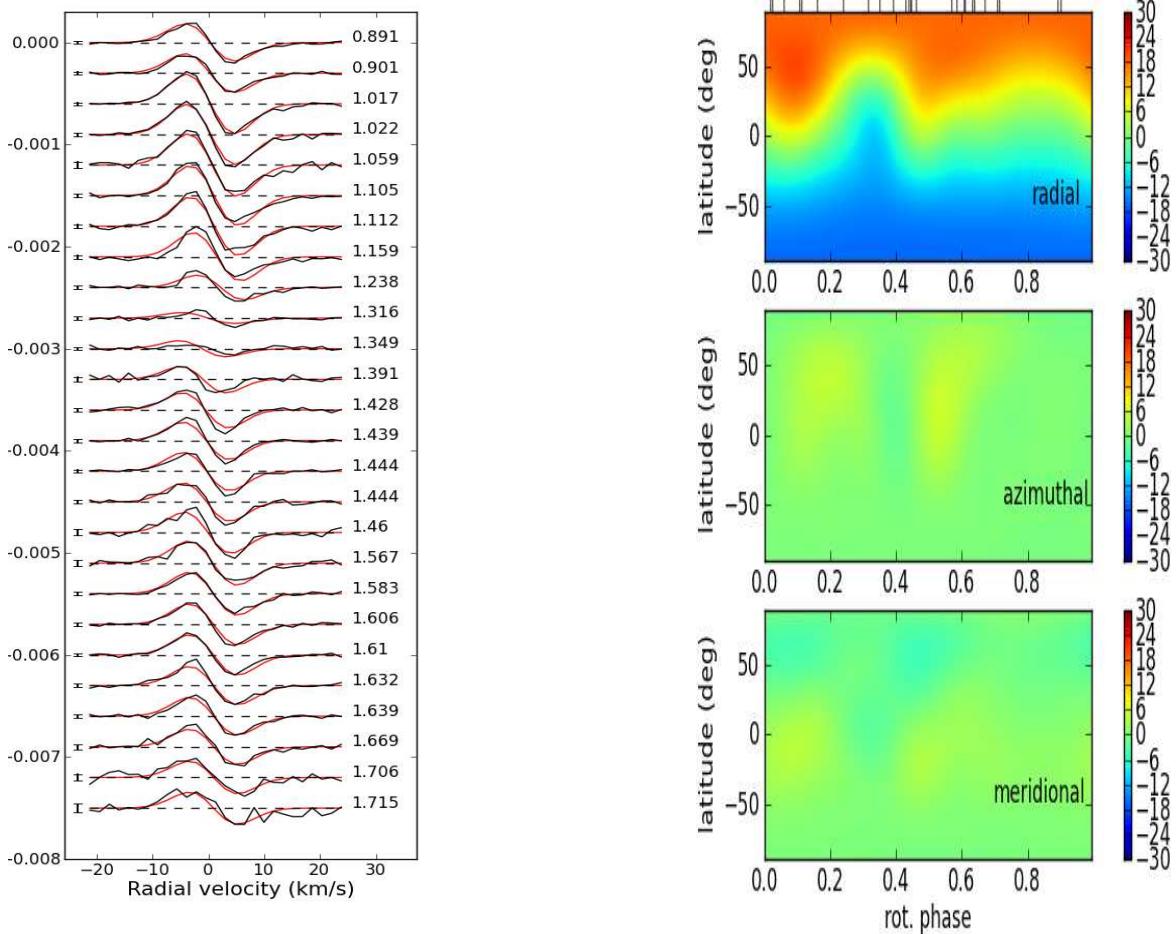
Наблюдателните данни за β Ceti са получени със спектрополариметрите *Narval* и *ESPaDOnS* и обхващат периода юни 2010 – януари 2012.

За да се използва ZDI метода за реконструиране на магнитна карта за звездата, са необходими като входящи параметри периода на въртене, ъгъла на наклон i и $v \sin i$. От литературата не е известен периода на въртене на β Ceti. Затова е използван метода на Petit et al. (2002) и получените за звездата наблюдателни данни. Генериирани са 200 магнитни модела всеки с различен период на въртене в интервала 100-300 дни. Най-доброят модел е с най-малка стойност на χ^2 и показва вероятен период от 215 дни на звездата. Също така, от магнитните модели са намерени и стойностите за другите два параметъра – $i = 60^\circ$ и $v \sin i = 3.5 \text{ km/s}$.

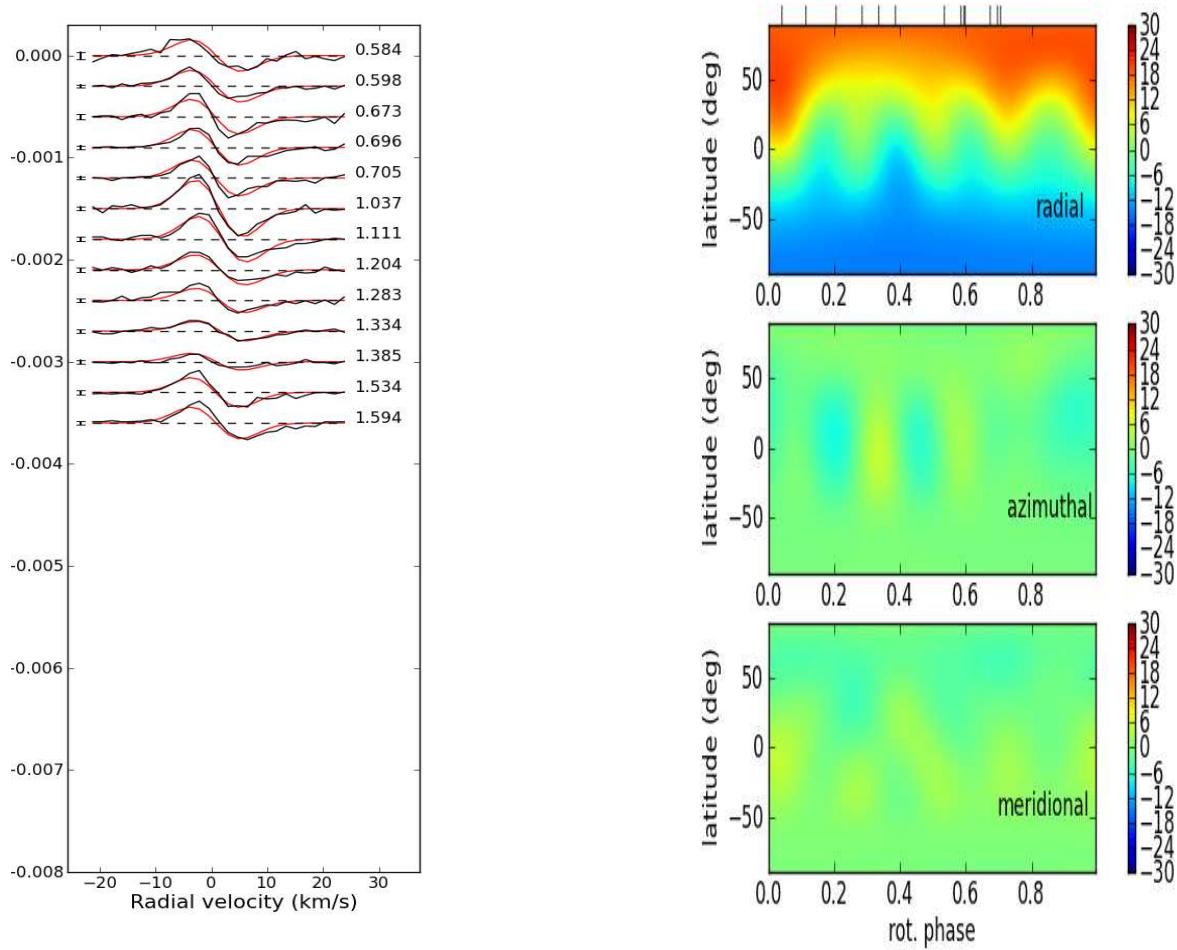
Реконструирани са две магнитни карти за β Ceti (Фиг. 3.1 и 3.2). И двете са получени със стойност на $\chi^2 = 2.1$, като над 96% от магнитната енергия се съдържа в полоидалното магнитно поле, от което доминира диполната компонента (около 85%). Големината на магнитната индукция на полето, създадено от дипола, е около 20 G . От двете карти не се забелязва промяна в структурата на магнитното поле на повърхността за периода на наблюдения юни 2010 – януари 2012, при период на въртене на звездата от 215 дни.

Измереното магнитно поле B_l е в интервала $0.1\text{--}8.2 \text{ G}$. Измерени са и индикаторите на активност в линиите CaII K, CaII IRT (854.2 nm), $H\alpha$, както и радиалната скорост. Тяхната промяна с времето добре корелира с промяната на B_l , което потвърждава простата диполна структура. Измерените стойности на величините и техните грешки са дадени в Таблица 3.1 от дисертацията (стр. 54).

Използвани са еволюционните модели на Charbonnel & Lagarde (2010) и Lagarde et al. (2012). Еволюционният трек на β Ceti показва, че звездата е произлязла от късна B звезда на ГП и има маса $3.5 M_\odot$.



Фигура 3.1: β Ceti в периода юни 2010 – декември 2010. **Ляв панел:** Нормализираните Стокс V профили – наблюдални профили (черни линии); синтетични профили (червени линии). **Десен панел:** Магнитна карта на β Ceti. Трите карти показват компонентите на магнитното поле в сферични координати (от горе на долу – радиална, азимутална и меридионална компоненти). Големината на магнитната индукция е в гауси. Вертикалните чертички на радиалната карта показват фазите, на които са получени наблюдения. (Фиг. 3.3 от дисертацията)



Фигура 3.2: β Ceti в периода юни 2011 – януари 2012. **Ляв панел:** Стокс V профили. **Десен панел:** Магнитна карта. (Фиг. 3.4 от дисертацията)

Изчислен е радиус $18 R_{\odot}$. За тази звезда е трудно да се определи дали се намира в основата на клона на гигантите или е в етап на горене на хелий в ядрото. Затова са сравнени стойности на обилието на литий и отношението $^{12}C/^{13}C$, които са получени от моделите, със стойностите им от литературата. Това сравнение показва, че звездата се намира в етап на горене на хелий в ядрото.

От еволюционните модели е намерена и стойността на $\tau_c = 171$ дни (τ_c е времето за обръщане на една конвективна клетка в конвективната обвивка). Знаейки и периода на въртене на звездата от 215 дни, получен чрез ZDI , може да се изчисли и числото на Ресби $Ro = 1.26$ ($Ro = P_{rot}/\tau_c$).

Изчислена е и големината на магнитната индукция на полето, създадено от дипола, когато звездата е била на ГП, по формулата на Stepien (1993). Получава се стойност от около $1650 G$. Aurière et al. (2007) установяват наблюдалечно, че няма Ap звездите със стойност на този параметър под $300 G$.

Резултатите, получени за β Ceti в това изследване, водят до заключението, че звездата е произлязла от Ap звезда на ГП и магнитната активност се дължи на фосилно поле.

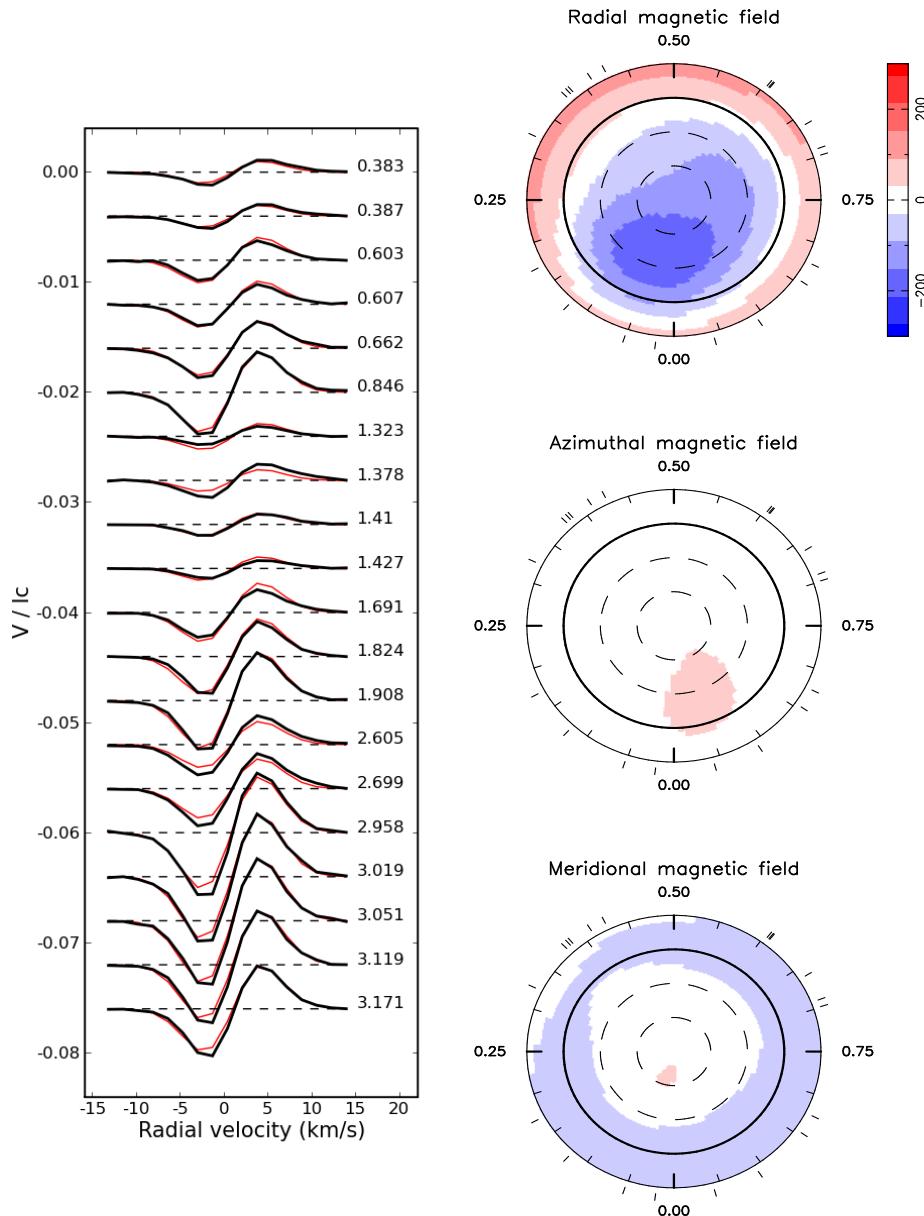
3.2 EK Eri

От по-ранно изследване на звездата EK Eri е известно, че тя се намира в началото на етапа на първо смесване (Aurière et al. 2008)). Тя е произлязла от Ap звезда на ГП. Големината на магнитната индукция на полето, създадено от дипола, когато звездата е била на ГП, е около $10\,000 G$.

Наблюдателните данни за EK Eri са получени с *Narval* в периода септември 2007 – март 2011.

Както за β Ceti, така и за EK Eri е използван метода на Petit et al. (2002) за търсене на период на въртене. Полученият период за EK Eri е 308.8 дни, което добре съвпада с периода по литературни данни.

Реконструирана е една магнитна карта за EK Eri (Фиг. 3.3). Повече от 98% от магнитната енергия се съдържа в полоидалното магнитно



Фигура 3.3: **Ляв панел:** Стокс V профили на ЕК Eri. **Десен панел:** Магнитна карта на ЕК Eri. (Фиг. 3.11 и Фиг. 3.12 от дисертацията)

поле, като повече от 80% принадлежи на диполната компонента. Големината на магнитната индукция на полето, създадено от дипола, е около 207 G .

Магнитното поле B_l е в интервала $(-99) - (-13)\text{ G}$. Измерени са и индикаторите на активност в линиите CaII K, CaII IRT (854.2 nm), $H\alpha$ и радиалната скорост. Измерените стойности на величините и техните грешки са дадени в Таблица 3.4 от дисертацията (стр. 71). Данните са фазирани и са сравнени с данни от Dall et al. (2010), които докладват за голямо фотометрично петно. Установено е, че

това петно съвпада с магнитното петно с отрицателна полярност на *ZDI* картата.

Заключението от това изследване за звездата EK Eri е, че тя също като β Ceti е произлязла от *Ap* звезда на ГП и магнитната активност се дължи на фосилно поле.

4 V390 Aur

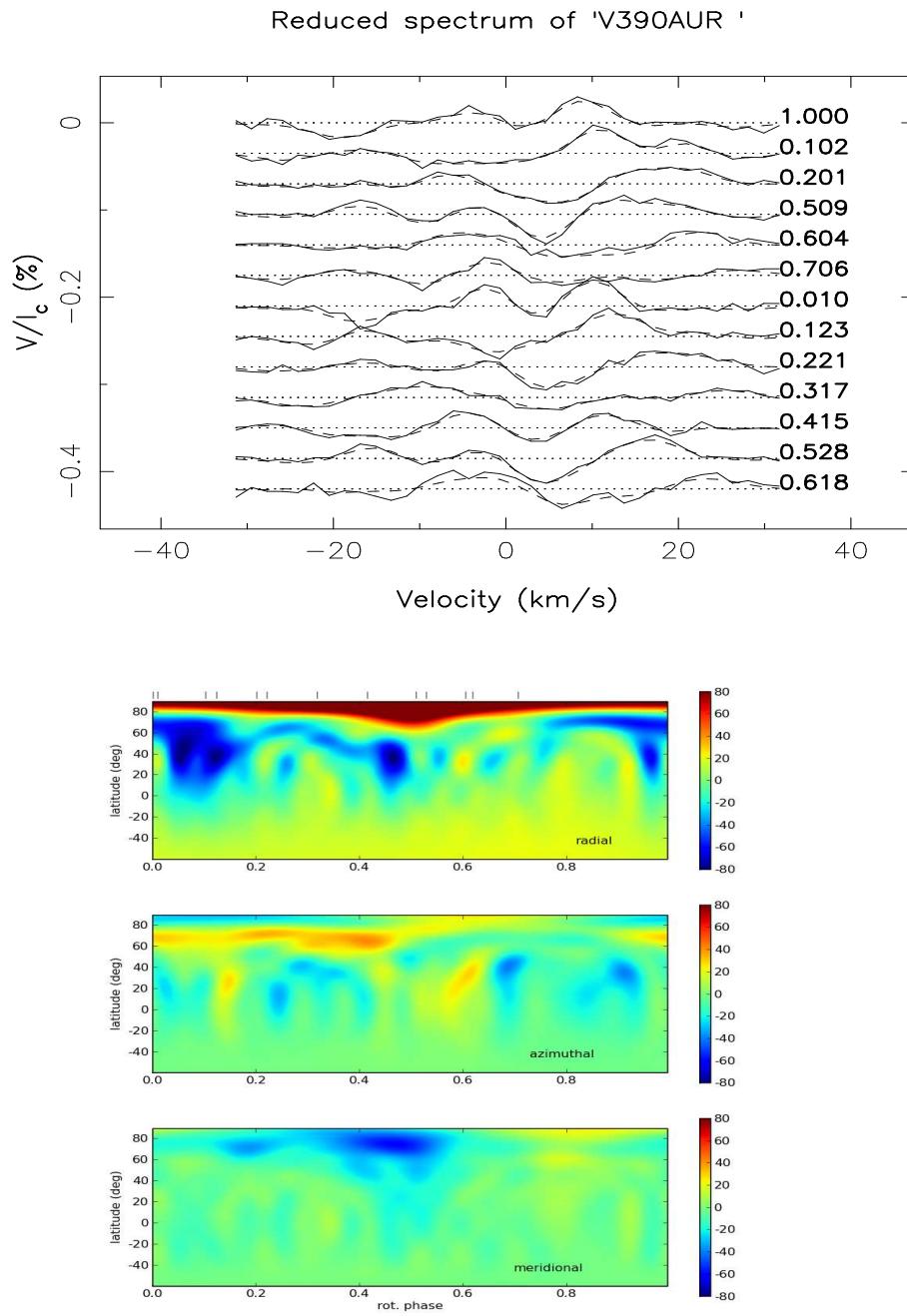
Наблюдателните данни за V390 Aur са получени с *Narval* в периода 14-30 септември 2008.

Магнитното поле B_l варира в интервала $(-13) - 1 G$. Измерени са и индикаторите на активност в линиите CaII K, CaII IRT ($854.2 nm$), $H\alpha$. Измерените стойности на величините и техните грешки са дадени в Таблица 4.1 от дисертацията (стр. 87). Периодът на звездата е известен от литературата и е 9.8 дни. Наблюдателните данни за индикаторите на активност, формиращи се в хромосферата, показват по-дълъг период на въртене за CaII IRT и $H\alpha$, в сравнение с CaII K и с фотометрично определения период. Този резултат за пръв път показва наличието на вертикален (по радиуса на звездата) градиент на въртене в атмосферата, което е в потвърждение на теоретичните модели на Palacios et al. (2006) и Brun & Palacios (2009).

Реконструирана е една магнитна карта за V390 Aur (Фиг. 4.1) с $v \sin i = 29 km/s$ и $i = 56^\circ$ (Fekel & Marschall 1991, Konstantinova-Antova et al. 2008 b). От фигурата се вижда, че Стокс V профилите имат по-сложна форма в сравнение с тези на β Ceti и ЕК Eri, което съответства на по-сложна структура на повърхностното магнитно поле. Около 80% от магнитната енергия се съдържа в полоидалното магнитно поле. В азимуталната карта се вижда, че тороидалната компонента на магнитното поле е близо до повърхността, което означава че динамото действа в конвективната обвивка.

Установено е, че звездата има диференциално въртене, което се определя от формулата $\Omega(l) = \Omega_{eq} - \Delta\Omega \sin^2 l$, където $\Omega(l)$ е въртенето на дадена ширина l , Ω_{eq} е въртенето на екватора и $\Delta\Omega$ е разликата във въртенето между полюса и екватора. Стойностите, определени по метода на Petit et al. (2002), са $\Omega_{eq} = 0.652 \pm 0.002 rad/d$ и $\Delta\Omega = 0.048 \pm 0.007 rad/d$.

Използвани са еволюционните модели на Charbonnel & Lagarde (2010) и е установено, че V390 Aur се намира в стадий на първо смесване в основата на клона на червените гиганти. Стандартните теоре-



Фигура 4.1: **Горен панел:** Стокс V профили на V390 Aur. **Долен панел:** Радиална, азимутална и меридионална компоненти на магнитното поле на V390 Aur. (Фиг. 4.2 от дисертацията)

тични модели не могат да обяснят бързото въртене на V390 Aur на сегашния еволюционен стадий, което означава че има допълнително изнасяне на ъглов момент от приядрените области. Чрез астросеизмологични изследвания по данни от телескопа Кеплер е установено, че при гигантите има пренос на ъглов момент от приядрените области към обвивката (Mosser et al. 2012). Този резултат потвърждава хипотезата на Simon & Drake (1989) за необичайно бързото въртене на V390 Aur.

Основни приноси

1. За първи път са изследвани характеристиките на магнитното поле на две единични звезди от късен спектрален клас, β Ceti и ЕК Eri, чрез метода ZDI и времевото поведение на индикаторите на активност в някои линии. Магнитният модел отговаря на диполна структура на магнитното поле. Двете звезди са на различен стадий на еволюция – ЕК Eri се намира в началото на етап на първо смесване в основата на клона на гигантите, а β Ceti е в етап на горене на хелий в ядрото. Звездите са произлезли от Ap звезди на ГП. С това изследване за пръв път се проследява еволюцията на магнитното поле на Ap звездите след ГП. Установено е, че то продължава да съществува в напреднали стадии на звездната еволюция.
2. Същото изследване е проведено и за друга звезда, V390 Aur, с подобна маса и намираща се в стадия на първо смесване в основата на клона на гигантите, но с по-бързо въртене. Магнитната активност на звездата се дължи на действието на динамо. Структурата на магнитното поле на повърхността е сложна и се наблюдава тороидална компонента близо до повърхността на звездата, което индикира действие на динамото в конвективната обвивка. За пръв път се наблюдава вертикален градиент на въртене в атмосферата, което е в съгласие с теоретичните модели на Palacios et al. (2006) и Brun & Palacios (2009).

Списък с публикации

Основните резултати от дисертацията са публикувани в следните статии:

1. “*Magnetic field structure in single late-type giants: β Ceti in 2010–2012*” – **Tsvetkova, S.**, Petit, P., Aurière, M., Konstantinova-Antova, R., Wade, G.A., Charbonnel, C., Decressin, T. & Bogdanovski, R., 2013, A&A, 556, 43
2. “*Magnetic field structure in single late-type giants: the effectively single giant V390 Aurigae*” – Konstantinova-Antova, R., Aurière, M., Petit, P., Charbonnel, C., **Tsvetkova, S.**, Lèbre, A. & Bogdanovski, R., 2012, A&A, 541, 44
3. “*A dominant magnetic dipole for the evolved Ap star candidate EK Eridani*” – Aurière, M., Konstantinova-Antova, R., Petit, P., Roudier, T., Donati, J.-F., Charbonnel, C., Dintrans, B., Lignières, F., Wade, G.A., Morgenthaler, A. & **Tsvetkova, S.**, 2011, A&A, 534, 139

Забелязани цитати в ADS

“Magnetic field structure in single late-type giants: β Ceti in 2010–2012” – Tsvetkova et al. 2013, A&A, 556, 43

1. Korhonen 2013, Invited review in the IAU Symposium 302 “Magnetic Fields Throughout Stellar Evolution”, [arXiv1310.3678]

“Magnetic field structure in single late-type giants: the effectively single giant V390 Aurigae” – Konstantinova-Antova et al. 2012, A&A, 541, 44

1. Mathur et al. 2014, JSWSC, 4, 15
2. Gaulme et al. 2014, ApJ, 785, 5
3. Airapetian et al. 2014, 18th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun Proceedings of Lowell Observatory [arXiv1409.3833]
4. Landstreet 2013, EAS, 63, 67
5. Hedges et al. 2013, ASPC, 479, 197

“A dominant magnetic dipole for the evolved Ap star candidate EK Eridani” – Aurière et al. 2011, A&A, 534, 139

1. Gaulme et al. 2014, ApJ, 785, 5
2. Bychkov et al. 2013, AJ, 146, 74
3. Mathys 2012, ASPC, 462, 295
4. Mathys et al. 2012, IAUTA, 28, 203

Благодарности

Изказвам дълбоката си благодарност и признателност на моя научен ръководител доц. д-р Ренада Константинова-Антова за неоценимата помощ и ползотворните дискусиии.

Благодарна съм на проф. Michel Aurière и д-р Pascal Petit за дискусиите по темата на дисертацията и за обучението ми за използваните в дисертацията методи и програми.

Благодаря на д-р Rémi Cabanac, директор на Télescope Bernard Lyot в обсерваторията Pic du Midi, Франция, за възможността да работя там като наблюдател през 2010 г. Благодаря и на екипа на TBL.

Благодаря на колегите и администрацията на Института по Астрономия с НАО за техните съвети и помощ.

Не на последно място, искам да благодаря на моите родители и брат ми за подкрепата.

Част от финансовата подкрепа е по проект BG05PO001-3.3.06-0047 и проект DO 02-85.

Използвана литература

- Aurière, M. 2003, in “Magnetism and Activity of the Sun and Stars”, Eds J. Arnaud and N. Meunier, EAS Publ. Series 9, 105
- Aurière, M., Wade, G.A., Silvester, J. et al. 2007, A&A, 475, 1053
- Aurière, M., Konstantinova-Antova, R., Petit, P. et al. 2008, A&A, 491, 499
- Aurière, M., Konstantinova-Antova, R., Petit, P., Wade, G. & Roudier, T. 2009 a, IAUS, 259, 431
- Aurière, M., Wade, G.A., Konstantinova-Antova, R. et al. 2009 b, A&A, 504, 231
- Aurière, M., Konstantinova-Antova, R., Charbonnel, C. et al. 2014, in prep.
- Bopp, B.W. & Rucinski, S.M. 1981, IAUS, 93, 177, “*The Rapidly Rotating Giants of the FK Comae Type*”, in Fundamental Problems in the Theory of Stellar Evolution, (Eds.) Sugimoto, D., Lamb, D.G., Schramm, D.N., IAU Symposium 93, held at Kyoto University, Kyoto, Japan, July 22–25, 1980, p. 177, D. Reidel, Dordrecht, Netherlands; Boston, U.S.A.
- Bopp, B.W. & Stencel, R.E. 1981, ApJ, 247, L131
- Brun, A.S. & Palacios, A. 2009, ApJ, 702, 1078
- Charbonnel, c. & Lagarde, N. 2010, A&A, 522, 10
- Dall, T.H., Bruntt, H., Stello, D. & Strassmeier, K.G. A&A, 2010, 514, 25
- Donati, J.-F. & Brown, S.F. 1997, A&A, 326, 1135
- Donati, J.-F., Semel, M., Carter, B.D., Rees, D.E. & Collier Cameron, A. 1997, MNRAS, 291, 658

- Donati, J.-F. 1999, MNRAS, 302, 457
- Donati, J.-F., Collier Cameron, A., Semel, M. et al. 2003 a, MNRAS, 345, 1145
- Donati, J.-F., Catala C., Landstreet J. & Petit P. 2006 a, in Casini R., Lites B., eds, Solar Polarization Workshop n4 Vol.358 of ASPC series, 362
- Donati, J.-F., Howarth, I.D., Jardine, M.M. et al. 2006 b, MNRAS, 370, 629
- Donati, J.-F., Jardine, M.M., Gregory, S.G. et al. 2007, MNRAS, 380, 1297
- Donati, J.-F., Jardine, M.M., Gregory, S.G. et al. 2008 a, MNRAS, 386, 1234
- Donati, J.-F., Morin, J., Petit, P., Delfosse, X., Forveille, T. et al. 2008 b, MNRAS, 390, 545
- Donati, J.-F. & Landstreet, J.D. 2009, ARA&A, 47, 333
- Fekel, F.C. & Marschall, L.A. 1991, AJ, 102, 1439
- Iben, I., Jr. 1967, ARA&A, 5, 571
- Kochukhov, O. & Wade, G.A. 2010, A&A, 513, 13
- Kochukhov, O., Mantere, M.J., Hackman, T. and Ilyin, I. 2013, A&A, 550, 84
- Konstantinova-Antova, R., Aurière, M., Alecian, E. et al. 2008 a, AIPC, 1043, 405
- Konstantinova-Antova, R., Aurière, M., Iliev, I.K. et al. 2008 b, A&A, 480, 475
- Konstantinova-Antova, R., Aurière, M., Schröder, K.-P. & Petit, P. 2009, IAUS, 259, 433

- Konstantinova-Antova, R., Aurière, M., Charbonnel, C. et al. 2013, BlgAJ, 19, 14
- Kurucz, R.L. 1993, SAO, Cambridge, CDROM 18
- Lagarde, N., Decressin, T., Charbonnel, C., Eggenberger, P., Ekström, S., Palacios, A. 2012, A&A, 543, A108
- Landstreet, J.D. 1992, A&A Rev., 4, 35
- Leroy, Jean-Louis 2000, “*Polarization of light and astronomical observation*”, vol. 4 of the Gordon and Breach Science Publishers
- Marsden, S.C., Petit, P., Jeffers, S. et al. 2014, MNRAS accepted (also on 2013arXiv1311.3374)
- Moffatt, H.K. 1978, “Magnetic field generation in electrically conducting fluids”, Cambridge: Cambridge Univ. Press
- Morgenthaler, A., Petit, P., Saar, S. et al. 2012, A&A, 540, 138
- Morin, J., Donati, J.-F., Forveille, T. et al. 2008 a, MNRAS, 384, 77
- Morin, J., Donati, J.-F., Petit, P., Delfosse, X., Forveille, T. et al. 2008 b, MNRAS, 390, 567
- Morin, J., Donati, J.-F., Petit, P. et al. 2010, MNRAS, 407, 2269
- Moss, D. 2001, ASPC, 248, 305
- Mosser, B., Goupil, M.J., Belkacem, K. et al. 2012, A&A, 548, 10
- Palacios, A., Charbonnel, C., Talon, S. & Siess, L. 2006, A&A, 453, 261
- Petit, P., Donati, J.-F. & Collier Cameron, A. 2002, MNRAS, 334, 374
- Petit, P., Donati, J.-F., Oliveira, J.M. et al. 2004 a, MNRAS, 351, 826
- Petit, P., Donati, J.-F., Wade, G.A. et al. 2004 b, MNRAS, 348, 1175

- Petit, P., Dintrans, B., Morgenthaler, A. et al. 2009, A&A, 508, L9
- Power, J., Wade, G.A., Aurière, M., Silvester, J. & Hanes, D. 2008, Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 38, 443-444
- Rees, D.E. & Semel, M.D. 1979, A&A, 74, 1
- Semel, M. 1989, A&A, 225, 456
- Sennhauser, C. & Berdyugina, S.V. 2011, A&A, 529, 100
- Silvester, J., Wade, G.A., Kochukhov, O. et al. 2012, MNRAS, 426, 1003
- Simon, T. & Drake, S.A. 1989, ApJ, 346, 303
- Skilling, J. & Bryan, R.K. 1984, MNRAS, 211, 111
- Stepień, K. 1993, ApJ, 416, 368
- Stibbs, D.W.N. 1950, MNRAS, 110, 395
- Wade, G.A., Donati, J.-F., Landstreet, J.D. & Shorlin, S.L.S. 2000 a, MNRAS, 313, 823
- Wade, G.A., Donati, J.-F., Landstreet, J.D. & Shorlin, S.L.S. 2000 b, MNRAS, 313, 851
- Wolff, S.C. 1968, PASP, 80, 281