

Магнитные CP–звезды главной последовательности.

I. Методы диагностики магнитных полей

И. И. Романюк

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 7.12.2004; принята к печати 9.12.2004.

Представлена первая часть обзора, посвященного магнитным CP–звездам. Рассмотрен начальный период исследований звездного магнетизма, показаны основные этапы развития методики и техники наблюдений. Изложены основы поляриметрии и некоторые приложения эффекта Зеемана, приведены сведения о способах вычисления эффективных факторов Ланде. Проведен подробный анализ различных методов измерений магнитных полей. Наиболее широкое распространение получили: 1) “фотографический” способ, заключающийся в поиске сдвигов ортогонально поляризованных σ -компонент линий и 2) фотоэлектрические измерения V-параметра Стокса в крыльях линий водорода. Рассмотрены также: метод моментов Матиса, мультилинейные методы спектрополяриметрии, в частности, LSD-метод Донати, доплер-зеемановское картирование и другие. Проанализированы достоинства и недостатки каждого из них, даны рекомендации к применению. Рассмотрены некоторые перспективы развития методов диагностики магнитных полей.

Ключевые слова: химически пекулярные звезды, магнитные поля звезд

MAGNETIC CP STARS OF THE MAIN SEQUENCE. I. DIAGNOSTIC TECHNIQUES FOR MAGNETIC FIELD, by I.I.Romanyuk. The first part of a survey dedicated to magnetic CP stars is presented. An initial stage of the study of stellar magnetism is considered and the essential stages in the methods and observational equipment development are shown. Fundamental polarimetry and some applications of the Zeeman effect are set out. Information about ways to calculate the effective Lande factors is adduced. A detailed analysis of different methods of magnetic field measurements is presented. The most widespread methods are: 1) a “photographic” method, which is the search for shifts of orthogonally polarized σ -components of lines; 2) photoelectric measurements of the V Stokes parameter in hydrogen line wings. The following methods are also considered: the Mathys method of momenta, multi-linear methods of spectropolarimetry, in particular, the LSD Donati’s method, the Doppler-Zeeman mapping and others. Advantages and disadvantages of each of them are analyzed. Application guidelines are given. Some prospects for the development of magnetic field diagnostics methods are considered.

Key words: stars: chemically peculiar – stars: magnetic fields

1. Введение

Магнетизм — широко распространенное явление в нашей Галактике и за ее пределами. Магнитные поля отвечают за генерацию различного рода вспышек, взрывов и других проявлений нестационарности космических объектов. Величины измеряемых полей охватывают очень широкий диапазон: микрогауссы — межзвездная среда, миллигауссы — плотные протозвездные облака, единицы гауссов — общее магнитное поле Солнца, килогауссы — локальные поля в пятнах на Солнце и солнечно-подобных звездах и общее магнитное

поле химически пекулярных звезд, мегагауссы — у магнитных белых карликов и других вырожденных объектов.

Исследование механизмов генерации и поддержания космических магнитных полей, а также их роли в эволюции звезд и галактик — одно из важнейших направлений исследований в современной астрофизике. Если не принимать во внимание счастливых случайных открытий, то в экспериментальной астрофизике закономерно реализуются два пути получения новых знаний: 1) внедрение все более мощных телескопов, чувствитель-

ных и точных светоприемников, рафинированных методов обработки; 2) длительные ряды наблюдений с одной и той же аппаратурой для выявления закономерностей в поведении тех или иных объектов.

Разумеется, указанные пути могут сосуществовать одновременно, но практика показывает, что из-за большой конкуренции при распределении наблюдательного времени на больших инструментах второй путь реализуется редко, только в случае наблюдения уникальных объектов. А принципиально новые результаты, как правило, есть следствием развития и внедрения новых методов.

Ярким примером, подтверждающим это сообщение, является история исследований космического магнетизма: до создания специальных приборов — анализаторов поляризации — о магнитных полях за пределами Земли не было известно ничего. А после разработки методов магнитных измерений небесных объектов, что привело к обнаружению магнитных полей солнечных пятен Хэллом в 1908 г. и звезд Бэбкоком в 1947 г., возникла новая наука — космическая электродинамика.

Актуальность исследований звездных магнитных полей подтверждается еще и тем, что оборудованием для измерения эффекта Зеемана оснащались все вступающие в строй крупнейшие телескопы мира. Так было в 50-е и 60-е годы XX века (5-м телескоп Паломарской обсерватории и 3-м — Ликской), в 70-е и 80-е, когда магнитные наблюдения начались на 6-м телескопе САО и 3.6-м в ESO (Чили). В XXI веке зеемановские наблюдения включены в программу работ крупнейших 8-м телескопов ESO VLT.

В двадцатом веке взгляды на роль магнитных полей в астрофизических процессах менялись кардинально: от полного игнорирования до преувеличения их действия. Фразу типа: "...это может быть следствием влияния магнитного поля"— нередко можно встретить в статьях, в которых не могут объяснить известными механизмами те или иные явления. По меткому замечанию патриарха исследований космического магнетизма Леона Местеля (2001) "ситуация с ролью магнитных полей в астрономии напоминает роль секса в психологии. До Фрейда она игнорировалась, сразу после Фрейда им стали объяснять все. Но со временем эволюция привела к более сбалансированному подходу. К счастью, мы в астрофизике также подошли к рубежу, когда необходимость сбалансированного подхода к роли магнитных полей очевидна."

Астрономами были разработаны различные методы исследования и получены надежные доказательства существования крупномасштабных магнитных полей в нашей Галактике, общих и локальных полей у звезд различных типов. Наиболее

развитым способом изучения магнетизма звезд является анализ проявлений эффекта Зеемана в линиях методами спектрополяриметрии. Как правило другие методы используются, когда провести анализ проявлений эффекта Зеемана по тем или иным причинам не удастся.

Химически пекулярные (CP) звезды очень удобные объекты для исследований космического магнетизма: обладают глобальными общими полями большой интенсивности, достаточно яркие, что позволяет проводить очень детальные и высокоточные исследования их спектров на крупных телескопах. Это, в свою очередь, дает возможность выявлять различные закономерности в сложном процессе взаимодействия плазмы и магнитного поля.

С другой стороны, CP-звезды обладают уникальными парадоксальными свойствами. В то время как на Солнце и во многих других объектах магнитные поля являются причиной различных взрывов и вспышек, в случае CP-звезд они играют стабилизирующую роль: для объяснения химических пекулярностей требуется, чтобы в стабильной нетурбулентной атмосфере работал механизм диффузии, который может создать за миллионы лет наблюдаемые пятна и другие аномалии химического состава. А обеспечивать стабильность атмосферы должно магнитное поле!

Несмотря на более чем полувековую историю исследований, магнитные CP-звезды все еще остаются плохо понимаемыми объектами. В первую очередь не решена проблема происхождения их крупномасштабных полей. Теоретиками предложены различные объяснения, но наиболее разработанными являются две конкурирующие гипотезы: 1) магнитное поле реликтовое, оно образовалось вместе со звездой из межзвездной среды, 2) в конвективном ядре CP-звезд работает механизм динамо, сгенерированное поле выносится на поверхность и становится доступным для наблюдений.

Выяснение реальной картины образования магнитных полей CP-звезд и их дальнейшей эволюции может быть выполнено путем наблюдательной проверки следствий работы альтернативных механизмов (реликтового или динамо в ядре). Для решения этой трудной задачи требуется провести наблюдения магнитных полей большого количества CP-звезд, имеющих разные массы, температуры, скорости вращения, возраст и пространственное распределение в Галактике.

Измерения магнитных полей CP-звезд можно выполнить только на очень крупных телескопах, методика наблюдений и редукции данных должна обеспечивать стабильность системы и соответствовать единым стандартам. Под руководством

Ю. В. Глаголевского в САО РАН для этого был создан комплекс аппаратуры. Разнообразные, часто не имеющие аналогов приборы, позволили отечественным исследователям проводить на 6-м телескопе уникальные измерения магнитных полей звезд. За четверть века на БТА получен большой наблюдательный материал: примерно 30% от всех выполненных в мире наблюдений СР-звезд в 1977–2004 г., открыто около 40% новых магнитных звезд (из найденных в этот период), построено около четверти магнитных кривых. Результаты, полученные на 6-м телескопе, широко известны: САО РАН является одним из мировых центров в области исследований звездного магнетизма.

2. Начальный период исследований звездного магнетизма

2.1. Открытие явления расщепления спектральных линий во внешнем магнитном поле. Некоторые определения

Эффект Зеемана — явление расщепления спектральных линий под воздействием на излучающее вещество внешнего магнитного поля, назван по имени первооткрывателя — голландского физика Питера Зеемана.

В 1896 г. П. Зееман поместил горелку с пламенем натрия между полюсами электромагнита и обнаружил, что при включении достаточно сильного поля D-линия натрия (сливающийся при низком разрешении дублет 5890 и 5896 Å) расширяется, при этом края этой линии поляризованы. Первое объяснение Зееман-эффекта было дано Х. Лоренцом в 1897 г. в рамках классической теории.

Расщепления линий Зееман не видел, важно было лишь то, что края расширенной линии поляризованы в соответствии с классической теорией (см., например, Шпольский, 1984). Если бы он воспользовался более сильным полем или спектральной аппаратурой с более высокой разрешающей способностью, то увидел бы, что в случае натрия расщепление наблюдается, но картина эта более сложная, чем простой триплет.

Оказалось, что видимая картина расщепления зависит от направления наблюдения по отношению к направлению магнитного поля. При наблюдениях перпендикулярно полю (поперечный эффект) все компоненты линии поляризованы линейно: часть параллельно полю (π -компоненты), часть — перпендикулярно (σ -компоненты). При наблюдениях вдоль поля (продольный эффект) остаются видимыми лишь σ -компоненты, однако их линейная поляризация сменяется круговой.

Распределение интенсивности в системе компонентов оказывается сложным.

Зееман-эффект, наблюдаемый в спектрах поглощения, получил название обратного, все его закономерности аналогичны закономерностям прямого эффекта (наблюдаемого в линиях излучения), но имеют противоположный знак. Если линия при поперечном эффекте расщепляется на три компонента — это нормальный Зееман-эффект, а расщепление на большее число компонентов получило название аномального эффекта Зеемана. Полное объяснение он получил на основе квантовой теории.

В случае аномального эффекта в спектральных линиях атомов вместо несмещенной π -компоненты наблюдается группа π -компонент, а вместо каждой σ -компоненты — группа σ -компонент, причем картина расщепления остается симметричной относительно первоначальной нерасщепленной линии. Расстояния между соседними π -компонентами и соседними σ -компонентами одинаковы. Общее их число может достигать нескольких десятков.

В 1912 г. Пашен и Бак открыли, что в очень сильных полях сложный эффект Зеемана вновь становится простым: сложная картина расщепления заменяется простым триплетом Лоренца. Это явление называется магнито-оптическим превращением или эффектом Пашена-Бака. В данном случае сильным называется такое поле, которое вызывает расщепление, значительно превосходящее естественное мультиплетное расщепление. В магнитных полях порядка миллионов гауссов существенным становится квадратичный эффект Зеемана.

2.2. Обнаружение магнитного поля на Солнце

Начало изучению космического магнетизма положил Джордж Э. Хэл, в 1908 г. открывший магнитные поля солнечных пятен. Еще до открытия Зеемана, Юнг в 1892 г. увидел, что одни и те же линии вне пятен узкие и резкие, а в пятнах уширены, а некоторые из них даже расщепляются на две.

Желая проверить, не является ли это проявлением эффекта Зеемана, Хэл в 1908 г. установил перед щелью спектрографа башенного солнечного телескопа ромб Френеля и призму Николя. Вот как он сам (Хэл, 1908) описывает это открытие: “25 июня я получил несколько хороших фотографий, используя третий порядок в области 6000–6200 Å. ... При повороте призмы Николя на 90° относительная интенсивность компонент пятенных дублетов поменялась. Более того, многие из уширенных линий сдвинулись при вращении призмы Ни-

коля, показывая, что свет в крыльях этих линий циркулярно поляризован в противоположных направлениях. Смещение уширенных линий происходит точно таким же образом, как это было обнаружено Зеemanом при его первых наблюдениях излучения в магнитном поле.” Магнитное поле солнечных пятен имело величину порядка нескольких килогауссов.

Отметим, что Хэл и ранее пытался обнаружить магнитные поля на Солнце. Еще в 1905 г. он попробовал визуально определить линейную поляризацию как следствие Зеeman-эффекта, но безуспешно. Тогда он решил применить фотопластинку (подробнее об этом см. в отличной статье Стемпеня, 1997). Таким образом, применение новой техники позволило открыть магнитные поля в пятнах на Солнце.

В дальнейшем Хэл (1913) попытался обнаружить и общее магнитное поле Солнца, используя один из самых совершенных в то время 75-футовый спектрограф башенного солнечного телескопа. Он констатирует, что зеемановский сдвиг измеряется с большим трудом, тем не менее, он предполагает, что магнитное поле на полюсе Солнца составляет 50 Гс. Более сильные линии были смещены меньше, чем слабые, а так как в это время уже было известно, что сильные линии возникают в более высоких слоях атмосферы, то Хэл интерпретировал такую зависимость уменьшением поля с высотой.

Более сорока лет астрономы считали, что общее поле Солнца составляет 50 Гс. Даже в 1946 г. Тиссен нашел его величину 53 ± 12 Гс в предположении, что оно дипольно. И только в 1953 г. Бэбкок (1953) с помощью разработанной им фотоэлектрической методики действительно обнаружил очень слабое (единицы гауссов) общее магнитное поле Солнца. Он считал, что причина ошибок Хэла и других авторов заключалась в том, что приходилось измерять очень малые смещения линий, заметно различающихся по интенсивности.

Таким образом, история обнаружения и дальнейшего изучения магнитного поля Солнца весьма поучительна: в то время как сильные поля пятен были верно измерены сразу же после их обнаружения, слабое общее поле долго не поддавалось измерениям, десятилетиями сохранялись стойкие заблуждения о его величине и структуре.

2.3. Обнаружение магнитных полей звезд

Еще в 1915 г. Хэл рассмотрел возможность обнаружения магнитных полей звезд и начал разработку аппаратуры, пригодной для таких исследований, но дальнейшего развития эта работа не получила (см. Бэбкок, 1967).

В 1937 г. Миннаерт (1937) опубликовал работу “О возможности обнаружения общего магнитного поля звезд”. Если магнитное поле звезд такое же, как общее поле Солнца, то вызванный им сдвиг линий ($\sim 0.001 \text{ \AA}$) измерить невозможно, но если поля в 10–20 раз больше солнечных, то по спектрам с высоким разрешением надо искать дублеты с циркулярно поляризованными компонентами. Как и в классическом эксперименте Хэла, он предложил установить призму Николя и четвертьволновую пластинку, ориентированную под углом 45° . Поворачивая пластинку на 90° , мы получим серию спектров, в которых линии будут сдвинуты влево или вправо от нулевого положения. Измерения дифференциальны, поэтому можно ожидать высокой точности. Если наблюдать звезду, у которой ось вращения повернута на нас, легче можно измерить сдвиги резких линий.

Если бы Миннаерту удалось придумать способ, как получить **одновременно** лево- и правополярно поляризованные спектры, то открывателем звездного магнетизма стал бы он.

Но магнитное поле звезд было обнаружено только через 9 лет, в 1946 г. И сделал это выдающийся астроном Горацио Бэбкок (1947a,b), тот самый, который в 1953 г. верно определил величину общего магнитного поля Солнца. Он основывался в своих действиях на популярном предположении (Миннаерт, 1937), что магнитное поле генерируется звездами и напряженность поля пропорциональна скорости вращения на экваторе. Сравнивая магнитное поле Солнца (тогда 50 Гс — неверная величина) и $v \sin i = 2$ км/с со скоростью вращения В,А,F-звезд ($v \sin i = 60$ км/с), он получил, что их магнитное поле может достигать 1500 Гс.

Сделав ряд упрощающих предположений (ось вращения и магнитная ось совпадают и направлены прямо на наблюдателя; звезда имеет сферическую форму; коэффициент потемнения диска к краю равен 0.45; эквивалентные ширины линий поглощения остаются постоянными вдоль проекции полусферы звезды, обращенной к наблюдателю; распределение магнитного поля подобно распределению магнитного поля однородно намагниченной сферы) и принимая во внимание формулы Сирса (1913), Бэбкок решил наблюдать А-звезды с узкими и резкими линиями, предполагая, что он их видит с полюса. В таком случае интегральный эффект Зеемана будет иметь преимущественное направление, и компоненты линий прошедшего через анализатор право- и лево-циркулярно поляризованного света будут смещены в противоположных направлениях пропорционально силе поля.

Бэбкок разработал и изготовил дифференциальный анализатор круговой поляризации — прибор, принципиальная схема которого (чет-

вертьволновая пластинка + кристалл исландского шпата) используется до наших дней. При помощи этого анализатора на фотопластинке регистрировались одновременно два противоположно циркулярно поляризованных спектра, что при использовании спектрографа высокого разрешения позволяло получить очень хорошую точность. Измерения поля сводились к определению сдвигов между левыми и правыми сигма-компонентами линий, видимыми отдельно в каждой поляризации. Было найдено, что смещение центра тяжести зеемановских компонент $\Delta\lambda \propto \pm 0.311B$, т.е. интегральный эффект по всей звезде составляет 31% от того эффекта, который имел бы место, если бы мы смогли выделить свет, идущий от магнитного полюса звезды. У первой же звезды, которую он наблюдал с анализатором (78 Vir с аномальными линиями металлов), обнаружилось поле на полюсе величиной 1500 Гс, что прекрасно согласовалось с первоначальными предположениями!

В ранних работах Бэбкок (1947a,b) опубликовал величину так называемого поля на полюсе V_p и получил выражение, связывающее напряженность магнитного поля у полюса звезды и сдвиг компонент $\Delta\lambda$ (в Å) нормального триплета, наблюдаемого с помощью анализатора круговой поляризации:

$$\Delta\lambda = 1.45 \cdot 10^{-13} \lambda^2 g B_p. \quad (1)$$

Однако в дальнейшем он использует понятие эффективного магнитного поля B_e , которое составляет $0.311B_p$.

В этом случае смещение для нормального триплета (в Å)

$$\Delta\lambda = 4.67 \cdot 10^{-13} \lambda^2 g B_e, \quad (2)$$

где g — фактор Ланде соответствующего энергетического перехода, от которого зависит число компонент и относительное расстояние между ними, их интенсивности и поляризация, в то время как масштаб картины пропорционален магнитному полю.

Несмотря на то, что зеемановское расщепление возрастает как λ^2 , на практике большинство измерений звездных магнитных полей проводилось в синей спектральной области. В желтой и красной областях спектра меньше удобных линий металлов; кроме того, фотографические эмульсии были более зернистыми и менее чувствительными. Позже, с развитием цифровых светоприемников (ФЭУ и ПЗС-матриц), много измерений было выполнено и в красной области.

История показала, что Бэбкок исключительно удачно подобрал объекты для поиска звездного магнетизма: только у Ар- и Вр-звезд обнаружены

регулярные, обладающие упорядоченной крупномасштабной структурой поля большой величины. И только у этих звезд и можно было их обнаружить в середине XX века с той методикой, которой он воспользовался. С фотографической техникой, единственной, которая существовала в те времена, найти магнитные поля сложной структуры (подобные солнечным) было невозможно.

3. Некоторые общие вопросы спектрополяриметрии. Эффект Зеемана

3.1. Введение

Величины магнитных полей в различных космических объектах могут различаться на 20 порядков: от 10^{-6} Гс в межзвездной среде до 10^{12} – 10^{14} Гс и более в нейтронных звездах и магнетарах. Исследование столь различных величин требует применения разных подходов.

Обстоятельный обзор существующих методов исследований космических магнитных полей сделан Гнединым и Нацвлишвили (2000). За подробностями отошлем читателя к нему, здесь отметим лишь самое существенное: они делятся на прямые и непрямые.

Главный и широко используемый прямой метод — исследование эффекта Зеемана в различных его проявлениях, что позволяет надежно обнаруживать и измерять магнитные поля. Непрямые методы — исследование фарадеевского вращения и спектра линейной поляризации, эффектов звездной активности в отдельных хромосферных линиях, тепловой и нетепловой радиоэмиссии и др. — в значительной степени модельно зависимы, поэтому интерпретация результатов измерений может быть неоднозначной.

Важнейшее значение для астрофизики имеет исследование поляризации магнитоактивной плазмы. Крупным вкладом в развитие указанного направления является фундаментальная монография российских ученых (Долгинов и др., 1979).

3.2. Основные определения поляриметрии

3.2.1. Механизмы возникновения поляризации

Основные физические механизмы, ответственные за возникновение поляризации света в астрофизических условиях, перечислены в табл. 1. Сведения собраны из различных литературных источников (главным образом, монография Долгинова и др. (1979), обзор Гнедина и Нацвлишвили (2000) и некоторые другие).

Как видно из табл. 1, причины возникновения поляризации могут быть самыми разными. В об-

Таблица 1: Поляризация астрономических объектов

Механизм возникновения	Проявления в астрофизических объектах
Отражение от твердой поверхности	Луна, планеты земной группы и астероиды
Рассеивание света на мелких частицах	Зодиакальный свет, кометы, Венера, спиральные галактики, межзвездная поляризация света
Рассеивание света на молекулах (релеевское рассеивание)	Юпитер и внешние планеты, Венера, звезды поздних типов
Рассеивание света свободными электронами (томпсоновское рассеивание)	Солнечная корона, оболочки звезд ранних типов
Эффект Ханле (резонансное рассеивание связанных электронов в магнитных полях)	Линейная поляризация в эмиссионных линиях в солнечной хромосфере и короне
Эффект Зеемана	Солнечные пятна, магнитные звезды и белые карлики (циркулярная и линейная поляризация в спектральных линиях), радиочастотные эмиссионные линии молекул нейтрального водорода
“Серотельная” магнитоэмиссия	Белые карлики (циркулярная и линейная поляризация в непрерывном спектре)
Гирорезонансная эмиссия (магнитное тормозное излучение)	Солнечная хромосфера и корона
Синхротронная эмиссия (в некоторых случаях — обратное комптоновское рассеивание или электростатическое тормозное излучение)	Дециметровое радиоизлучение Юпитера, Крабовидная туманность, пульсары, радиоэмиссия короны Галактики, радиогалактики, квазары

щем случае она имеет малую величину и, следовательно, определяется в эксперименте низким отношением сигнала к шуму.

3.2.2. Параметры Стокса

Поляризация света в общем случае описывается вектором Стокса, состоящим из 4-х элементов (I , Q , U , V), имеющих размерность интенсивности. Первый вектор Стокса I представляет собой общую интенсивность луча, второй и третий параметры Q и U характеризуют интенсивности света, линейно поляризованного в различных плоскостях, в то время как четвертый V -параметр описывает интенсивность циркулярно поляризованной составляющей. Если ненулевая величина V присутствует одновременно с ненулевой величиной хотя бы одного из параметров U и Q , свет эллиптически поляризован.

Величина Q соответствует разности интенсивностей между ортогональными колебаниями, азимуты которых образуют координатную систему для вектора: в звездной поляриметрии принято, что положительная величина Q соответствует колебаниям, азимуты которых находятся в направлении север-юг, в то время как отрицательная величина Q будет в азимуте, лежащем в направлении запад-восток. Величина U соответствует разности интенсивностей между ортогональными колебани-

ями, азимуты которых повернуты на 45° на север через восток по отношению к направлению положительного значения Q . Величина V есть разность интенсивностей между право- и левоциркулярно поляризованными компонентами.

При частично поляризованном свете, который представляет собой совокупность некогерентных световых волн с различными состояниями поляризации, суммировать сами поляризации нельзя, так как электрические векторы неаддитивны для некогерентных световых колебаний. Поэтому здесь надо использовать совокупность 4-х параметров Стокса, которые для них аддитивны.

На практике обычно пользуются нормализованными параметрами:

$$q = Q/I, \quad u = U/I, \quad v = V/I.$$

Величина линейной поляризации определяется как

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad p = \sqrt{Q^2 + U^2}/I,$$

величина круговой поляризации

$$v = V/I.$$

Угол θ между большой осью эллипса и направлением на северный небесный полюс определяет позиционный угол плоскости поляризации, исходя из соотношения:

$$\operatorname{tg} 2\theta = U/Q.$$

Для регистрации наблюдений используется оптическая система, работающая как поляризатор и помещаемая перед входной щелью спектрографа. Чтобы измерить один из параметров Стокса, описывающих линейную поляризацию (например, Q), необходимо получать профили спектральной линии при двух взаимно-перпендикулярных положениях поляризатора. Разность этих профилей дает профиль Q .

Для того, чтобы измерить профиль U -параметра Стокса, нужно повернуть ось поляризатора на 45° от начального положения и повторить оба наблюдения. Поэтому для получения профилей линейной поляризации требуется времени в два раза больше, чем для профиля круговой поляризации, и в четыре раза больше, чем для профиля интенсивности. Кроме того, профили линейной поляризации содержат гораздо больше деталей и имеют в среднем меньшую амплитуду, чем профили круговой поляризации. Это накладывает высокие требования на точность и спектральное разрешение.

Более широкое использование круговой поляризации для исследований геометрии магнитного поля обусловлено также тем, что V -параметр Стокса является инвариантом относительно поворота оси анализатора в картинной плоскости. Иначе обстоит дело с Q и U -параметрами Стокса, которые сильно зависят от величины позиционного угла α оси поляризатора, что приводит к значительным техническим трудностям с вращающимся полем зрения. Даже точное знание позиционного угла не решает полностью проблему, поскольку оптимальное значение α неизвестно. При неудачном выборе этого угла амплитуда линейной поляризации может оказаться на уровне шумов наблюдений. Чтобы избежать этой случайности, необходимо регистрировать профили Q и U с разными величинами угла α поляризатора, покрывающими диапазон от 0 до 90° . Еще Бэбкок (1953) отметил, что реализация этой методики требует больших затрат наблюдательного времени и возможна лишь на самых крупных телескопах и для самых ярких звезд.

Степанов и Северный (1962) предложили фотоэлектрический метод измерения величины и направления поля на Солнце, характеризуемого углом наклона вектора поля к лучу зрения γ и азимутом поперечной составляющей поля θ , что дает абсолютную величину и направление вектора поля.

3.3. Перенос поляризованного излучения

Диагностика свойств магнитных полей в звездных атмосферах не является простой задачей. В большинстве случаев измеряются некоторые величи-

ны, характеризующие данные спектральные линии, потом по ним определяются свойства полей при помощи разных моделей формирования линий. Из литературы видно, что очень существенно, какое количество допущений при этом было сделано.

Практически во всех случаях анализ магнитных полей у невырожденных звезд основывается на измерении зеемановского расщепления спектральных линий. При этом необходимо принимать во внимание три возможности: 1) в магнитном поле величиной B линии расщепляются на π - и σ -компоненты, разделение которых пропорционально B ; 2) поперечное поле приводит к ортогональной линейной поляризации π - и σ -компонент, параллельно и перпендикулярно полю; 3) продольное поле приводит только к σ -компонентам, которые имеют противоположные циркулярные поляризации. Свойства наблюдаемых спектральных линий обусловлены совместным действием зеемановского расщепления и переносом поляризованного излучения.

Впервые решение уравнения переноса в присутствии магнитного поля для звездных атмосфер предложено Унно (1956). Остановимся в нашем обзоре только на ключевых моментах теории. Больше внимания уделим работам наших соотечественников: как правило, они недостаточно представлены в англоязычной литературе и поэтому не в полной мере цитируются в зарубежных обзорах. В первую очередь отметим работы, выполненные представителями лениградской школы Ю. Н. Гнединым, А. З. Долгиновым, Н. А. Силантьевым, Г. Г. Павловым и др. Основные результаты исследований уравнения переноса поляризованного излучения в анизотропной среде обобщены в фундаментальной монографии Долгинова и др., 1979 (второе ее издание на английском языке вышло в 1996 г. (Долгинов и др., 1996)).

На ранних стадиях изучения звездного магнетизма определенный вклад в понимание процессов формирования линий в магнитном поле внесли работы Д. Н. Рачковского (см., например, Рачковский, 1972, 1974).

В. Л. Хохлова основала направление, позволяющее численными методами прикладной математики проводить тонкие исследования атмосфер магнитных звезд. Хохловой и ее сотрудниками путем решения обратной задачи по локальным профилям линий были построены карты распределения элементов и магнитного поля по поверхности звезды. Локальные профили являются результатом переноса излучения в атмосфере в каждой точке ее поверхности и зависят от локального обилия элементов, величины магнитного поля и локальных физических условий.

Основные результаты обобщены в обзоре Хохловой (1983). В дальнейшем это направление было развито Н. Е. Пискуновым в теоретическом плане и Т. А. Рябчиковой — в практическом.

Ланди дель Иннокенти (1983) предложил общую формулировку уравнений переноса поляризованного света. Он сделал ряд упрощающих предположений, в частности, атмосфера принималась плоско-параллельной и статичной. Линии получаются от излучения, усредненного по всей видимой поверхности звезды, значительно больший вес при этом приходится на ее центр.

При дальнейшем изложении воспользуемся подходом, примененным Ландстритом (2001). Для того, чтобы понять, как спектральные линии меняются из-за магнитного поля, полезно рассмотреть решения 4-х уравнений переноса для параметров Стокса I (интенсивность), Q и U (линейная поляризация) и V (круговая поляризация) в случае атмосферы Миллна-Эддингтона (линейная функция источника, постоянное отношение непрозрачности в линии к континууму) (Матис, 1989).

В случае слабых линий или слабых полей решения будут простые. Фундаментальные допущения, которые используются в большинстве методов измерений магнитных полей, следующие: 1) среднее разделение циркулярно поляризованных линий $(I+V)$ и $(I-V)$ пропорционально $z\langle B_z \rangle$ (условие слабого поля), здесь z — средний эффективный фактор Ланде, $\langle B_z \rangle$ — усредненная по лучу зрения компонента магнитного поля; 2) в приближении слабого поля $V \sim z\langle B_z \rangle \frac{dI}{d\lambda}$ в локальной линии (в случае малого уширения $v \sin i$); 3) разделение разрешенных σ -компонент пропорционально $z\langle B_z \rangle$ (условие слабого поля). Эти предположения являются базовыми при измерении поля методом моментов (Матис, 1989).

3.4. Основные положения теории эффекта Зеемана

3.4.1. Атом в магнитном поле

Полное объяснение Зееман-эффекта дается в квантовой теории. В случае слабого поля (когда предполагается L-S-связь) присутствуют два вида зеемановского расщепления: нормальный эффект с триплетным расщеплением спектральных линий и аномальный эффект, когда линия расщепляется на большое количество π - и σ -компонент. В очень сильных магнитных полях (когда L-S-связь нарушается) наблюдаются эффекты Пашена-Бака и квадратичный Зеемана.

В присутствии магнитного поля атомные уровни расщепляются на $(2J+1)$ подуровня, каждый из которых характеризуется своим магнитным кван-

товым числом M , изменяющимся от $+J$ до $-J$, где J — квантовое число, характеризующее полный момент атома.

Такое описание пригодно для слабого магнитного поля, оно предполагает, что магнитное расщепление уровней должно быть малым по сравнению с тонкой структурой, т. е. разделение происходит между линиями одного и того же термина.

3.4.2. Нормальный эффект Зеемана

Нормальный эффект Зеемана реализуется только для синглетных линий. Синглетные уровни атома (спин $S = 0$) расщепляются в магнитном поле, вследствие чего каждая линия частоты ν расщепляется на три компоненты: π -компоненту с той же частотой ν и две σ -компоненты с частотами

$$\nu = \nu_0 \pm 1.4 \cdot 10^6 B, \quad (3)$$

где ν — частота в Гц, B — величина магнитного поля в Гс. Все компоненты линии эллиптически поляризованы.

При наблюдениях вдоль силовых линий магнитного поля (продольный эффект Зеемана) центральная π -компонента не видна, а две σ -компоненты одинаковой интенсивности поляризованы по кругу в противоположных направлениях. При наблюдениях перпендикулярно полю (поперечный эффект Зеемана) все 3 компоненты поляризованы линейно: π -компонента параллельно, а две σ -компоненты перпендикулярно направлению поля. Расщепление линий при этом мало: около 0.01 \AA в магнитном поле 1000 гауссов для области спектра с центром на 5000 \AA .

3.4.3. Аномальный эффект Зеемана

Подавляющее большинство (более 80%) линий в звездных спектрах показывают аномальный эффект Зеемана (Романюк, 1984).

В общем случае несинглетных линий при L-S-связи спин $S \neq 0$, каждый уровень атома в магнитном поле расщепляется на $2J+1$ подуровня с энергиями смещения

$$E_M = E_0 \pm 9.27 \cdot 10^{-21} B g M_J, \quad (4)$$

где E_0 — энергия уровня при отсутствии поля (эрг), B — величина магнитного поля в гауссах, g — фактор Ланде-уровня, M_J — проекция J на направление B .

Фактор Ланде g каждого уровня определяется как:

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}, \quad (5)$$

где L и S — орбитальный и спиновый моменты, J — полный момент количества движения.

Спектральная линия при аномальном эффекте может расщепляться на несколько десятков π - и σ -компонент. Картина расщепления полностью определяется конфигурацией электронов в атоме и объясняется в квантовой теории векторной модели атома.

Поляризация групп π - и σ -компонент такая же в первом приближении, как и поляризация соответствующих компонент при нормальном эффекте. Как показали Бак и Ланде (1925) существует только шесть типов зеемановской картины. Их свойства суммированы в табл. 2 (взята из работы Матиса, 1989).

Седьмой тип — это зеемановский триплет, который возникает между двумя уровнями, имеющими один и тот же фактор Ланде, или между уровнями с $J = 0$. Таким образом, нормальный эффект представляет собой частный случай аномального эффекта Зеемана.

Другой пекулярный случай — магнитные нулевые переходы. Они возникают между двумя уровнями с нулевым фактором Ланде, либо между уровнем с нулевым фактором и уровнем с $J = 0$. Магнитные нулевые линии бывают очень полезны при астрофизических исследованиях: их профили не искажаются влиянием поля, поэтому по ним можно получить правильные параметры атмосфер магнитных звезд.

Следующие свойства являются общими для всех зеемановских картин, независимо от их типа:

- зеемановские картины при любых переходах являются симметричными относительно центра линии;
- π -компоненты симметричны относительно центра линии;
- в первом приближении зеемановское расщепление может быть охарактеризовано одним параметром — эффективным фактором Ланде, сдвигом в длинах волн центров тяжести σ -компонент.

3.4.4. Эффект Пашена–Бака

В очень сильных (более 10 кГс) полях, когда магнитное расщепление становится больше мультиплетного, аномальный эффект Зеемана начинает превращаться в нормальный. Это явление, известное как эффект Пашена–Бака, есть результат того, что L–S-связь в сильном магнитном поле разрывается.

В этом случае энергия смещения уровня E_M от центра первоначальной мультиплетной структуры (в эрг):

$$E_M = E_0 \pm 9.27 \cdot 10^{-21} (M_L + 2M_S) B, \quad (6)$$

где M_L и M_S — соответственно орбитальное и спиновое квантовые числа.

Эффект Пашена–Бака для разных линий наступает при полях разной величины в зависимости от вида мультиплета. При полях больше 10 кГс, как правило, надо учитывать влияние частичного эффекта Пашена–Бака (Матис и Стенфло, 1987 a,b; Матис, 1990). Основные особенности следующие:

- в то время как линия при простом Зееман-эффекте имеет ту же длину волны, что и при отсутствии поля, линии, формируемые в условиях частичного эффекта Пашена–Бака, имеют общее смещение;
- линии при частичном эффекте Пашена–Бака несимметричны относительно их центров в отличие от линий, формируемых при простом эффекте Зеемана;
- при частичном эффекте Пашена–Бака общая интенсивность линии отличается от таковой при отсутствии магнитного поля.

3.4.5. Квадратичный эффект Зеемана и сверхтонкая структура

Можно надеяться измерить квадратичный Зееман-эффект в суперсильных магнитных полях (10^6 – 10^8 Гс) белых карликов и нейтронных звезд в виде сдвига линий в коротковолновую область шкалы длин волн. Для водорода этот сдвиг может быть вычислен по следующей формуле:

$$\Delta\lambda = -4.98 \cdot 10^{-23} n^4 \lambda^2 (1 + M^2) B^2, \quad (7)$$

где n — эффективное главное квантовое число, M — магнитное квантовое число, B — магнитное поле в Гс, λ и $\Delta\lambda$ выражены в ангстремах.

В спектрах магнитных CP-звезд с полями менее 100 кГс влияние этого эффекта сведется к сдвигу линий в фиолетовую сторону спектра на пренебрежимо малую величину ($\ll 10^{-5}$ Å).

Сверхтонкая структура в ряде ситуаций может оказывать влияние, например, на линии редких земель. Подробно вопрос был изучен Ланди дель Иннокенти (1975). Вывод состоит в том, что сверхтонкая структура не вносит дополнительных трудностей по сравнению с чистым Зееман-эффектом, она может оказывать влияние на резкость спектральных линий некоторых элементов.

3.5. Вычисления и определения эффективных факторов Ланде

3.5.1. Вычисления факторов Ланде

В большинстве случаев в звездных спектрах не удается наблюдать расщепление линий непосредственно, видно только общее смещение π - и

Таблица 2: Типы зеемановской картины расщепления

Тип	Кратность уровней	π -компонента	σ -компонента	$(J_1 - J_2)(g_1 - g_2)$
1	Нечетная	к-во: нечетное, центральная компонента сильнейшая	к-во: нечетное, усиливаются к центру	< 0
2	Нечетная	к-во: нечетное, центральная компонента сильнейшая	к-во: нечетное, ослабевают к центру	> 0
3	Нечетная	к-во: нечетное, центральная компонента слабейшая	к-во: четное, симметричны к своему центру тяжести, центральная компонента сильнейшая	$= 0$
4	Четная	к-во: четное, центральная компонента сильнейшая	к-во: четное, усиливаются к центру	< 0
5	Четная	к-во: четное, центральная компонента сильнейшая	к-во: четное, ослабевают к центру	> 0
6	Четная	к-во: четное, центральная компонента слабейшая	к-во: нечетное, симметричны к своему центру тяжести, центральная компонента сильнейшая	$= 0$

σ - или групп π - и σ -компонент (в аномальном эффекте). Поэтому становится важным вычисление эффективного фактора Ланде линии z как средневзвешенного, характеризующего чувствительность линии к магнитному полю в целом.

Фактор Ланде может быть определен экспериментально или вычислен. Обширные списки лабораторных измерений факторов для линий редкоземельных элементов приведены в работе Мартина и др. (1978). Мы рекомендуем ознакомиться с фундаментальным обзором Матиса (1989) по этому вопросу.

К сожалению, лабораторные определения выполнены для относительно небольшой доли спектральных линий, представляющих астрофизический интерес, поэтому приходится использовать вычисленные факторы. Имеются случаи очень больших различий между экспериментальными и вычисленными величинами, иногда в два и более раза.

К настоящему времени существуют обширные расчеты. Наиболее часто используют таблицы Бэкерса (1969), в которых эффективные факторы Ланде для мультиплетов вычислены, в предположении L-S-связи, следующим образом:

$$z = \bar{g} + \frac{\Delta J \Delta g (2\bar{J} + 1)}{4}, \quad \bar{g} = \frac{g_u + g_l}{2}, \quad \bar{J} = \frac{J_u + J_l}{2}, \quad (8)$$

$$\Delta g = g_u - g_l, \quad \Delta J = J_u - J_l$$

где g_u и g_l — факторы Ланде для верхнего и нижнего уровней соответственно, остальные обозначения — как в формуле (5).

Факторы Ланде в VALD (Венской базе данных атомных параметров) вычислены на основании та-

блиц Бэкерса (Пискунов и др., 1995; Купка и др., 1999).

Ранее, используя эти же таблицы, мы составили список факторов 830-ти линий, наиболее часто встречающихся в звездных спектрах (Романюк, 1984).

В литературе рассматриваются вопросы определения факторов Ланде при нарушении L-S-связи. Например, в работе Матиса (1990) приводится формула для вычислений в случае J-I-связи.

Куруч (1979, 1992, 1993) использует экспериментальные значения факторов Ланде, а при их отсутствии — определенные из детальных вычислений атомных параметров. Матис (1990) сравнил факторы, использованные Куручем и вычисленные по простым формулам (5, 8). Он отмечает, что некоторые из вычисленных величин очень неточны и, в частности, значительно менее точны, чем большинство экспериментальных данных.

3.5.2. Магниточувствительные линии

Более 95% всех измеренных спектральных линий в спектрах магнитных звезд имеют эффективные факторы Ланде z в интервале 0.5–2.0 (в единицах магнетона Бора). Конечно, линии с большими факторами предпочтительнее для магнитных измерений, но обычно они слабы. Тем не менее, они могут быть полезны при исследованиях тонких эффектов, которые не могут проявиться в линиях с более низкой магнитной чувствительностью.

Список линий с факторами Ланде $z \geq 3$ (Романюк, 1984) приведен в табл. 3. В качестве источ-

Таблица 3: Линии с эффективными факторами Ланде $z \geq 3$

λ	Элемент	Мультиплет	z	$\lg gf$
3119.3	Gd II	(10)	3.00	—
3139.6	Fe I	(161)	3.00	-4.63
3158.2	Fe I	(160)	3.25	-3.55
3162.3	Fe I	(159)	3.17	—
3175.9	Fe I	(333)	3.00	-1.87
3221.9	Fe I	(156)	3.00	-0.69
3228.9	Fe I	(157)	3.00	-3.39
3390.8	Gd II	(73)	3.67	-0.42
3417.3	Gd II	(91)	3.33	-0.10
3417.3	Gd II	(91)	3.33	-0.10
3462.9	Mn II	(12)	3.00	-1.25
3598.9	Fe I	(322)	3.00	-1.83
3815.5	V I	(28)	3.33	-1.46
3867.2	Gd II	(50)	3.00	-1.20
3908.9	Fe I	(153)	3.00	-4.58
3966.4	Fe II	(3)	3.00	-6.87
4070.2	Mn I	(5)	3.33	-1.09
4080.8	Fe I	(557)	3.00	—
4116.6	V I	(27)	3.33	-0.82
4210.3	Fe I	(152)	3.00	-1.05
4327.1	Gd II	(—)	3.00	+0.04
4558.0	Gd II	(44)	3.20	-1.54
4654.7	Cr I	(186)	3.00	-0.81
4878.2	Fe I	(318)	3.00	-1.07
5175.8	Gd II	(114)	4.00	—
5250.2	Fe I	()	3.00	-4.84
5986.5	Fe II	(24)	3.00	-6.23
6258.5	V I	(19)	3.33	—

ников использовались таблицы Мур (1945) и Бэкерса (1969). Наиболее сильной из них является линия нейтрального железа 4210.35 \AA , которая хорошо видна в спектрах магнитных звезд. Вторая по интенсивности — линия $\text{Fe I } 5250.2 \text{ \AA}$ — широко используется при измерениях солнечных магнитных полей, так как она достаточно интенсивна в спектрах холодных звезд.

3.5.3. Линии, нечувствительные к магнитному полю

Линии, нечувствительные к магнитному полю и неискаженные им, используются для определения параметров атмосфер магнитных звезд, а также величины $v \sin i$. Список нулевых линий, представляющих интерес для астрофизики, приведен в работах Адельмана (1973) и Ландстрита (1969). К сожалению, в этих списках очень мало пригодных для измерений линий, поэтому мы сочли возможным дополнить их такими, на которые поле дей-

Таблица 4: Линии с малой чувствительностью к магнитному полю

λ	Элемент	Мультиплет	z	$\lg gf$
3402.43	Cr II	(21)	0.00	-1.15
3533.20	Fe I	(326)	0.50	-0.12
3608.86	Fe I	(23)	0.50	+0.02
3745.90	Fe I	(5)	0.00	-1.41
3767.19	Fe I	(21)	0.00	-0.31
3849.97	Fe I	(20)	0.00	-0.86
4064.35	Ti II	(106)	0.50	-1.68
4284.21	Cr II	(31)	0.50	-2.25
4425.44	Ca I	(4)	0.50	-0.18
4443.20	Fe I	(350)	0.50	-0.95
4464.45	Ti II	(40)	0.33	-1.62
4491.40	Fe II	(37)	0.40	-2.89
4508.28	Fe II	(38)	0.50	-2.41
4634.11	Cr II	(44)	0.50	-1.25
5334.88	Cr II	(43)	0.40	-1.79
5434.52	Fe I	(15)	0.00	-2.19
6239.77	Cr II	(105)	0.00	-3.16

ствует, но слабо. В табл. 4 мы приводим список наиболее известных линий с малым (или нулевым) фактором Ланде. Источники те же, что использовались при составлении табл. 3.

Отметим, что на практике наиболее часто используется сильная линия $\text{Fe II } 4508.28 \text{ \AA}$.

Все сказанное выше относится к случаю слабого поля, когда квадратичный Зееман-эффект несуществен и магнитное расщепление уровней мало по сравнению с мультиплетной структурой соответствующих термов. Однако, начиная с полей в 10 кГс, сдвиги атомных уровней должны анализироваться с учетом частичного эффекта Пашена-Бака (Матис и Стенфло, 1987а; Матис, 1990).

Кроме эффекта Зеемана для определений слабых магнитных полей на Солнце, а в последнее время и на звездах, используют измерения эффекта Ханле, заключающегося в особенностях поляризации профилей линий. Наиболее эффективно его можно использовать при оценках полей порядка 10–100 Гс (см. обзор Гнедина и Нацвлишвили, 1997).

4. Методы диагностики магнитных полей CP-звезд

4.1. Возможности обнаружения магнитных полей в звездах Главной последовательности

Магнитные поля CP-звезд были обнаружены значительно раньше, чем у других объектов, благода-

ря большой величине поля и простоте его геометрической структуры. Тем не менее, интерпретация полученных из наблюдений результатов не является простой задачей.

Уравнение переноса для вектора Стокса и его решение применимо для какой-то локальной точки поверхности звезды. Излучение, регистрируемое нами, интегрировано по всей видимой ее поверхности. Таким образом, мы наблюдаем усредненное по поверхности звезды магнитное поле. Поэтому методы спектрополяриметрии эффективно работают в случае крупномасштабных магнитных полей глобального характера. Если звезда имеет много областей с полями разной полярности, то эффективность метода снижается, потому что:

1) вклады областей поверхности звезды с противоположно направленными полями будут компенсироваться, так что измеряются только остаточные поля; 2) вклад излучения от немагнитных областей сильно уменьшает измеряемую напряженность поля.

Практически все определения магнитных полей CP-звезд основываются на измерении зеемановского расщепления спектральных линий. Проще всего измерить продольный компонент крупномасштабного, имеющего глобальный характер, магнитного поля звезды. Чтобы быть обнаруженным, поле должно быть когерентным, т.е. в результате суперпозиции излучения от различных частей поверхности звезды должна проявиться одна преобладающая полярность (Бэбкок, 1967).

Если звезда ориентирована так, что наблюдается в основном продольное поле, то можно использовать анализатор круговой поляризации для того, чтобы выявить относительное смещение линий с левым и правым вращением электрического вектора. Если звезда имеет когерентное поле, по характеру преимущественно поперечное, то при использовании дифференциального анализатора для двух направлений линейной поляризации, различающихся по азимуту на 90° , получаются две несмещенные линии различной резкости. Так как гораздо проще определить смещение, чем разницу в резкости профилей, то основным методом является измерение продольного эффекта Зеемана с использованием анализаторов круговой поляризации. Методика была предложена и реализована Бэбкоком (1947 а,б). Она заключается в измерениях зеемановских сдвигов противоположно поляризованных σ -компонент отдельных линий.

Магнитные CP-звезды обладают крупномасштабными магнитными полями, поэтому могут изучаться спектрополяриметрически, но, поскольку магнитное уширение линий имеет место в любом случае, неполяриметрические методы также применимы. Однако точности таких определе-

ний значительно хуже (предел обнаружения около 2 кГс для узких и резких линий вместо 200–300 Гс, получаемых методами спектрополяриметрии).

Тем не менее, поскольку лишь очень малая доля спектров получена с зеемановскими анализаторами, разработка способов, позволяющих проводить диагностику магнитных полей на основании уже имеющихся обычных (неполяризованных) спектров высокого разрешения представляется весьма полезной. Ее внедрение позволит использовать для исследований звездного магнетизма большие архивы наблюдательных данных.

4.2. Неполяриметрические измерения магнитных полей

Такие методы впервые были применены для поисков магнитных полей сложной структуры в звездах, для которых классические измерения способом Бэбкока результатов не дали, но были косвенные указания на присутствие поля.

Робинсон (1980) предложил следующий способ. Сравняются параметры профилей линий, имеющих сходные спектральные характеристики, но существенно разные факторы Ланде:

- 1) нормализованная глубина d (в долях интенсивности континуума);
- 2) ширина линии на уровне zd ($z = 0.3, 0.5, 0.7$), она выражается в км/с;
- 3) площадь ниже полуширины, эта величина менее подвержена влиянию блендирования.

Метод позволяет определять наряду с абсолютной величиной поля и долю видимой полусферы звезды, покрытую полями. В большинстве случаев, однако, таким способом можно выявить только поля, превышающие 1 кГс.

Главный фактор, влияющий на результат — это блендирование, особенно сильное у холодных звезд, поэтому необходимо, по возможности, использовать чистые линии. Есть и другие ограничения:

- 1) предпочтительнее брать слабые линии, находящиеся на линейной части кривой роста;
- 2) надо точно знать конфигурацию зеемановской картины, моделировать простым триплетом в большинстве случаев невозможно;
- 3) разные компоненты имеют разную интенсивность и, следовательно, насыщение на кривой роста, поэтому их вклад в общий профиль зависит от интенсивности.

Следуя пионерской работе Робинсона (1980) и применяя те же основные принципы, астрономы обнаружили более 50-ти поздних карликов с магнитным полем. Для холодных звезд (по аналогии с Солнцем) принимается двухкомпонентная модель, в которой есть магнитные и немагнитные области.

Однако имеются и существенные различия.

Магнитные поля на Солнце достигают величин кГс в образованиях двух типов: в пятнах, более холодных и темных в видимой области, с диаметрами в несколько тысяч км и в активных областях, где поля концентрируются в маленьких трубках потока, более ярких и горячих, чем окружающая фотосфера, занимая менее 1/4 поверхности активной области. Поле там достигает 1–2 кГс, в то время как в пятнах — до 5 кГс. Вместе трубки занимают менее 1% солнечной поверхности. А на 99% площади поле слабее десятка Гс.

В холодных звездах есть немагнитные и магнитные области, причем в последних наблюдаются поля напряженностью 1–2 кГс. Но фактор заполнения (величина отношения площади с полем ко всей площади видимой поверхности) в звездах > 15%, что может означать, что поля не изолированы в малых трубках, как на Солнце. Исследования магнитных полей холодных звезд — это новая, развивающаяся быстрыми темпами область исследований. Имеется большое количество публикаций, анализ которых сделан в недавнем обзоре Валенти и Джонс-Крулла (2001).

Об исследованиях глобальных полей СР-звезд по магнитному уширению будет сказано ниже. Такие работы не получили широкого распространения из-за существенно меньшей точности и информативности, чем это получается из анализа данных спектрополяриметрии.

4.3. Исследования продольных магнитных полей методами измерения круговой поляризации в линиях

4.3.1. Фотографическая методика

Информация о магнитном поле получается по измерению сдвига левоциркулярно- (LCP) и правоциркулярно поляризованных (RCP) линий. Центры (в случае простого триплета) наблюдаемых RCP-линий совпадают с положением ($\sigma+$)-компонент, а LCP-линий — с положением ($\sigma-$)-компонент. В случае аномального эффекта Зеемана сдвиг $\lambda_r - \lambda_l$ строго пропорционален B_e , но эффективный фактор Ланде должен быть заменен на число, зависящее от интенсивности, для точного учета всех σ -компонент из-за различного насыщения каждой индивидуальной компоненты в картине расщепления.

Величина продольного магнитного поля B_e может быть определена по формуле, предложенной еще Бэбкоком (1958):

$$\Delta\lambda = \pm 4.67 \cdot 10^{-13} z B_e \lambda^2, \quad (9)$$

где B_e — величина продольной компоненты поля,

z — фактор Ланде линии, $\Delta\lambda$ — сдвиг каждой отдельной линии в противоположно поляризованных спектрах (в Å).

Детальное описание фотографической методики продиктовано отнюдь не только лишь историческим интересом. Во-первых, около половины имеющихся зеemanовских спектров получены на фотопластинках, сравнение новых и старых данных имеет важное значение, особенно при исследованиях долгопериодической переменности магнитных СР-звезд. А во-вторых (хоть метод называется классическим фотографическим), эта методика применяется и в случае, когда наблюдения были получены с использованием современных ПЗС-матриц. Измерения магнитных полей, полученные этим методом, интерпретируются для случая СР-звезд простыми дипольными полями достаточно хорошо. После внедрения цифровой регистрации спектров отпали многие недостатки ранней фотографической методики, связанные с нелинейностью характеристической кривой фотоэмульсии. Кроме того, значительно возросла степень автоматизации измерений.

Возвращаясь к фотопластинкам, отметим, что точность регистрации на них была низкой, что не позволяло изучать детали профилей, а только лишь некоторые параметры, характеризующие линии в целом (эквивалентную ширину и т.п.). Поэтому, несмотря на отдельные попытки измерений поперечного поля (Глаголевский и др., 1985b; Кодаира и Уно, 1969), развитие эти работы получили лишь с внедрением новых цифровых светоприемников. С помощью фотопластинок были достигнуты первые положительные результаты доплеровского картирования (например, Хохлова, 1983), но их недостаточная точность делала невозможной выполнение зеemanовского картирования, это стало реальным только с появлением ПЗС-матриц.

Точность измерений сдвига линий резко падает с увеличением их ширины. Ранее практически было невозможно проводить фотографические определения магнитных полей у звезд с шириной линий более 0.6–0.7 Å. Необходимо было также принимать в расчет множество искажающих факторов. Рассмотрим некоторые наиболее существенные из них.

1. Величины поля, полученные различными исследователями, порой существенно различаются. Хенсберг (1978) изучил систематические отличия в величинах B_e , измеренных в разных обсерваториях. Решающими оказались различия в качестве изготовления анализаторов поляризации, качестве изображений во время наблюдений, а также способах исключения инструментальной поляризации, наиболее сильно влияющей на результаты,

полученные с куде-спектрографами. Обычно используется компенсатор инструментальной поляризации. В случае 6-м телескопа он не применялся, так как в фокусе Нэсмита поляризация небольшая и может учитываться математически (Глаголевский и др., 1977).

2. В эпоху Бэбкока магнитные поля оценивались путем визуального определения на фотопластинках центров тяжести компонент линий в противоположных поляризациях, т. е. весьма субъективно. Каждый исследователь имел свою систему и свою личную ошибку. Позже были внедрены осциллоскопические приставки, что позволило повысить точность и объективность измерений. Тем не менее, из-за нелинейности фотоэмульсии измеритель лучше видел ядро линии и видимый центр тяжести смещался ближе к нему. Величина этого смещения зависела от интенсивности линии.

Проблемы блендирования особенно актуальны для холодных CP-звезд. В случае измерения продольной компоненты поля B_e больших ошибок и искажений это внести не может, так как факторы Ланде большинства линий находятся в довольно узком интервале величин ($z = 0.9-1.6$). Средний фактор Ланде при использовании многих десятков линий оказывается в пределах 1.20 – 1.25, независимо от спектрального диапазона. Замечено, однако, что линии разных химических элементов по-разному чувствительны к магнитному полю. Так, анализ данных нашего каталога (Романюк, 1984) показывает, что средняя величина фактора Ланде при использовании линий равняется: для Ti II – 1.07, Fe II – 1.17, Fe I – 1.32, Cr II – 1.23, Cr I – 1.25, Eu II – 1.82, Gd II – 1.88. Видно, что линии европия и гадолиния имеют большие факторы, а для редкоземельного элемента церия видим другую картину — средний фактор Ланде линий Ce II – 1.01. Таким образом, ошибки в измерениях поля будут влиять на величину определяемого поля только в случае неправильного отождествления линий редкоземельных элементов.

Более существенным нам представляется другое обстоятельство: из-за неравномерного распределения по поверхности пятен повышенной концентрации того или иного элемента они будут находиться в областях с различным полем. Из-за этого величина поля, определенная по линиям металлов, может различаться для разных элементов и стадий ионизации. Даже в случае дипольного поля величина B_e , определенная по разным элементам, может быть разной. Это неоднократно подтверждалось при непосредственных измерениях (например в работе Глаголевского и др., 1984).

Для получения зеемановских спектров наблюдателями использовались различные варианты

анализатора Бэбкока. На 5-м Паломарском и 2.5-м телескопе обсерватории Маунт Вилсон работал сам Бэбкок. Описание методики дано в его работах, например Бэбкок (1958). Там же в его знаменитом каталоге приведена сводка результатов измерений магнитных полей 89-ти звезд. Большое количество наблюдений было выполнено на 3-м Ликском телескопе. Методика описана в работе Престона (1967). Наиболее значительные результаты на этом телескопе получены им и его коллегами С. Вольф и К. Стемпенем (например Престон и Стемпень, 1968; Престон, 1969a,b; 1970, 1971, 1972; Престон и Вольф, 1970 и др.). После работ Бэбкока стало ясно, что магнитные поля Ap-звезд существуют, они сильные и могут быть надежно измерены. Престон и его коллеги нашли, что продольная компонента поля периодически меняется, причем синхронно с вариациями блеска и спектральных линий. Период переменности является периодом вращения звезды. В результате была построена простая модель наклонного ротатора, хорошо объясняющая многие свойства магнитных CP-звезд. Престон впервые нашел расщепленные зеемановские компоненты у нескольких магнитных звезд, что позволило ему определить не только величину продольной компоненты, но и так называемое “поверхностное поле” B_s — усредненный по видимой поверхности модуль магнитного поля.

В семидесятые и восьмидесятые годы на 2.24-м Гавайском телескопе активно занимались измерениями магнитных полей В. Бонсак и С. Вольф. Приборы и методика их наблюдений описаны в работе Вольф и Бонсака (1972). Вольф (1978) принадлежит первая попытка обнаружить радиальный градиент магнитного поля по линиям, образующимся на разной высоте в атмосфере. Однако она работала со слюдяными анализаторами, поэтому не могла достичь высокой точности. Как результат — выводы работы Вольф довольно неопределенны.

Фотографические наблюдения магнитных полей проводились также на 2.7-м телескопе обсерватории Мак Дональд (Вогт и др., 1980), 3.6-м ESO (Матис и Стенфло, 1986), 2-м телескопе в Таутенбурге (Шольц и Герт, 1981) и др. На территории СССР у САО были предшественники: зеемановский анализатор был установлен на 2-м телескопе обсерватории в Шемахе (Асланов и Рустамов, 1975).

В 1976 г. магнитные наблюдения с классическим анализатором Бэбкока начались на 6-м телескопе САО (Глаголевский и др., 1977). Затем анализатор был усовершенствован (Найденов и Чунтонов, 1976): вместо слюдяных пластинок в качестве фазосдвигающих элементов были использованы ромбы Френеля, что сделало его ахроматиче-

ским. Отпала необходимость иметь набор анализаторов для работы в разных спектральных областях. К тому же каждый из них имел свои индивидуальные особенности, которые невозможно было полностью учесть.

Измерения зеемановских спектров выполнялись с помощью осциллоскопической приставки, путем совмещения прямого и обратного изображения спектральной линии (Антропов, 1972). Такая система измерений была значительно более точной и объективной, чем визуальная, но в случае звезд со сложными профилями линий субъективизм в определенной степени сохранялся, и результаты во многом зависели от опытности измерителя.

На 6-м телескопе фотографические наблюдения магнитных полей проводились с 1977 по 1990 г., т. е. практически до конца фотографической эры в астрономии. За все это время получено более 2000 зеемановских спектров, в основном на второй камере Основного звездного спектрографа.

В девяностые годы XX века практически на всех инструментах (включая 6-м телескоп) в качестве детекторов начали использовать ПЗС-матрицы. Цифровая регистрация спектров позволила в значительной степени автоматизировать процесс измерений магнитных полей. Процедура анализа зеемановских спектров будет описана отдельно. Здесь мы лишь отметим, что наблюдательный материал, полученный на 6-м телескопе, в настоящее время обрабатывается с использованием пакета программ Кудрявцева (2002). Многократные исследования стандартных звезд показали, что замена фотопластинки на ПЗС-матрицу и изменения в процедуре обработки не привели к нарушениям в системе магнитных измерений САО РАН.

Заканчивая изложение фотографической методики, отметим, что, поскольку факторы Ланде большинства линий различаются не очень сильно, то при использовании достаточно узкого спектрального интервала (менее 500\AA) можно принять в первом приближении, что влияние Зееман-эффекта на профили всех измеряемых линий одинаково. Это обстоятельство привлекательно тем, что открывается возможность использовать “кумулятивный” эффект от многих линий: сигнал поляризации будет накапливаться значительно быстрее шумов, поэтому отношение С/Ш растет с увеличением количества используемых линий. Предполагалось, что разработка и применение такой мультилинейной методики будет особенно полезной для поисков слабых магнитных полей и при исследовании быстрых ротаторов.

4.3.2. Корреляционный метод MSHIFT

Метод предложен в Венской обсерватории для экспресс-анализа фотографических зеемановских спектров Вайсом и др. (1978). Предполагалось, что его внедрение приведет к автоматизации и существенному ускорению трудоемкого процесса измерения магнитных полей.

Метод заключается в поиске корреляции между опорной и исследуемой спектрограммами при помощи цифровой микрофотометрической системы. В этом методе сдвиг между парой по-разному поляризованных спектров устраняется численно и рассматриваются два взвешенных по интенсивности спектра. Искомый сдвиг $\Delta\lambda$ представляет собой минимум суммы квадратов невязок разностей интенсивности двух ортогонально поляризованных спектров. Он интерпретируется в единицах магнитного поля:

$$\Delta\lambda = 2\langle z \rangle \langle \Delta\lambda \rangle B_e, \quad (10)$$

где $\langle z \rangle$ — усредненная величина эффективного фактора Ланде в единицах Лоренца, $\langle \Delta\lambda \rangle$ — средний сдвиг линий.

Вайс и др. (1978), а также Матис (1989) отмечают следующие достоинства и недостатки метода. Достоинства:

- его объективность (традиционная методика предполагает визуальное, а значит, субъективное определение центров тяжести линий);
- нет необходимости в предварительном отождествлении линий (однако надо найти адекватную величину $\langle z \rangle$);
- используется вся информация о спектре.

Кроме того, несомненным положительным фактором является высокая степень автоматизации обработки наблюдений.

Однако MSHIFT имеет ряд существенных недостатков:

- использование усредненных величин $\langle z \rangle$ и $\langle \Delta\lambda \rangle$ приводит к тому, что реальный вклад каждой линии зависит от ее интенсивности;
- наиболее сильные линии вносят наибольший вклад; есть сложности в случае аномального эффекта Зеемана (компоненты разной интенсивности попадают на разные участки кривой роста);
- отсутствие прямой связи между измеренными смещениями и магнитным полем или лучевой скоростью, что требует проведения эмпирической калибровки;
- при неравномерном распределении элементов в атмосфере звезды и возникающей отсюда спектральной переменности может возникнуть ложная магнитная переменность.

Фактически в этом методе определяется среднее зеэмановское (или доплеровское) смещение линий, взвешенное по их интенсивности.

Численное моделирование, выполненное Штифтом (1986, 1987), показало, что даже при однородном химсоставе использование метода MSHIF приводит к зависимости получаемой величины поля от скорости вращения, поэтому полученная величина поля может сильно отличаться от истинной. Сделано заключение, что MSHIFT пригоден для поиска магнитных полей, однако не для их измерения. Этим методом, кроме его авторов, практически никто не пользовался, в основном из-за трудностей в интерпретации полученных результатов. Тем не менее, мы решили его здесь описать, так как MSHIFT — это первый корреляционный метод, примененный в магнитных измерениях.

4.3.3. Фотозлектрическая методика: дифференциальный и интегральный способы измерения поля

Фотозлектрические звездные магнитометры были впервые применены в конце шестидесятых в Крымской обсерватории А. Б. Северным (1970) и позднее группой канадских астрономов (Борра и Ландстрит, 1973).

Кратко суть метода заключается в следующем. Свет, собранный телескопом, проходит через электрооптический модулятор, который играет роль четвертьволновой пластинки. Периодическая перемена знака напряжения аналогична вращению поляроида. Затем луч проходит через анализатор, который пропускает свет, поляризованный линейно вдоль заданного направления, и полностью не пропускает перпендикулярно поляризованный свет. Направление поляризации в анализаторе должно быть под углом 45° по отношению к осям модулятора. Далее луч войдет в спектрограф, на выходе которого размещена щель для выделения узкой полосы спектра, регистрируемой фотоумножителем. Разница в сигналах от двух (RCP и LCP) поляризованных спектров дает V -параметр Стокса в выбранном участке спектра, а их сумма — I -параметр Стокса в том же элементе. Выходная щель может двигаться вдоль спектра.

В первых фотозлектрических приборах выходная щель спектрографа была достаточно широкой (0.2 \AA) (Северный и др., 1974). Это приводило к большему значению C/\mathcal{H} , но терялось разрешение. Позже для увеличения эффективности перед щелью ставился интерферометр Фабри–Перо (см. Борра и Воган, 1977; Глаголевский и др., 1979). Такой прибор был построен и для 6-м телескопа, его описание можно найти в работах Глаголевско-

го и др. (1979), Бычкова и др. (1988). Применение интерферометра сделало процесс наблюдений сложным, но повысило пропускание. Магнитометр оказался гораздо эффективнее, чем приборы без интерферометра при том же спектральном разрешении.

Однако большого развития это направление не получило ни в нашей стране, ни за рубежом. Магнитометры с интерферометрами использовались только для уникальных разовых работ (например, для измерения магнитных полей ярчайших звезд с точностью порядка 1 Гс (Борра, 1975), поисков слабых магнитных полей (например, Глаголевский и др., 1989), наблюдений круговой поляризации с высоким спектральным разрешением внутри линий (Борра, 1980 a,b). Главная причина ограниченного применения — одноканальность прибора.

Так как фотозлектрическим методом измеряется круговая поляризация в крыльях линий металлов, интерпретация результатов более сложная, чем при измерениях сдвигов линий. Кроме того, реальную величину поля можно получить только в случае однородного распределения элементов по поверхности. Еще более существенно, что поля должны быть слабыми, а уширение вращением — малым. Типичная полуширина металлических линий у Ар-звезд — несколько сотых \AA , т.е. надо выбирать объекты с $v \sin i < 1 \text{ км/с}$ и магнитным полем менее 1 кГс.

Величина магнитного поля может быть определена двумя способами: дифференциальным (Борра и Ландстрит, 1973) и интегральным (Борра и др., 1973).

В дифференциальном методе измеряется поляризация в крыле линии, определяется крутизна профиля $\frac{dI}{d\lambda}$ и на основании этого высчитывается величина B_e по формуле

$$B_e = 2.14 \cdot 10^{12} (V_\lambda / \lambda^2) / \frac{dI}{d\lambda} z, \quad (11)$$

где V_λ — параметр Стокса, полученный в данной точке профиля, $\frac{dI}{d\lambda}$ — крутизна профиля в этой точке.

В интегральном методе магнитное поле определяется как сдвиг центров тяжести в распределении V -параметра Стокса в левом и правом крыле линии, что несколько ближе к методике классических фотографических наблюдений. Величина продольного компонента магнитного поля

$$B_e = 2.14 \cdot 10^{12} (\Delta\lambda / \lambda^2) / z, \quad (12)$$

где $\Delta\lambda = \int \lambda V_\lambda d\lambda \cdot \int R_\lambda d\lambda$, R_λ — глубина линии как функция длины волны.

В указанных выше работах Борра и его соавторов продемонстрировано, что различия в величине

поля, найденной двумя разными способами, могут достигать 30%.

Напомним, что Северный и др. (1974) отмечали, что поле, определенное по внешнему и по внутреннему крылу линии, будет различаться из-за влияния π -компоненты на внутреннее крыло. Чистое продольное поле можно определить по распределению круговой поляризации во внешнем крыле, свободном от этого влияния.

Нам представляется, что интегральный способ давал более надежные и устойчивые результаты и был ближе к классическим фотографическим измерениям. Тем не менее, разница в величинах полей, полученных по линиям металлов фотоэлектрическим и фотографическим способами, настолько велика, что совместное использование этих данных для поиска долговременных вариаций поля не представляется возможным.

Перечислим главные источники ошибок при определении поля с помощью магнитометра с интерферометром Фабри–Перо.

1. Одноканальность прибора требует сканирования профиля, что резко снижает эффективность. Для экономии времени измерения проводятся только в избранных точках, поэтому величина поля может быть искажена.

2. Необходимость очень тщательной юстировки оптики и контроля за глубиной модуляции.

3. Сложность и капризность воздушной системы интерферометра, невозможность точного воспроизведения необходимой длины волны.

4. Необходимость тщательного учета (с точностью порядка 0.01%) инструментальной круговой поляризации, которая в фокусе Нэсмита БТА составляет 1–2%.

Как результат, магнитометры этого вида менялись относительно короткое время. Их громоздкость и необходимость проведения длительных многочасовых наблюдений для получения одного измерения делало их неконкурентоспособными при работе на больших телескопах.

Более эффективными оказались наблюдения на магнитометрах, работающих в крыльях водородных линий. Впервые такое устройство продемонстрировано в работе Энджела и Ландстрита (1970), оно предназначалось для измерения магнитных полей белых карликов и быстровращающихся CP-звезд. Отметим, что второй в мире водородный магнитометр был создан для 6-м телескопа В. Г. Штолем (Штоль и др., 1985).

Линии водорода имеют ряд преимуществ по сравнению с линиями металлов: водород — это элемент, распределенный наиболее однородно по поверхности звезды. Они широкие, из-за чего мало подвержены влиянию уширения вращени-

ем. Появился хороший способ измерения магнитных полей быстровращающихся звезд ($v \sin i > 200$ км/с). Из-за большей ширины линий водорода нет необходимости применять высокое спектральное разрешение, это приводит к существенному упрощению аппаратуры и делает наблюдения более эффективными.

Крутизна профиля в крыльях водородных линий значительно ниже, чем у линий металлов, поэтому для достижения высокой точности необходимо обеспечить очень большое отношение $S/\Delta\lambda$. Например, при использовании участка спектра шириной 5 Å в крыле линии H_β для типичной CP-звезды 1% зарегистрированной поляризации (V -параметра Стокса) соответствует магнитному полю около 13 кГс. Из этого следует, что при идеальной работе аппаратуры и при накоплении 10^8 фотоотсчетов получаем точность определения поляризации 0.01% и магнитного поля $B_e = 130$ Гс.

При применении такой методики возникают некоторые трудности.

1. Крутизна профиля $\frac{dI}{d\lambda}$ известна неточно. Ее нельзя определить только из наблюдений в крыльях линии. Для этого необходимы независимые наблюдения или моделирование профилей линий, иначе могут возникнуть неточности при масштабировании магнитных измерений.

2. Сигнал V -параметра Стокса интерпретируется в терминах B_e в приближении слабого поля в решении уравнений переноса Миллна–Эддингтона. В случае водородных линий имеет место сильный Штарк–эффект и пропорциональность между I и $\frac{dI}{d\lambda}$ может нарушаться. Это значит, что по разным частям профиля водородной линии можно получить разное поле, даже если эффекты от уширения вращением и магнитным полем малы.

3. Необходимость принять гипотезу LTE, которая использована в решении уравнения Миллна–Эддингтона. Не всегда хорошо описываются водородные линии А и В-звезд. Комбинация эффектов Штарка и Зеемана усложняет дело.

Тем не менее, практика показывает, что продольные магнитные поля, полученные методом поляриметрии бальмеровских линий, в большинстве случаев хорошо согласуются в разных измерениях. Однако нередки расхождения между кривыми продольной компоненты, полученными фотоэлектрическим и фотографическим методами. Это проявляется в разной резкости кривых переменной B_e с фазой периода вращения (например Борра и Ландстрит, 1980).

Борра (1974а), в частности, считает, что поле неверно определяется фотографической методикой. Он вычислил теоретические профили ли-

ний в предположении модели наклонного ротатора с нецентральной дипольным полем и пришел к выводу, что при фотографических определениях слишком велик вклад ядер линий, что может вызвать фиктивное увеличение поля до 2-х раз по сравнению с реальной величиной. Но с таким утверждением согласны далеко не все исследователи, так как существуют и другие причины разногласий, главная из которых — неравномерное распределение металлов по поверхности звезды.

Подробно устройство водородного магнитометра CAO описано в работе Штоля и др. (1985). Здесь лишь отметим, что в отличие от прибора Ландстрита (Энджел и Ландстрит, 1970) он является универсальным спектрополяриметром, в котором необходимая область выделяется набором масок-щелей. Использование спектрографа вместо интерференционного фильтра несколько усложнило конструкцию, но позволило использовать прибор для наблюдений магнитных полей и поляризации (сначала круговой, а затем и линейной) у широкого класса объектов. С его помощью были измерены магнитные поля многих CP-звезд, а также проводились поиски поля у звезд других типов (например, λ Boo (Илиев и др., 1990)). Для Ae/Be Хербига измерялись 4 параметра Стокса (Глаголевский и др., 1988, 1990; Кудрявцев и др., 2000).

Прибор был надежно откалиброван и устойчиво работал. Он был исключен из списка штатных лишь в 1995 г., когда в связи с износом и отсутствием запасных частей продолжать эксплуатацию стало невозможно.

4.3.4. Многолинейная зеемановская поляриметрия

Для повышения эффективности одноканальной фотоэлектрической магнитометрии возникла идея (по аналогии с MSHIFT) наблюдать одновременно много линий путем замены одной щели на маску с многими щелями, имитирующими звездный спектр, как это сделано в CORAVEL (Баран, 1979).

Браун и Ландстрит (1981) описали технику и методику мультилинейных зеемановских наблюдений. Работа с таким устройством выглядит следующим образом. Сначала позиционируется маска до совпадения с центрами звездных линий (для этого используется стандартная мода — измерения лучевых скоростей). Потом вставляется зеемановский анализатор и маска слегка сдвигается, при этом циркулярная поляризация от крыльев многих линий регистрируется так же, как и для одной линии. Разница только в том, что сигнал будет усредненным от большого количества линий.

Методика имеет те же ограничения, что и

MSHIFT метод, а именно:

- 1) интерпретация возможна только при малом доплеровском и зеемановском уширении;
- 2) интерпретация возможна только для тех линий, которые включены в маску и для элемента, имеющего равномерное распределение по диску звезды;
- 3) средние факторы Ланде и сдвиги $\Delta\lambda$ подвержены тем же искажениям, что и для MSHIFT.

Таким образом, многолинейный анализ при помощи прибора типа CORAVEL плохо приспособлен для получения реальных измерений поля, что и было подтверждено Штифтом (1986) при численном моделировании.

Но этот метод эффективен для поиска магнитных полей из-за очень высокой чувствительности: например, с его помощью были обнаружены поля величиной в несколько Гс (Борра и др., 1984). В дальнейшем, с появлением многоканальных цифровых светоприемников, оптические маски были заменены на математические.

4.4. LSD-метод исследования магнитных полей

В работах Донати и др. (Донати и Колье Камерон, 1997; Донати и др., 1997) развит корреляционный метод измерения магнитных полей, названный LSD (Least-Squares Deconvolution), в настоящее время он широко используется при исследованиях магнитных полей холодных звезд. Суть метода заключается в сложении полезного сигнала от многих линий, которые ведут себя похожим образом в магнитном поле.

Большим достижением в развитии наблюдательных средств магнитометрии стало строительство спектрополяриметра MuSiCoS в обсерватории Пик-дю-Миди (Донати и др., 1999). На нем наблюдаются $IQUV$ -спектры (т. е. все четыре параметра Стокса) в области шириной более 2000 \AA с разрешением 35000. Для редукции этих спектров были предложены новые корреляционные методы.

4.4.1. Корреляционные методы измерения циркулярной поляризации

Проблему получения сигнала V -параметра Стокса с высоким отношением $S/\text{Ш}$ можно решить сложением смещения многих линий в магнитном поле, так как их сдвиги направлены в одну сторону. В отличие от MSHIFT используются математические маски, поэтому можно работать с произвольными избранными линиями.

Предполагается, что профили V -параметра имеют одинаковую форму, сигнал зависит от произведения zd (где z — эффективный фактор Ланде линии, d — глубина линии), и поэтому можно сло-

жить сигналы от многих линий. Примером поиска этим методом магнитных полей холодных звезд может служить работа Донати и Колье Камерон (1997).

LSD-метод может быть применен и для CP-звезд, где приближение слабого поля уже не совсем подходит (Вэйд и др., 2000b). Оказалось, что V -профили могут быть широко использованы для измерения магнитных полей CP-звезд: момент поля $\langle B_z \rangle$, вычисленный по результатам LSD-наблюдений, плавно меняется с фазой периода, разброс значений очень мал. Хотя эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными другими методами, их сложно интерпретировать.

В качестве примера высокоточных измерений продольной компоненты поля у CP-звезд укажем на работу Шорлина и др. (2000a). Авторы при помощи спектрополяриметра MuSiCoS получили наблюдения продольной компоненты магнитных полей для 23-х Am и Hg-Mn звезд с точностью 30–40 Гс, что на порядок превышает точность предыдущих результатов. Поле не обнаружено.

4.4.2. Корреляционные методы измерения линейной поляризации

LSD-метод более полезен для исследования линейной поляризации в линиях и впервые был использован при поисках слабой поляризации с эшелле-спектрополяриметром MuSiCoS. Его применение позволило уверенно найти слабую линейную поляризацию у ряда магнитных Ar-звезд, исследования которых по отдельным линиям не привели к ее обнаружению.

LSD-метод представляет собой кросс-корреляционную процедуру, которая предназначена специально для “вытаскивания” слабого сигнала (порядка 0.01%–1% от полной амплитуды). В случае поисков линейной поляризации преимущество метода заключается в том, что форма профиля (и связанные с этим поляризационные особенности) слабо меняются от линии к линии (Вэйд, 2002).

Обзор, проведенный на MuSiCoS, позволил обнаружить собственную линейную поляризацию в линиях более чем у десяти Ar-звезд. Среди них имеются и те, у которых не была найдена собственная широкополосная линейная поляризация из-за большой межзвездной линейной поляризации, или малой плотности линий, либо из-за насыщения (Вэйд и др., 2000a).

В тех случаях, когда имеются одновременно и данные широкополосной поляриметрии (Леруа, 1995) и данные поляриметрии в линиях, полученные на MuSiCoS (Вэйд и др., 2000a), они хорошо

согласуются, что еще раз подтверждает, что широкополосная поляризация вызвана насыщенными спектральными линиями (Вэйд и др., 2000b)

Однако предсказанные QU -профили отдельных линий, даже в случае простейшего дипольного поля, сильно отличаются друг от друга. Хотя LSD-метод позволяет обнаруживать линейную поляризацию, связь между LSD-профилем и вычисленными профилями линейной поляризации отдельных линий в настоящее время далека от ясности, т. к. последние очень чувствительны к величине $v \sin i$ и к конфигурации поля.

4.5. Определение модуля среднего поля

Кроме того, что магнитное поле влияет на линии таким образом, что V -параметр Стокса не равен нулю, оно искажает также I -параметр, т. е. профиль спектральной линии. Это искажение у звезд солнечного типа, но еще заметнее — у CP-звезд, где фактор заполнения равен или очень близок к 1. Наиболее яркое проявление магнитных полей в спектрах интенсивности — это присутствие линий, которые четко расщепляются на зеемановские компоненты, как у HD 215441. В менее благоприятном случае поле проявляется в уширении линий. Диагностика магнитных полей по неразрешенным профилям впервые была выполнена для Ar-звезд Престоном (1971).

4.5.1. Линии с разрешенными компонентами зеемановского расщепления

В некоторых CP-звездах спектральные линии расщепляются на компоненты. Они могут наблюдаться только при определенных условиях:

- 1) немагнитная ширина спектральной линии меньше зеемановского расщепления;
- 2) поле существенно однородно по видимой звездной поверхности, изменения поля привели бы к уширению линий;
- 3) зеемановская картина расщепления должна быть простой, с малым числом компонент.

Первое условие реализуется, если поле достаточно большое, а звезда вращается медленно или видна с полюса вращения. Из-за этого число звезд с наблюдаемым расщеплением мало. Второе условие характеризует Ar-звезды в целом. У всех объектов, для которых наблюдаются расщепленные компоненты, линии очень узкие. Это указывает на то, что их поля действительно однородны. Кроме того, они покрывают всю или почти всю поверхность звезды, что показано, например, в работе Матиса и др. (1997): картина расщепления линии Fe II 6149.246 на две компоненты в спектре звезды HD 94660 постоянна и интенсивность меж-

ду компонентами достигает континуума (нет центральной компоненты). Третье условие тоже понятно, лучше всего использовать линии с простым расщеплением и большим фактором Ланде.

Таким образом, измерения относительных сдвигов, зеемановская картина которых представляет собой дублет или триплет, можно интерпретировать в терминах ($\sigma\pm$)-компоненты, взвешенной по интенсивности и усредненной по диску звезды. Результат не зависит от ориентации вектора поля. Если мы найдем относительные интенсивности разрешенных π - и σ -компонент, то можем судить о картине поля.

4.5.2. Линии, уширенные эффектом Зеемана

Расщепление линий видно редко, в большинстве случаев имеет место дифференциальное уширение. Рассмотрим, какую информацию можно извлечь в этом случае.

Престон (1971) был первым, кто использовал дифференциальное уширение для количественного изучения магнитных полей. Он измерил полную ширину W для выборки линий с разной чувствительностью к магнитному полю и предположил, что она зависит от эффективного фактора Ланде z и от длины волны следующим образом:

$$W^2 = W_0^2 + K^2 \lambda_0^4 z^2, \quad (13)$$

где W_0^2 — собственная ширина линии при отсутствии поля, включая инструментальный профиль и доплеровское уширение; K — коэффициент, пропорциональный величине магнитного поля. Далее усредняют величины W^2 отдельно для линий с большим и малым фактором Ланде. При таком подходе, однако, имеются существенные трудности. Главная из них следующая. Ширина полностью расщепленной зеемановской линии в общем случае не зависит от геометрии поля, в то время как неполностью расщепленной — зависит. Это интуитивно понятно на примере простого триплета. Когда такая линия расщеплена полностью, ее полная ширина определяется только расщеплением по длине волны и шириной ее σ -компонент. Когда линия расщеплена не полностью, π -компонента вносит вклад в ширину линии в зависимости от геометрии поля.

Диделон (1987) попробовал применить методику Робинсона (1980) для диагностики магнитных полей Ар-звезд. Он сравнил средний модуль магнитного поля, полученный из наблюдений разрешенных линий и по методу Робинсона. Было найдено различие между величинами поля, полученными по двум парам линий, причину возникновения которого надо еще выяснить. Вероятно, про-

блемы связаны с применением методики при наблюдениях холодных звезд.

Из-за крупномасштабной структуры магнитного поля его воздействие в какой-то точке звездной поверхности может коррелировать с доплеровским сдвигом излучения, выходящего из этой точки. Это показывает, что методику Робинсона можно применять только к звездам с пренебрежимо малой величиной $v \sin i$. Подобным образом угол γ между лучом зрения и локальным магнитным вектором также коррелирует с локальной величиной поля. Поэтому переменность ширины линии может быть больше в магнитных областях солнечноподобных звезд, где ширины зависят только от γ .

Все способы диагностики, основанные на изучении I -параметра Стокса, имеют несколько ограничений, главное из которых то, что их можно применять только к звездам с очень медленным вращением.

4.5.3. Магнитное усиление линий

Магнитное усиление — это увеличение эквивалентной ширины в зависимости от характера расщепления, от величины и направления магнитного поля, от параметров поглощающей среды. Оно однозначно зависит от произведения числа компонент на величину шага расщепления $n\delta$ (Боярчук и др., 1960).

В случае линий поглощения, из-за нелинейности кривой роста и насыщения, возникает увеличение эквивалентной ширины, пропорциональное величине поля, на что впервые обратил внимание Унно (1956). Этот эффект необходимо иметь в виду при изучении содержания элементов в CP-звездах.

Мы предположили (Романюк, 1984), что аномальное усиление линий редких земель в спектрах CP-звезд можно объяснить магнитной интенсификацией в том случае, если величина поля составляет в среднем 20–25 кГс, но это противоречит наблюдениям.

Престон (1970) исследовал магнитное усиление линий в спектре HD 126515. Эта звезда обладает поверхностным полем от 10 до 17 кГс, что позволяет наблюдать его проявления. Действие поля было представлено как псевдомикротурбуленция, а его величина получена попутно при проведении точного анализа химсостава.

Эта методика дает грубую оценку модуля поля в случае, если нельзя применить более точные способы. Впервые этим методом воспользовались Хенсберг и Делюр (1974). Средние модули магнитных полей нескольких звезд найдены Рябчиковой и др. (1984; 1988). Точность полученных оценок

была невысокой, порядка 1 кГс или хуже. Колев (1977) показал, что использование метода сравнения наблюдаемых и теоретических зависимостей W_λ от $\lg gf$ для линий одного и того же супермультиплета позволяет выявлять магнитную интенсификацию линий. Предложен метод оценки величины поля по относительному усилению линий с разными z и близкими значениями $\lg gf$.

4.6. Метод моментов Матиса

В восьмидесятые и девяностые годы известный исследователь магнитных звезд Г. Матис опубликовал ряд работ, в которых развивается метод моментов для определения параметров магнитного поля. Наиболее последовательно основы метода представлены в работе Матиса (1989). Кратко изложим суть метода, следуя работам Матиса (1989, 2001).

Свойства спектральной линии в магнитном поле определяются переносом поляризованного излучения. Рассмотрим уравнения переноса для 4-х параметров Стокса I, Q, U, V в приближении атмосферы Миллна–Эдингтона (линейная функция источника, отношение поглощения в линии к континууму постоянно). В случае слабых линий и слабого поля решения будут простыми.

Предположения, которые используются в большинстве методов измерения магнитных полей, следующие:

- 1) среднее разделение центров циркулярно поляризованных $(I+V)$ и $(I-V)$ линий пропорционально $z\langle B_z \rangle$, где z — эффективный фактор Ланде, а $\langle B_z \rangle$ — усредненный по лучу зрения компонент магнитного поля;
- 2) в приближении слабого поля (и при малой величине $v \sin i$) $V \sim z B_z \frac{dI}{d\lambda}$ в локальной линии);
- 3) разделение разрешенных σ -компонент пропорционально $z\langle B_z \rangle$.

Интегрирование проводится по всей линии, предел интегрирования может находиться далеко в крыльях: до максимально возможного зеемановского сдвига в комбинации с эффектом Доплера в любой точке звездной поверхности.

Особый интерес вызывает момент второго порядка, который представляет собой зависимость формы профиля от квадрата среднего магнитного поля и его компоненты по лучу зрения, усредненных по видимому диску звезды и взвешенных по интенсивности в линии. Если профиль определяется независимым образом (например, из теоретических моделей или по наблюдениям нулевых линий, как в методе Робинсона), магнитный вклад в момент второго порядка можно вычленивать. Вклад $\langle B^2 \rangle$ и $\langle B_z^2 \rangle$ можно, в принципе, различить, используя две линии с различными картинами зееманов-

ского расщепления.

Моделирование поля, получаемого в таких измерениях, традиционно сводится к вычислению ожидаемых величин $\langle B_z \rangle$ и $\langle B \rangle$ для мультипольной модели магнитного поля и сравнению их с наблюдаемыми моментами. Поскольку поведение большинства величин $\langle B \rangle$ и $\langle B_z \rangle$ близко к синусоидальному, то модель дипольного магнитного поля у CP-звезд имеет веские аргументы. Но даже для такой простейшей модели необходимо знать три параметра (наклон оси вращения к лучу зрения i , угол наклона магнитной оси к оси вращения β и величину поля на полюсе B_d), т.е. единственную модель нельзя получить без независимого определения величины i .

4.7. Косвенные методы

Ниже рассмотрим два метода, позволяющие обнаружить указания на присутствие магнитных полей у звезд. Однако их применение не дает возможности измерить величину поля.

4.7.1. Магнитные поля, получаемые по женеvской фотометрии

В непрерывных спектрах CP-звезд наблюдаются широкие (200–300Å) и мелкие (глубиной несколько процентов интенсивности) депрессии. Эти аномалии в распределении энергии, характерные для CP-звезд, были обнаружены Глаголевским (1966) и Кодайра (1969). Разработаны различные критерии, позволяющие на основании среднеполосных фотометрических наблюдений, в частности, выполненных в области наиболее сильной депрессии на 5200Å, отличать CP-звезды от нормальных (Страйжис, 1977; Майтцен, 1976 и др.).

В работах Крамера и Мидера (1980), Норта (1980, 1984) найдены некоторые доказательства существования корреляции между параметрами пекулярности $\Delta(V_1 - G)$ и z женеvской фотометрической системы и средним магнитным полем B_s , определенным в основном из работы Престона (1971). Эта корреляция имеет место только для звезд горячее A5, так как z -параметр реально не определяется для более холодных звезд.

Кроме того, Крамером и Мидером (1980) был найден эффект насыщения: для звезд с B_s более 5 кГс магнитное поле и вышеуказанные параметры женеvской системы не зависят друг от друга. Они предложили список из 258-ми звезд, у которых по данным женеvской фотометрии предсказали поверхностное магнитное поле B_s более 1 кГс.

В отличие от измерений магнитных полей, фотометрию можно выполнять на небольших телескопах, поэтому в случае работоспособности ука-

занного критерия можно было бы резко увеличить количество наблюдений и более эффективно выявлять новые кандидаты в магнитные звезды.

В начале восьмидесятых на 6-м телескопе была выполнена обширная программа наблюдений, результаты опубликованы в работах Глаголевского и др. (1982, 1985b). Через 20 лет исследования были продолжены уже с использованием ПЗС-матриц (Елькин и др. (2002, 2003) и др.). В этих работах было показано, что действительно существует некоторая корреляция между величиной магнитного поля на поверхности звезды и аномалиями в распределении энергии в континууме, но рассеяние точек в искомой зависимости велико.

За 25 лет наблюдений нами было обнаружено более 50-ти новых магнитных *SP*-звезд, что составляет примерно половину из всех найденных за это время в мире. Таким образом, методика доказала свою эффективность при отборе кандидатов в магнитные звезды: аномалии континуума могут использоваться как индикаторы присутствия поля. В то же время прямые измерения поля заменять результатами косвенных фотометрических определений, основанных на эмпирической зависимости, не следует.

4.7.2. Широкополосные измерения линейной поляризации

Это один из немногих методов, который может дать информацию о поперечном магнитном поле. Широкополосная линейная поляризация возникает из-за насыщения линий в сильном магнитном поле: поскольку насыщение π - и σ -компонент не одинаково, возникает остаточная линейная поляризация. Впервые это заметил Леруа (1962). Он же (Леруа, 1997) отмечает, что простая каноническая модель, основывающаяся на модели наклонного ротатора, предсказывает специфические особенности диаграмм в плоскости $Q-U$, которые очень хорошо согласуются с данными наблюдений. Было установлено, что если известны и продольная компонента поля и переменность широкополосной линейной поляризации, то можно независимо определить углы i и β , характерные для дипольной модели поля.

Леруа (1995) выполнил большой обзор широкополосной линейной поляризации *SP*-звезд со специально созданным поляриметром. Найдена собственная переменная линейная поляризация примерно у 15-ти звезд и для них определены параметры магнитной модели. Еще у 30-ти объектов выявлена либо слабая собственная линейная поляризация, либо сильная межзвездная. И в том, и в другом случае не удалось обнаружить ее переменности со временем. Еще одно ценное свойство

метода — наблюдения можно проводить на инструменте умеренных размеров (в работе Леруа (1995) — это 2-м телескоп Бернар Лио), что позволяет иметь достаточное количество ночного времени.

Результаты широкополосной линейной поляриметрии однозначно указывают на справедливость модели наклонного ротатора для магнитных *SP*-звезд.

4.8. Метод доплер-зеemanовского картирования

Для выяснения конфигурации магнитного поля на поверхности звезды и его связи с аномалиями химического состава необходимо знать эти величины в отдельных точках поверхности. Это достигается методом доплер-зеemanовского (Д-З) картирования, который с математической точки зрения относится к классу некорректно поставленных задач.

Пионерские работы в этом направлении принадлежат В. Л. Хохловой и ее сотрудникам. Как пишет она в обзоре (Хохлова, 1983), первая попытка строгого количественного подхода к решению обратной задачи — получения карты распределения химического элемента по неоднородной поверхности вращающейся звезды из наблюдаемых спектральных изменений — была предпринята Дейчем (1957, 1970). Метод оказался малоэффективным, так как входной информацией служили интегральные характеристики линий.

Математическая модель решения обратной задачи с использованием локальных профилей линий была предложена Хохловой (1976). Первоначально метод был развит и применен для картирования распределения химических элементов без учета магнитного поля на поверхности и применялся для звезд со слабым полем (Хохлова, 1976; Велау и др., 1982; Велау и др., 1991 и др.).

Позднее были разработаны программы, которые использовались для нахождения магнитного поля без одновременного определения или учета “химической карты” (см., например, Пискунов (1985), Донати и др. (1989)).

В действительности по достижении некоторой предельной величины поля и при выраженной химической неоднородности обе задачи должны решаться совместно. Это сильно усложняет решение и представляет значительные вычислительные трудности. Васильченко и др. (1996) был разработан эффективный метод совместного решения уравнений для I и V -параметров Стокса, позволяющий одновременно получать распределение химического элемента и параметры произвольно смещенного магнитного диполя по наблюдаемым I и V -профилям. Однако моделирование магнитного поля сопряжено с трудностями, поскольку поля-

ризованные профили линий зависят не только от величины, но и от ориентации магнитного поля.

Н. Е. Пискунов разработал новый подход к картированию магнитных звезд. Созданные им и О. Кочуховым программы позволяют картировать вектор магнитного поля и еще один дополнительный скалярный параметр, например содержание элементов. В работах Кочухова (2000), Кочухова и др. (2001), Пискунова (2001) описаны программы реконструкции вектора магнитного поля по поверхности звезды без каких-либо предварительных предположений о его структуре с учетом или без учета неоднородностей химического состава. Подробное обсуждение проблемы проведено в недавнем обширном исследовании Кочухова (2004).

Некоторые результаты были получены при решении прямой задачи методом подбора (моделирования) Ландстритом (1988; 1990), Ландстритом и др. (1989), когда одновременно подбирались химическая карта и конфигурация магнитного поля. Очевидно, что такой метод крайне трудоемок и в достаточной степени субъективен.

Свой метод реконструкции магнитных полей пекулярных звезд предложил Баньюло (2001). Он заключается в прямом моделировании профилей Стокса, основанном на априорном допущении, что магнитные поля потенциальны и описываются ограниченным набором свободных параметров. Применение этого метода к конкретным звездам проиллюстрировано, например в работе Баньюло и Вэйда (2001).

Еще один метод моделирования магнитных полей звезд, основанный на распределении “магнитных зарядов”, предложен Гертом и Глаголевским (2001).

5. Заключение

Из вышеизложенного видно, что для анализа магнитных полей CP-звезд разработаны различные методы. Как правило исследуются те или иные проявления эффекта Зеемана в спектральных линиях, что позволяет получить необходимую информацию о магнитном поле. Прогресс в этом направлении обусловлен как повышением точности наблюдений, так и применением все более рафинированных методов моделирования, учитывающих сложности строения реальных звездных атмосфер.

Нам представляется, что в ближайшее время следует ожидать существенного продвижения в исследовании магнетизма CP-звезд. Ожидаемый прорыв связан с внедрением новой техники: начались магнитные наблюдения на 8-м телескопах ESO в Чили, существенно улучшилась инструмен-

тальная база и на 6-м телескопе SAO, что расширяет наши возможности. Созданы также новые методы анализа наблюдений.

Разработанные в последние годы методы доплер-зеемановского картирования (например, Пискуновым) позволяют построить карты распределения химических элементов и магнитного поля без каких-либо предварительных допущений. Необходимо получить наблюдательный материал очень высокого качества для возможно большего числа звезд: I, Q, U, V-спектры с высоким разрешением и отношением C/Ш, с хорошим покрытием по фазе периода для каждой звезды. Такая программа начала реализовываться на 6-м телескопе SAO. Следует ожидать, что после ее завершения мы сможем понять важные детали физики процессов, происходящих в атмосферах звезд с магнитными полями, и особенности энерговыделения.

В более отдаленной перспективе, с развитием интерферометрических методов наблюдений в оптическом диапазоне, можно ожидать пространственного разрешения дисков магнитных CP-звезд и прямого наблюдения пятен распределения химических элементов и конфигурации магнитного поля. Но для этого нужны интерферометры с базой не менее 1 км.

Вне нашего анализа пока остались аппаратурные вопросы. Мы посчитали целесообразным рассмотреть их отдельно.

Благодарности. Автор искренне благодарен Ю.В. Глаголевскому, Г.А. Чунтонову, Д.О. Кудрявцеву и В.Г. Елькину за многолетние обсуждения различных аспектов проблемы исследования звездного магнетизма, показавших целесообразность написания общего обзора, а Н.Ф. Войханской за критику, способствовавшую улучшению текста представляемой статьи.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант РФФИ 03-02-16342).

Список литературы

- Адельман (Adelman S.J.), 1973, *PASP*, **85**, N504, 227
 Антропов Ю.Ф., 1972, в сб: Новая техника в астрономии, под ред. Н.Н. Михельсона, вып.4, 75
 Асланов И.А., Рустамов Ю.С., 1975, *Письма в АЖ*, **1**, N4, 212
 Бак и Ланде (Back E., Lande A.), 1925, *Zeeman effekt und Multiplettstruktur der Spektrallinien*, Berlin, Springer-Verlag
 Баньюло (Bagnulo S.), 2001, In: “Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram”, eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, *ASP Conf. Series*, **248**, 287
 Баньюло и Вэйд (Bagnulo S., Wade, G.A.), 2001, in: “Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram”, eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickra-

- masinghe, ASP Conf. Series, **248**, 325
- Баран и др. (Baranne A., Mayor M., Poncet J.L.), 1979, *Vistas astron.* **23**, 279
- Беккерс (Beckers J.M.), 1969, "A Table of Zeeman Multiplets", Sacramento Peak Observatory Contribution, N141
- Борра (Borra E.F.), 1974, *ApJ*, **188**, 287
- Борра (Borra E.F.), 1974, *ApJ*, **202**, 741
- Борра (Borra E.F.), 1980a, *ApJ*, **235**, 911
- Борра (Borra E.F.), 1980b, *ApJ*, **235**, 915
- Борра и Воган (Borra E.F., Vaughan A.H.), 1977, *ApJ*, **216**, 462
- Борра и Ландстрит (Borra E.F., Landstreet J.D.), 1973, *ApJ*, **185**, 1.139
- Борра и Ландстрит (Borra E.F., Landstreet J.D.), 1980, *ApJS*, **42**, 421
- Борра и др. (Borra E.F., Landstreet J.D., Vaughan A.H.), 1973, *ApJ*, **185**, 1.145
- Борра и др. (Borra E.F., Edwards G., Mayor M.), 1984, *ApJ*, **284**, 211
- Боярчук А.А., Ефимов Ю.С., Степанов В.Е., 1960, *Изв. КрАО*, **24**, 52
- Браун и Ландстрит (Brown D.N., Landstreet J.D.), 1981, *ApJ*, **246**, 899
- Бэбкок (Babcock, H.W.), 1947a, *ApJ*, **105**, 105
- Бэбкок (Babcock, H.W.), 1947b, *PASP*, **59**, 112
- Бэбкок (Babcock, H.W.), 1953, *ApJ*, **118**, 387
- Бэбкок (Babcock, H.W.), 1958, *ApJS*, **30**, 141
- Бэбкок Х.У., 1967, "Методы Астрономии" под ред. В.А. Хилтнера, Москва, Мир, 100
- Бычков и др. (Bychkov V.D., Gazhur E.B., Glagolevskij Yu.V., Elkin V.G., Naidenov I.D., Romanyuk I.I., Chuntunov G.A., Shtol V.G.), 1988, in: "Magnetic stars", Proc. of Int. Conf., eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.M. Kopylov, Leningrad, Nauka, 12
- Вайсс и др. (Weiss W.W., Jenkner H., Wood J.H.), 1978, *A&A*, **63**, 247
- Валенти и Джонс-Крулл (Valenti J.A., Johns-Krull C.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Series, **248**, 169
- Васильченко Д.В., Степанов В.В., Хохлова В.Л., 1996, *Письма в АЖ*, **22**, 924
- Велау В., Райс Дж., Пискунов Н.Е., Хохлова В.Л., 1982, *Письма в АЖ*, **8**, 30
- Велау и др. (Wehlau W.H., Rice J.B., Khokhlova V.L.), 1991, *Astron Astrophys Transact.*, **1**, 55
- Вольф (Wolff S.C.), 1978, *PASP*, **90**, 412
- Вольф и Бонсак (Wolff S.C., Bonsack W.K.), 1972, *ApJ*, **176**, 425
- Вэйд (Wade G.A.), 2002, *APN*, **38**, 1
- Вэйд и др. (Wade G.A., Donati J-F, Landstreet J.D., Shorlin S.L.S.), 2000a, *MNRAS*, **313**, 823
- Вэйд и др. (Wade G.A., Donati J-F, Landstreet J.D., Shorlin S.L.S.), 2000b, *MNRAS*, **313**, 851
- Герт и Глаголевский (Gerth E., Glagolevskij Yu.V.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Series, **248**, 333.
- Глаголевский Ю.В., 1966, кандидатская диссертация, Алма-Ата
- Глаголевский Ю.В., Козлова К.И., Копылов И.М., Кумайгородская Р.Н., Лебедев В.С., Романюк И.И., Чунакова Н.М., Чунтонов Г.А., 1977, *Письма в АЖ*, **3**, N11, 500
- Глаголевский Ю.В., Чунтонов Г.А., Найденов И.Д., Романюк И.И., Рядченко В.П., Борисенко А.Н., Драбек С.В., 1979, *Сообщ. САО*, **25**, 5
- Глаголевский Ю.В., Бычков В.Д., Романюк И.И., Илиев И.Х. Чунакова Н.М., 1982, *Письма в АЖ*, **8**, N1, 26
- Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Бычков В.Д., Лебедев В.С., 1984, *Астрофиз. исслед (Изв. САО)*, **18**, 57
- Глаголевский Ю.В., Пискунов Н.Е., Хохлова В.Л., 1985a, *ПАЖ*, **11**, 371
- Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Бычков В.Д., Чунакова Н.М., 1985b, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **19**, 28
- Глаголевский и др. (Glagolevskij Yu.V., Elkin V.G., Romanyuk I.I., Shtol V.G.), 1988, in: "Magnetic stars", Proc. of Int. Conf., eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.M. Kopylov, 1988, Leningrad, Nauka, 22
- Глаголевский Ю.В., Романюк И.И., Найденов И.Д., Штоль В.Г., 1989, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **27**, 34
- Глаголевский и др. (Glagolevskij Yu.V., Elkin V.G., Romanyuk I.I., Shtol V.G.), 1990, in: "Theses of All-Union conf. Classical Be stars and Herbig Ae/Be stars", Alma-Ata, 28
- Гнедин и Нацвлишвили (Gnedin Yu.N., Natsvlshvili T.M.), 1997, in: "Stellar magnetic fields", Proceed of Intern. meeting, eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 40
- Дейч (Deutsch A.), 1957, *AJ*, **62**, 139
- Дейч (Deutsch A.), 1970, *ApJ*, **159**, 985
- Диделон (Didelon P.), 1987, *The Messenger*, **49**, 5
- Долгинов А.З., Гнедин Ю.Н., Силантьев Н.А., 1979, "Распространение и поляризация излучения в космической среде", Москва, Наука, 423с.
- Долгинов и др. (Dolginov A.Z., Gnedin Yu.N., Silant'ev N.A.), 1996, "Propagation and polarisation of radiation in cosmic media", Gordon and Breach, 3
- Донати и Колье Камерон (Donati J-F., Collier Cameron A.), 1997, *MNRAS*, **291**, 1
- Донати и др. (Donati J-F., Semel M., Praderie F.), 1989, *A&A*, **225**, 467
- Донати и др. (Donati J-F., Semel M., Carter B.D., Rees D.E., Cameron A.C.), 1997, *MNRAS*, **291**, 658
- Донати и др. (Donati J-F., Catala C., Wade, G. A., Gallou, G., Delaigue, G., Rabou, P., 1999, *A&AS*, **134**, 149
- Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., 2002, *Письма в АЖ*, **28**, 195
- Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И., 2003, *Письма в АЖ*, **29**, 455
- Илиев и др. (Iliev I.Kh., Barzova I.S., Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., Bychkov V.D., Elkin V.G., Shtol V.G.), 1990, in: "Hot chemically peculiar and magnetic stars", ed. G.Scholz, Proc. of 8-th magnetic conf. of East European countries, Potsdam obs. contr., N125, 78
- Кодайра (Kodaira K.), 1969, *ApJ*, **157**, 59
- Кодайра и Унно (Kodaira K., Unno W.), 1969, *ApJ*, **157**, 769

- Колев Д.З., 1977, Письма в АЖ, **3**, N8, 363
- Кочухов (Kochukhov O.P.), 2000, in: "Magnetic Fields of CP and related star", eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 106
- Кочухов (Kochukhov O.P.), 2004, in: "Magnetic Stars", eds.: Yu.V. Glagolevskij, D.O. Kudryavtsev and I. Romanyuk, Nizhnij Arkhyz, 64
- Кочухов и др. (Kochukhov O., Piskunov N., Ilyin I., Ilyina S., Tuominen I.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung-Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Series, **248**, 293
- Крамер и Мидер (Cramer N., Maeder A.), 1980, A&A, **88**, 135
- Кудрявцев Д.О., 2002, Кандидатская диссертация, Н. Архыз
- Кудрявцев и др. (Kudryavtsev D.O., Piskunov N.E., Romanyuk I.I., Chountonov G.A., Shtol V.G.), 2000, in: "Magnetic Fields of CP and related stars", eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 64
- Купка и др. (Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H.C., Weiss W.), 1999, A&AS, **138**, 119
- Куруч (Kurucz R.L.), 1979, Center for Astrophysics Reprint Series, No1050
- Куруч (Kurucz R.L.), 1992, Rev. Mexicana, Astron. Astrof., **23**, 45
- Куруч (Kurucz R.L.), 1993, CD ROMs 1-23 Smithsonian Astroph. obs.
- Ланди дель Иннокенти (Landi Degl' Innocenti E.), 1975, A&A, **45**, 269
- Ланди дель Иннокенти (Landi Degl' Innocenti E.), 1983, Solar Phys., **85**, 3.
- Ландстрит (Landstreet J.D.), 1969, PASP, **81**, 896
- Ландстрит (Landstreet J.D.), 1988, ApJ, **326**, 967
- Ландстрит (Landstreet J.D.), 1990, ApJ, **352**, 15
- Ландстрит (Landstreet J.D.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung -Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Series, **248**, 277
- Ландстрит и др. (Landstreet J.D., Barker P.K., Bohlander D.A., Jewison M.S.), 1989, ApJ, **344**, 876
- Леруа (Leroy J.-L.), 1962, Ann. Astrophys., **25**, 127
- Леруа (Leroy J.-L.), 1995, A&AS, **114**, 79
- Леруа (Leroy J.-L.), 1997, In: Stellar magnetic fields, Eds: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 30
- Майтцен (Maitzen H.M.), 1976, A&A, **51**, 223
- Мартин и др. (Martin W., Zalubas R., Hagan L.), 1978, Atomic Energy Levels, NSRDS-NBS, 60
- Матис (Mathys G.), 1989, "The observation of Magnetic Fields in Non- degenerate stars", in: Fundamentals of Cosmic Physic, **13**, 143.
- Матис (Mathys G.), 1990, A&A, **232**, 151
- Матис (Mathys G.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung- Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Series, **248**, 267
- Матис и Стенфло (Mathys G., Stenflo J.O.), 1986, A&A, **168**, 184
- Матис и Стенфло (Mathys G., Stenflo J.O.), 1987a, A&A, **171**, 368
- Матис и Стенфло (Mathys G., Stenflo J.O.), 1987b, A&AS, **67**, 557
- Матис и др. (Mathys G., Hubrig S., Landstreet J.D., Lanz T., Manfroid J.), 1997, Astron. Astrophys. Supl. Ser., **123**, 353
- Местель (Mestel L.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung- Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, ASP Conf. Series, **248**, 3
- Миннаерт (Minnaert M.), 1937, Observatory, **60**, 292
- Мур (Moore Ch.), 1945, Multiplet Table of Astrophysical Interest, Princeton.
- Найденев И.Д., Чунтонов Г.А., 1976, Сообщ. САО, **16**, 63
- Норт (North P.), 1980, A&A, **82**, 230
- Норт (North P.), 1984, A&AS, **55**, 259
- Пискунов Н.Е., 1985, Письма в АЖ., **11**, 371
- Пискунов (Piskunov N.E.), 2001, in: "Magnetic fields across the Hertzsprung Russel diagram", eds.: G. Mathys, S.K. Solanki, D.T. Wickramasinghe, SP Conf. Series, **248**, 293
- Пискунов и др. (Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A., Weiss W.W., Geffery C.S.), 1995, A&AS, **112**, 525
- Престон (Preston G.), 1967, ApJ, **150**, 871
- Престон (Preston G.), 1969a, ApJ, **156**, 967
- Престон (Preston G.), 1969b, ApJ, **157**, 247
- Престон (Preston G.), 1970, ApJ, **160**, 1059
- Престон (Preston G.), 1971, ApJ, **164**, 309
- Престон (Preston G.), 1972, ApJ, **175**, 465
- Престон и Вольф (Preston G.W., Wolff S.C.), 1970, ApJ, **160**, 1071
- Престон и Стемпень (Preston G., Stepien K.), 1968, ApJ, **151**, 583
- Рачковский Д.Н., 1972, Известия КраО, **44**, 64
- Рачковский Д.Н., 1974, Известия КраО, **51**, 60
- Робинсон (Robinson R.D.), 1980, ApJ, **239**, 961
- Романюк И.И., 1984, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), **18**, 37
- Рябчикова и Пискунов (Ryabchikova T.A., Piskunov N.E.), 1984, in: "Magnetic stars", eds.: V.L. Khokhlova et al, Salaspils, 27
- Рябчикова и др. (Ryabchikova T.A., Davydova E.S., Kolev D.Z.), 1988, in: "Magnetic stars", eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.M. Kopylov, Leningrad, Nauka, 40
- Северный (Severny A.B.), 1970, apj, **159**, 1.73
- Северный А.Б., Кувшинов В.М., Никулин Н.С., 1974, Изв. КраО, **50**, 3
- Сирс (Seares F.N.), 1913, ApJ, **38**, 99
- Стемпень (Stepien K.), 1997, in: "Stellar magnetic fields", Proceed of Internat. meeting, eds.: Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, p.26
- Степанов В.Е. и Северный А.Б., 1962, Известия КраО, **28**, 166
- Страйжис В.Л., 1977, Многоцветная фотометрия звезд, Вильнюс: Мокслас, 310с.
- Унно (Unno W.), 1956, PASJap., **8**, 108
- Фогт и др. (Vogt S.S., Tull R., Helton P.), 1980, ApJ, **236**, 308
- Хенсберг (Hensberge H.), 1978, in: "Astrophysics in Infrare", Wien,
- Хенсберг и Делюр (Hensbere H., De Loore C.), 1974,

- A&A, **37**, 367
- Хохлова В.Л., 1976, *Astron. Nachr.*, **297**, N5, 217
- Хохлова В.Л., 1983, "Итоги науки и техники": Москва, ВИНТИ, 283
- Хэл (Hale G.E.), 1908, *ApJ*, **28**, 315
- Хэл (Hale G.E.), 1913, *ApJ*, **38**, 27
- Шольц и Герг (Scholz G., Gerth E.), 1981, *MNRAS*, **195**, 853
- Шорлин и др. (Shorlin S.L.S., Landstreet J.D., Wade G.A., Donati J-F.), 2000, in: "Magnetic fields of CP and related stars", Proceed of intern. meeting, eds.:
- Yu.V. Glagolevskij and I.I. Romanyuk, Moscow, 54
- Шпольский Э.В., 1984, "Атомная физика", ч. II, Москва, Наука, 265
- Штифт (Stift M.J.), 1986, *MNRAS*, **219**, 203
- Штифт (Stift M.J.), 1987, *MNRAS*, **228**, 109
- Штоль В.Г., Бычков В.Д., Викульев Н.А., Георгиев О.Ю., Глаголевский Ю.В., Драбек С.В., Найденов И.Д., Романюк И.И., 1985, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **19**, 66
- Энжел и Ландстрит (Angel J.R.P., Landstreet J.D.), 1970, *ApJ*, **162**, 261