

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 11

ФЕВРАЛЬ, 1975

ВЫПУСК 1

ОБЗОРЫ

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

О. С. ШУЛОВ

1. *Введение.* Из-за их слабого блеска белые карлики (БК) с трудом поддаются наблюдательному изучению, однако интерес к этим объектам весьма высок, поскольку считается, что они представляют собой одну из конечных форм звездной эволюции. Прогресс в технике наблюдений в последние годы привел к обнаружению двух новых наблюдательных фактов: во-первых, оказалось, что некоторые БК показывают быстрые квазипериодические колебания блеска с малыми амплитудами, причиной которых, вероятно, являются нерадиальные пульсации этих звезд, и, во-вторых, у нескольких БК была найдена круговая поляризация, указывающая на присутствие магнитных полей $\sim 10^6 - 10^7$ гс. Эти открытия наводят на мысль, что в БК действуют силы и протекают физические процессы, которые до сих пор либо совсем не учитывались, либо учитывались в недостаточной степени при изучении строения и эволюции этих звезд, и что необходим определенный пересмотр сложившихся представлений.

Целью данного обзора является систематизация разбросанных в текущей литературе наблюдательных данных относительно последнего из этих двух открытий с тем, чтобы представить их компактную сводку и дать их критический анализ. Отчасти эта работа уже была проделана в более широком по тематике обзоре Сазонова [1].

Общие сведения о БК можно найти в обзорах [2-8], суммирующих наблюдательные данные за предшествующие годы. Одно из последних уточнений основных параметров этих звезд (светимости, массы, радиусы, температуры) принадлежит Шипману [9]. Согласно этой работе, медианный радиус достаточно репрезентативной выборки БК со-

ставляет $R = 0.0095 R_{\odot} = 6.6 \cdot 10^8$ см, соответствующая медианная масса $M = 0.52 M_{\odot} = 1.03 \cdot 10^{33}$ г; эффективные температуры простираются от 6000 до 50000° К, светимости — от $3 \cdot 10^{-1}$ до $5 \cdot 10^{-2} L_{\odot}$.

Следует сделать несколько замечаний о числе известных БК, их номенклатуре и обозначениях. Для обнаружения возможных БК наиболее широко применяются два метода. Первый заключается в выявлении слабых звезд с большими собственными движениями с последующим определением их цветовых эквивалентов. Те из них, которые оказываются более голубыми, чем обычные звезды, потенциально являются белыми карликами или субкарликами. Второй метод сводится к чисто фотометрическому поиску слабых голубых звезд в областях неба, где присутствие горячих звезд высокой светимости маловероятно (на фоне темных туманностей в Млечном Пути, в районах полюсов Галактики). Первый метод был предложен Лютеном, который в течение 35 лет осуществил на его основе обширнейшую наблюдательную программу, выявив около 20000 слабых звезд с большими собственными движениями. Возможные БК опубликованы в каталоге [10], их около 2000. Аналогичную программу выполняли Гиклас и другие сотрудники обсерватории Ловелла, результаты публикуются в *Lowell Observatory Bulletin* с 1959 г. и далее. Второй метод был предложен Амбарцумяном и Шайном [11] и впоследствии практически применялся Хьюмасоном и Цвикки [12] и другими наблюдателями. Он позволяет выявлять только очень горячие звезды низкой светимости.

Главное достоинство этих методов — их массовость, однако сами по себе они не способны уверенно отделять истинные БК от других объектов пониженной светимости вроде субкарликов. Окончательное решение об отнесении данной звезды к БК может быть вынесено только на основе спектроскопических наблюдений, и именно эту трудоемкую работу в течение многих лет проводит Гринстейн, опубликовавший (частично в соавторстве с Эггеном) шесть списков спектроскопически подтвержденных БК [13—16]. В этих списках содержится всего 289 звезд. Первые 266 звезд носят номера серии EG, последующие, начиная с 267, обозначаются индексом GR. Звезды, не входящие в списки Гринстейна, как правило, могут считаться БК лишь весьма условно.

Помимо номера EG или GR, за каждой звездой сохраняется ее первоначальное обозначение по каталогу, где она была впервые выявлена как потенциальный БК, что облегчает ее идентификацию, поскольку именно в этих каталогах обычно приводятся необходимые поисковые карты. Эти обозначения обычно состоят из буквенного шифра и номера по соответствующему каталогу. Так, обозначения L, LB, LDS относятся к каталогам Лютена, G и GD — к каталогам Гикласа, HZ —

звезды Хьюмассона-Цвики, F — Фейге, R — Росса, W — Вольфа и т. п. Изредка встречаются обозначения по другим, менее специальным каталогам, например, по Избранным Площадкам Каптейна (SA).

Таким образом, сейчас известно чуть меньше 300 спектроскопически подтвержденных БК, тогда как заподозрены в принадлежности к этой группе несколько тысяч звезд. Очевидная диспропорция красноречиво свидетельствует о необходимости дальнейшей наблюдательной работы.

2. *Предварительные оценки магнитного поля.* Следующие простые соображения приводят к предположению, что БК могут обладать большими магнитными полями. Солнце, как известно, имеет общее магнитное поле $H \approx 1$ гс; с другой стороны, поля магнитных звезд достигают $10^1 - 10^4$ гс. Следовательно, можно ожидать, что многие „немагнитные“ звезды могут иметь промежуточные значения поля. И действительно, недавние наблюдения слабых магнитных полей [17, 18] выявили у некоторых нормальных звезд $H \sim 10 - 100$ гс. Магнитное поле таких звезд, если уж оно возникло, не может без особых причин самопроизвольно уменьшиться за время „спокойной“ эволюции, поскольку характерное время его затухания вследствие джоулевых потерь, определяемое формулой $\tau = 4\pi \gamma R^2/c^2$, где γ — электропроводность вещества [19], для звезды типа Солнца составляет $\tau \approx 2 \cdot 10^{10}$ лет.

Но даже на более бурных фазах эволюции в силу свойства „вмороженности“ магнитного поля в вещество звезды магнитный поток должен иметь тенденцию сохраняться, то есть, если поле не уносится вместе с веществом при сбросе излишней массы, то должно быть $HR^2 \approx \text{const}$ и H должно возрастать с уменьшением радиуса R . Некоторое подтверждение консервативности магнитного потока в ходе эволюции следует из факта существования пульсаров, поскольку для объяснения импульсного характера их излучения в общепринятой сейчас модели вращающейся нейтронной звезды необходимо предположить, что нейтронная звезда с $R \sim 10^{10}$ см имеет поле $H \approx 10^{11}$ гс, то есть как раз то значение, которое должно получаться при сжатии типичной нормальной звезды с $R \sim 10^{11}$ см и $H \sim 10$ гс до размеров нейтронной при условии $HR^2 = \text{const}$.

Если БК образуются из нормальных звезд, то применение к ним этих же рассуждений показывает, что они могут иметь поля $H \sim 10^6$ гс, которые затухают очень медленно [20] с $\tau \approx 10^{10}$ лет, вследствие чего такие поля могут ожидаться у БК любого возраста. Если такие поля действительно существуют, они могут заметно повлиять не только на свойства наблюдаемых внешних слоев звезды, но и на ее внутреннюю структуру [20]. Отсюда ясно, что изучение магнитных полей БК яв-

ляется необходимым шагом на пути к пониманию конечных стадий звездной эволюции. Но обычно применяемая для измерения магнитных полей у нормальных звезд аппаратура не годится для наблюдений БК, поэтому для БК были предложены другие методы.

3. *Квадратичный эффект Зеемана*. В 1970 г. Престон [21] обратил внимание, что при $H \sim 10^6$ гс в водородном атоме квадратичный эффект Зеемана по порядку величины сравнивается с обычным линейным эффектом практически во всех линиях бальмеровской серии, так что центр тяжести их сливающихся π - и σ -компонент будет смещен на $\Delta\lambda = -7.5 \cdot 10^{-23} \lambda^2 (n_u^4 - n_l^4) H^2$, где n_u, n_l — главные квантовые числа верхнего и нижнего уровней данного перехода [24]. Как видно, в отличие от гравитационного красного смещения, квадратичный эффект Зеемана ведет к отрицательным $\Delta\lambda$, которые в пределах серии изменяются как $\lambda^2 (n_u^4 - n_l^4)$, а не пропорционально λ , как при эффекте Доплера. По этим признакам его можно пытаться выделить на фоне других источников смещений спектральных линий.

Престон проанализировал измерения лучевых скоростей группы БК спектрального класса DA, выполненные Гринстейном и Тримбл [22], и не нашел заметных следов ожидаемого эффекта. Из анализа точности измерений он получил оценку верхнего предела $H \leq 5 \cdot 10^5$ гс для DA карликов. Необходимо подчеркнуть, что эта оценка относится к среднему значению поля u , рассматриваемой выборки звезд, а не к индивидуальным звездам, так как точность измерения лучевых скоростей у отдельных звезд недостаточна для получения уверенных заключений; кроме того, из-за отсутствия точных данных нельзя учесть гравитационное красное смещение и собственную лучевую скорость, тогда как для совокупности звезд можно воспользоваться средними параметрами, установленными достаточно надежно.

В [23] Тримбл нашла некоторые следы отрицательных смещений водородных линий, однако в 1972 г. Тримбл и Гринстейн [24] пришли к выводу, что этот результат ошибочен и обусловлен неучтенными систематическими погрешностями измерений. В [24] были определены лучевые скорости еще 74 БК, что позволило уточнить анализ Престона по большему ансамблю DA карликов (179 звезд). Тщательно исправив наблюдения за возможные систематические ошибки, авторы [24] понизили верхний предел среднего магнитного поля до $H \leq (1-2) \cdot 10^5$ гс, при этом не исключается, что некоторые звезды DA могут иметь поля $\sim 5 \cdot 10^5$ гс или даже больше.

Выводы работ [21, 24] часто рассматриваются как весьма надежные. Между тем, имеются основания для некоторого скептицизма в их оценке. Для правильного выделения квадратичного эффекта Зеемана

необходимо быть уверенным, что: 1) устранены все систематические ошибки аппаратуры и методики измерений, 2) учтены сдвиги $\Delta\lambda$, обусловленные всеми другими эффектами, кроме искомого, и 3) использованная теория сдвигов линий из-за квадратичного эффекта Зеемана (с учетом особенностей образования линий в спектрах БК) в необходимой степени точна. Недостаточный учет любой из этих причин сдвигов неизбежно искажает результат.

Трудности борьбы с ошибками измерений были хорошо продемонстрированы в [24]. Далее, нет гарантии, что требование (2) надежно выполнено, поскольку на видимые положения линий влияет слишком много факторов, от движения Солнца в пространстве до гравитационного красного смещения, и не исключено, что могут быть какие-то пока еще не известные дополнительные причины сдвигов. Например, Визе и Келлерхер [25] недавно показали, что эффект Штарка в БК не только расширяет, но и сдвигает линии в красную сторону на $\Delta\lambda$ порядка 15%, от гравитационного смещения, причем $\Delta\lambda$ зависят от электронной плотности. Точной теории этого явления пока нет, есть лишь грубые оценки, основанные на неполных лабораторных данных, поэтому внести соответствующие поправки за этот эффект фактически невозможно, хотя в [24] такая попытка была сделана.

Дальнейшие осложнения этого метода рассмотрел Борра [26]. Он вычислил ожидаемые профили водородных линий для серии упрощенных моделей атмосфер БК с сильными дипольными магнитными полями. Профили оказались очень несимметричными, причем асимметрия возрастает с номером линии и ростом напряженности поля и очень сильно зависит от геометрии последнего. Поскольку линии очень широкие, асимметрия может приводить к большим расхождениям в измерениях смещений, зависящим от того, что именно считать истинным положением линии и по каким частям линии его измерять. Нелинейность реакции обычно применяемых фотоматериалов усугубляет эти затруднения. Борра пришел к выводу, что ожидаемые неопределенности столь велики, что вполне могли замаскировать истинный эффект в работах [21, 24], выводы которых, таким образом, ставятся под сомнение. Однако, судя по тому, что опубликованные в [4] профили водородных линий не показывают большой асимметрии, Борра заключает, что большинство DA карликов все же, вероятно, имеет $H \lesssim 10^6$ гс. По-видимому, это наиболее реалистичная оценка того, что пока способен дать этот метод.

4. *Зеемановская поляризация внутри линий.* Энджел и Лэндстрит [27] воспользовались большой шириной ($\sim 10-100$ А) спектральных линий у БК, предложив измерять магнитные поля по фото-

электрическим наблюдениям круговой поляризации зеемановских π -компонент в крыльях водородной линии H_1 , выделяя нужные спектральные участки с помощью интерференционных фильтров с полушириной 30 Å. Как и в предыдущем методе, здесь измеряется продольная составляющая поля, но результат уже относится к каждой звезде индивидуально.

Показания своего поляриметра они проверили по магнитной переменной 53 Cam. Ни у одного из 9 наблюдавшихся DA карликов не было обнаружено заметной зеемановской поляризации. Верхние пределы для постоянных полей $H \geq 10^4 - 10^5$ гс, переменные поля с периодами более 21 сек, которые могли бы появиться в случае быстрого вращения звезд, не превышают $2 \cdot 10^5$ гс.

Из-за использования узких полос реакции этот метод обладает малой проникающей способностью и пригоден лишь для самых ярких БК. Поэтому он не получил дальнейшего применения к наблюдениям этих звезд, хотя в принципе он обеспечивает прямое измерение магнитного поля. Сейчас он продолжает использоваться главным образом для наблюдений ярких невырожденных звезд.

5. *Круговая поляризация в непрерывном спектре.* Третий метод изучения больших магнитных полей звезд был предложен Кемпом [28]. Кемп предсказал, что в присутствии магнитного поля непрерывное излучение теплового источника, обусловленное электронными переходами, должно быть циркулярно поляризовано со степенью круговой поляризации $p_v \sim \nu_H/\nu$, где ν_H — циклотронная частота, а ν — частота наблюдаемого излучения ($\nu_H \ll \nu$). Это предсказание в общих чертах было проверено лабораторными экспериментами [28, 29] и в зарубежной литературе получило название „механизма серотельной магнитноэмиссии“.

В наблюдениях БК этот метод получил наибольшее распространение, поскольку он позволяет использовать для поисковых наблюдений предельно широкие полосы реакции и, следовательно, резко улучшает проникающую силу аппаратуры. Современные двухканальные фотоэлектрические поляриметры позволяют реализовать точность измерения степени поляризации $\sim 0,01\%$ (абсолютная ошибка) для достаточно сильных сигналов, что для видимого излучения соответствует $H \sim 10^3$ гс, поэтому поля $H \geq 10^5$ гс сравнительно легко могут быть обнаружены. Предсказание Кемпа не может считаться безупречным с теоретической точки зрения (см. раздел 9) и оценка предельно обнаружимого поля с помощью простого соотношения, данного Кемпом, в лучшем случае справедлива лишь по порядку величины, но сама идея наблюдать поляризацию в непрерывном спектре оказалась достаточно плодотворной

поскольку почти сразу же привела к обнаружению первого БК с круговой поляризацией более 3% [30]. В дальнейшем этим методом круговая поляризация была уверенно найдена еще у четырех БК (см. разделы 6 и 7).

Второе существенное преимущество этого метода заключается в том, что он не связан с наблюдениями спектральных линий и, следовательно, может быть применен к БК с чисто непрерывными спектрами или спектрами, имеющими лишь слабые широкие полосы. Таких звезд известно довольно много, но они не могли исследоваться двумя предыдущими методами. И именно у некоторых из них излучение оказалось поляризованным!

6. *Сводка наблюдений круговой поляризации.* В табл. 1 (см. Приложение) собраны имеющиеся на конец 1973 г. наблюдения круговой поляризации у 75 БК. Знаки поляризации в седьмом столбце приведены к единой системе, в которой поляризация считается положительной, если электрический вектор вращается против часовой стрелки для наблюдателя, смотрящего на звезду. Если было выполнено более одного наблюдения, в таблице приводятся усредненные значения. Большинство поисковых наблюдений сделано в широкой полосе чувствительности мультищелочного фотокатода без фильтра. Наблюдения в менее широких полосах отмечены в восьмом столбце: С — широкая сине-зеленая полоса, К — широкая желто-красная полоса, H_γ — зеemanовская поляризация в линии H_γ из работы [27]. Без указания в девятом столбце литературного источника приводятся наблюдения, выполненные в 1973 г. автором совместно с Е. Н. Копецкой.

В табл. 2 приведена статистика звезд из табл. 1 с известными спектральными классами. В скобках указаны данные с учетом пяти БК с подозреваемой круговой поляризацией. Видно, что звезды с достоверно найденной поляризацией пока имеются только среди БК с пекулярными или DC спектрами, но еще не устранена опасность, что подобные выводы могут оказаться преждевременными. Действительно, только в группах DA и DC можно построить более или менее значимую статистику, причем если заподозренная у четырех DA звезд поляризация подтвердится, доля звезд с поляризацией в этих группах выравняется. Если предположить, что доля поляризованных звезд во всех спектральных классах примерно одинакова и составляет $\sim 10\%$, тогда в группах DO — DB и DF — DG наблюдавшихся звезд просто недостаточно для каких-либо статистических заключений. То же относится и к группе с пекулярными спектрами, то есть пока еще рано говорить, что около трети этих звезд имеют сильные магнитные поля.

В табл. 1 содержатся три из четырех известных сейчас БК с переменным блеском [39]. Ни у одного из них нет заметной круговой поляризации. У двух из них, R 548 и G 44—32, специально искалась переменная круговая поляризация с периодами их оптических пульсаций. Результат также отрицательный, откуда можно заключить, что переменность блеска не связана с большими магнитными полями на их поверхности. В дополнение к табл. 1 можно отметить, что у трех карликовых двойных систем, содержащих БК, — HZ 29, Z Cam и U Gem — также не было найдено заметной круговой поляризации [32, 33].

Таблица 2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАБЛЮДЕННЫХ ЗВЕЗД ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ КЛАССАМ

Спектральный класс	Наблюдалось звезд	Из них с поляризацией	Доля звезд с поляризацией, %
DO, DO-B, DB	6	0	0
DA	38	(4)	(10)
DA—F, DF, DG	3	0	0
DC	20	2	10
λ 4135, λ 4670	6	2	33
Всего*	75	5 (10)	7 (13)

Ефимов и Шаховской [40] наблюдали линейную поляризацию излучения 13 БК в пяти цветовых полосах от U до R и у некоторых из этих звезд заподозрили переменную линейную поляризацию со сложной зависимостью от длины волны. В частности, у 8 звезд позиционный угол плоскости поляризации систематически изменяется с длиной волны так, что это может быть интерпретировано как фарадеевское вращение в магнитоактивной плазме. Эти результаты нуждаются в подтверждении.

7. Магнитные белые карлики. Основные данные о четырех БК с уверенно установленной круговой поляризацией собраны в табл. 3. Звездные величины, цвета и спектральные классы взяты из работ [13, 41]; элементы и химические соединения, чьи линии и полосы видны в спектрах, а также отмеченные иоприсительным знаком предположительные отождествления спектральных особенностей, заимствованы из работ [41, 42, 47, 73]. Далее приводятся чернотельные температуры T , представляющие распределение энергии в наблюдаемом непрерывном

* Все звезды из табл. 1 без учета спектрального класса

спектре, найденные в основном из фотоэлектрических сканов в работах [9, 34, 41, 42]. Собственные движения приводятся в списках EG и GR. Параллакс и M_V для Grw + 70 8247 были надежно определены в [43], но для остальных звезд пока имеются лишь грубые оценки M_V , основанные на некоторых предположениях об их пространственных скоростях [41]. Радиус и светимость Grw + 70 8247 определялись в [9]. Безуспешные попытки обнаружить радиоизлучение описаны в [44, 45].

Таблица 3

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ О МАГНИТНЫХ БЕЛЫХ КАРИКАХ

Звезда	Grw + 70 8247	G 99-37	G 195-19	G 99-47
EG или GR	129	248	250	289
V	13. 19	14. 58	13. 79	14. 12
B-V	+0.05	+0.46	+0.30	+0.62
U-B	-0.85	-0.53	-0.65	-0.12
Спектр. класс	λ 4135p	λ 4670p	DC	DC
Линии или полосы в спектре	He ₂ ?	C ₂ , CH	металлы? C ₂ ?	нет
T (1000 °K)	12-13	7	8.1	5-6
φ ("/100)	0.54	0.27	1.56	1.07
π "	0.081			
M_V	12.7	12-15	12-15	12-15
$l_g(R/R_{\odot})$	-2.08			
$l_g(L/L_{\odot})$	-2.90			
Радиопоток (10^{-28} ат.м ⁻² мк ⁻¹)				
λ 2.8 см	-2±2	0±1	-2±4	-2±2
λ 21 см	<0.2		<0.2	

Совсем недавно в [88,90] было сообщено об обнаружении большой и, вероятно, переменной круговой и линейной поляризации у GD 229. Эта звезда была выделена в [89], как возможный БК. по ее собственному движению, но спектроскопического подтверждения пока не опубликовано. По предварительным данным из [90], ее спектр напоминает спектр Grw + 70 8247. Сведения об этой звезде пока настолько скудные и противоречивые, что мы воздержимся включить ее в дальнейшее обсуждение.

Для объяснения круговой поляризации магнитных БК было бы очень важно выяснить, чем же они отличаются от других БК. К сожалению, определенно ответить на этот вопрос пока нет возможности, хотя некоторые тенденции как будто намечаются. На двуцветной диаграмме (U - V), (B - V) магнитные БК располагаются ближе к верх-

ней границе полосы, занимаемой звездами без поляризации (ближе к линии черного тела). Они относятся к числу наиболее холодных БК, лишь у Grw + 70° 8247 температура достигает $\sim 12000^\circ\text{K}$. По светимости они, вероятно, принадлежат к более слабой из двух найденных в [13] последовательностей БК [41, 43]. В отсутствие измерений параллаксов, наиболее вероятная оценка абсолютных величин G 99—37, G 195—19 и G 99—47 есть $M_V \approx 13^m 8$. В [41] найдено, что магнитные БК, за исключением разве что G 195—19, обладают весьма малыми пространственными скоростями и, возможно, относятся к сравнительно молодому населению дисковой составляющей (населению I).

Спектры этих четырех звезд либо чисто непрерывные, либо показывают столь широкие и узкие спектральные полосы или линии, что их подчас можно изучать только по фотоэлектрическим спектральным сканам. Отождествить эти полосы, естественно, очень трудно, поэтому уверенное отождествление сделано только для G 99—37, у которого такие полосы видны наиболее отчетливо [16, 41]. Оказалось, что они принадлежат молекулам C_2 и CN. Для других звезд отождествления лишь предположительные (см. табл. 3). Никаких следов водородных линий у всех этих звезд не обнаруживается.

8. *Закономерности в поляризации.* Поляризация Grw + 70° 8247 изучалась в работах [30, 35, 46, 47], G 99—37 — в работах [33, 48], G 195—19 — в работах [31, 32, 49, 50], G 99—47 — в работе [34], GD 229 — в работах [88, 90].

На рис. 1 показаны измеренные с широкополосными фильтрами зависимости круговой поляризации от обратной длины волны для трех БК с постоянной или не сильно изменяющейся поляризацией. Их общей характерной особенностью является наличие экстремума в районе $\lambda 4300 \text{ \AA}$ ($1/\lambda = 2.33 \text{ мк}^{-1}$). В двух случаях в экстремальной точке наблюдается максимальная по абсолютной величине поляризация, в одном — минимальная. У G 195—19 с переменной поляризацией зависимость от длины волны пока известна довольно грубо, однако по крайней мере постоянная составляющая этой поляризации по абсолютной величине минимальна в сине-зеленой области и возрастает в красную часть спектра; знак поляризации отрицательный [49, 50].

У двух звезд, Grw + 70° 8247 [47] и G 99—37 [48], были выполнены спектрополяриметрические исследования с довольно высоким спектральным разрешением (до 40 \AA), которые выявили резкую спектральную структуру в зависимости поляризации от длины волны. Эта структура выражается в появлении резких сдвоенных пиков противоположно вращающейся поляризации, явно ассоциированных с наблюдаемыми полосами в спектрах. Величина этих пиков у Grw + 70° 8247

сравнима с поляризацией в непрерывном спектре, а у G 99—37 даже превосходит ее. У последней звезды, например, в области полосы СН около 4300 Å поляризация показывает резкое изменение от -3.8%

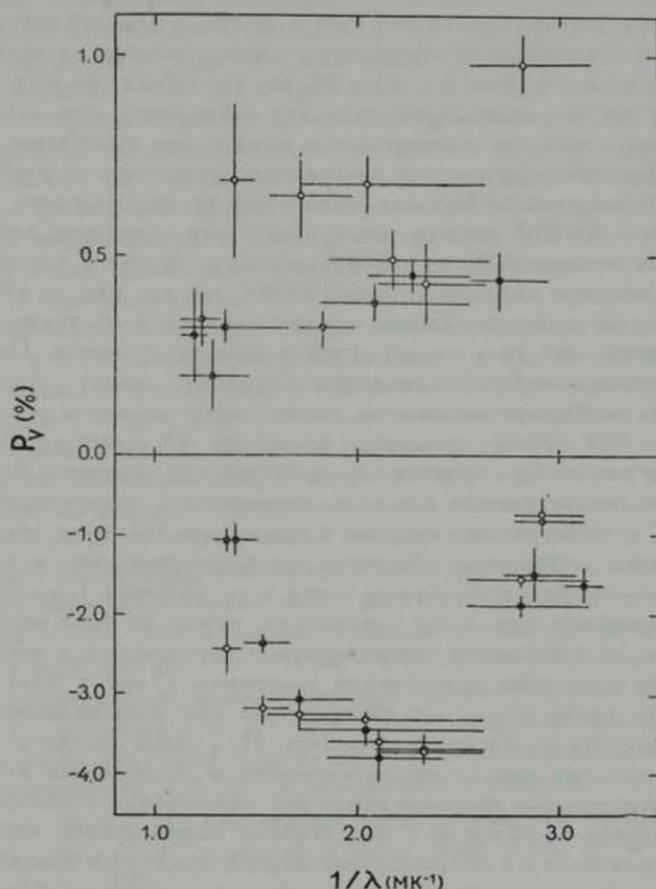


Рис. 1. Зависимость круговой поляризации от обратной длины волны у магнитных белых карликов. Вверху точки относятся к G 99—47, кружки — к G 99—37. Внизу наблюдения G 99—37 за 1970 (кружки) и 1971 (точки) годы. Данные взяты из работ, указанных в тексте. Масштаб по оси ординат в верхней и нижней частях рисунка различается в пять раз. По оси абсцисс ($1/\lambda$) выражена в μm^{-1} .

на λ 4220 Å до $+2.8\%$ на λ 4380 Å при средней широкополосной поляризации в этой области около $+0.43\%$. В [42, 48] такую структуру в поляризации предлагается интерпретировать как эффект Зеемана в

молекулярных полосах. Следует подчеркнуть, что пики поляризации обнаруживаются практически около всех, даже весьма слабых спектральных полос.

Кемп и Сведлунд [46] на 200"-телескопе предприняли попытку измерить круговую поляризацию у Grw + 70° 8247 в ближней инфракрасной области и неожиданно обнаружили очень большую ее величину: $-8.5 \pm 3\%$ на $\lambda = 1.15 \mu\text{к}$ и $-15 \pm 2\%$ на $\lambda = 1.25 \mu\text{к}$, то есть с тем же знаком, что и в видимой области. Эти наблюдения пока являются уникальными и требуют подтверждения, прежде чем заключение о реальности большой инфракрасной поляризации может быть окончательно принято. Наблюдения из [47] как будто этого не подтверждают.

У Grw + 70° 8247 найдена также постоянная во времени линейная поляризация с пиком 3.7% на $\lambda = 3800 \text{ \AA}$, которая спадает в ультрафиолетовую и красную стороны довольно резко, так что уже на $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ она полностью исчезает. Такой зависимости линейной поляризации от длины волны нет ни у одного другого небесного объекта. Направление поляризации с $\vartheta \approx 20^\circ$ от длины волны не зависит. Линейная поляризация $\sim 3\%$ имеется на всех длинах волн видимого диапазона в излучении GD 229. У остальных магнитных БК линейная поляризация, если она вообще существует, не превышает примерно 0.2%.

Важное значение имеет изучение переменности поляризации магнитных БК хотя бы потому, что, как и все звезды, БК могут вращаться, но изучать их вращение обычными спектроскопическими методами невозможно из-за большой ширины линий в их спектрах. Поскольку о периодах вращения этих звезд практически ничего не было известно, аппаратура для наблюдений поляризации конструировалась с заведомо достаточным временным разрешением (например, 11 сек у Энджела и Лэндстрита), чтобы обеспечить обследование всей области возможных периодов, начиная от предельно коротких. Ни у одной звезды из всех когда-либо наблюдавшихся с высоким временным разрешением не было найдено статистически значимых изменений поляризации в области коротких периодов от 22 сек до 3 час, поэтому можно думать, что многие БК, в том числе и с большой поляризацией, вращаются сравнительно медленно. Во всяком случае, очень быстрое вращение в модели наклонного ротатора не является причиной отсутствия заметной поляризации у большей части наблюдавшихся с меньшим временным разрешением БК.

Более или менее выраженная переменность поляризации отмечена у четырех магнитных БК. Наиболее определенно она наблюдается у G 195—19 [49, 50], у которого имеются строго периодические изменения с периодом около 32 час, причем никаких других вариаций не найдено на шкале от 22 сек до почти двух лет. Небольшие $\sim 0.2\text{--}0.3\%$

изменения поляризации с характерным временем порядка дней, вероятно, присутствуют у G 99—37 на всех наблюдавшихся длинах волн [33]. У GD 229 [88] круговая поляризация переменна в более широких пределах, причем размах изменений увеличивается в сторону красных лучей, где поляризация становится знакопеременной. Временной масштаб переменности пока известен плохо [88, 90]. У Grw + 70° 8247 поляризация на $\lambda < 6000 \text{ \AA}$ в пределах ошибок постоянна, но в красной части спектра наблюдения, сделанные с интервалом около года, показали большие различия, довольно определенно указывающие на переменность (см. рис. 1). Менее точные, но лучше распределенные во времени наблюдения автора, сделанные в 1973 г., позволяют предположить, что изменения поляризации в красной спектральной области у этой звезды происходят с характерным временем порядка 15—20 дней. О переменности у G 99—47 пока ничего не известно. Пока не известно также, являются ли изменения поляризации у Grw + 70° 8247, GD 229 и G 99—37 периодическими. Однако ясно, что такие изменения происходят с характерными временами порядка дней и даже десятков дней. Если они действительно вызваны вращением этих звезд, а не какими-то иными причинами (например, орбитальным движением, если в действительности эти звезды двойные), то скорости вращения оказываются довольно медленными, $\sim 0.5 \text{ км сек}^{-1}$ для G 195—19.

Лучше всего переменность поляризации изучена у G 195—19. Круговая поляризация изменяется с периодом $1^d 3309$, стабильным по крайней мере на интервале около двух лет. В сине-зеленой области спектра $\lambda 3800\text{—}5400 \text{ \AA}$ колебания синусоидальны и хорошо представляются формулой $p_V(t) = -0.231 + 0.241 \sin(\omega t + \varphi)$, где p_V выражена в процентах, а фаза, соответствующая наиболее сильной поляризации -0.48% , приходится на J. D. 2440979.071. В красной спектральной области форма колебаний заметно отличается от синусоидальной, кривая $p_V(t)$ оказывается довольно асимметричной и смещенной по фазе относительно кривой для сине-зеленой области так, что наиболее сильная поляризация теперь достигается около фазы 0.65, то есть фазовый сдвиг $\Delta\varphi \approx -120^\circ$.

Амплитуда переменной составляющей слабо зависит от длины волны и примерно одинакова во всех фильтрах, но величина постоянной составляющей заметно возрастает в длинноволновую сторону: в полосе $\lambda 6000\text{—}7000 \text{ \AA}$ она примерно вдвое больше, чем в полосе $\lambda 3800\text{—}5400 \text{ \AA}$ и достигает -0.9% в полосе $\lambda 6000\text{—}8800 \text{ \AA}$. Знак поляризации практически не изменяется и остается отрицательным на всех фазах. При наличии таких особенностей общая зависимость круговой поляризации от длины волны у G 195—19, естественно, сильно

изменяется с фазой от почти плоской до весьма круто возрастающей с ростом λ . Никаких сопутствующих изменений в блеске, цвете или спектре пока не отмечалось, но следует иметь в виду, что необходимых наблюдений фактически еще не сделано.

9. *Интерпретация круговой поляризации.* Сейчас общепринято связывать наблюдаемую круговую поляризацию БК с магнитными полями $\sim 10^6 - 10^7$ га, хотя такая связь, вообще говоря, строго не доказана и в принципе могли бы существовать какие-то другие причины возникновения поляризации. Единственное, что требуется для ее появления, это определенная анизотропия той среды, через которую распространяется излучение [1, 57, 58], и магнитное поле представляется лишь одной из возможных причин такой анизотропии, правда, наиболее вероятной. В поддержку общепринятой точки зрения можно привести следующие соображения: 1) какую-то иную практически приемлемую причину анизотропии, кроме магнитного поля, не просто допустить; 2) большие магнитные поля у БК ожидаются из самых общих представлений об эволюции звезд и их отсутствие так же требует объяснения, как и присутствие; 3) найденная у Grw + 70° 8247 и G 99 - 37 спектральная структура поляризации напоминает эффект Зеемана в сильном магнитном поле. Это довольно сильные аргументы, поэтому магнитное поле, как причина круговой поляризации, должно рассматриваться в первую очередь до тех пор, пока не будут получены убедительные доказательства несостоятельности такого подхода. Кстати, по этой причине во многих работах и в данной статье, в частности, термины „БК с круговой поляризацией“ и „магнитный БК“ употребляются как синонимы. Если БК обладает сильным магнитным полем, его атмосфера будет представлять собою горячую магнитоактивную плазму. Такая плазма является анизотропной, в ней электромагнитное излучение распространяется в виде нормальных волн двух типов — обыкновенной и необыкновенной — с различной эллиптической поляризацией [51]. Степень эллиптичности зависит от угла между направлением распространения излучения и направлением магнитного поля.

Для излучения, распространяющегося вдоль поля, нормальные волны полностью поляризованы по кругу, направление вращения электрического вектора необыкновенной волны совпадает с направлением вращения электрона в магнитном поле, для обыкновенной волны вращение происходит в противоположную сторону. Движущийся в магнитном поле электрон сильнее взаимодействует с необыкновенной волной, чем с обыкновенной, поэтому коэффициенты переноса излучения в магнитоактивной плазме для этих волн оказываются различными

появляется круговой дихроизм среды. Например, коэффициенты тормозного поглощения электрона в присутствии магнитного поля будут [51, 63]: $k_{об} = kv^2/(v + \nu_H)^2$, $k_{необ} = kv^2/(v - \nu_H)^2$, где k — коэффициент без поля, $\nu_H = eH/2\pi m$, c — циклотронная частота электрона, а ν — частота, на которой выполняется наблюдение. Как видно, в районе $\nu = \nu_H$ в коэффициенте поглощения необыкновенной волны появляется сильный резонанс. Аналогичное поведение присуще и сечению томсоновского рассеяния.

При наблюдениях в видимом диапазоне $\nu \gg \nu_H$, если $H \leq 10^7$ гс. В этом случае коэффициенты тормозного поглощения отличаются друг от друга на малую величину $\sim 4\nu_H/\nu$, но и этого различия достаточно для появления небольшой $\sim 2\nu_H/\nu$ круговой поляризации. Для оптически толстой атмосферы БК волна с меньшим коэффициентом поглощения эффективно выходит из более глубоких слоев и соответствующий ей поток излучения будет превышать поток излучения с противоположным состоянием поляризации, так как поток обычно возрастает вглубь звезды. В суммарном потоке F , выходящем из данной точки диска звезды, появляется круговая поляризация со степенью [63]

$$p_V = \frac{F_{об} - F_{необ}}{F_{об} + F_{необ}} \sim \left(\frac{dF}{d\nu} \right)_{\nu=0} \frac{\bar{k}}{k_v} \frac{\nu_H}{\nu} \cos \theta,$$

где k_v — полный коэффициент поглощения (включая свободно-связанные переходы и рассеяние) без учета магнитного поля, \bar{k} — усредненный по частотам и состояниям поляризации коэффициент поглощения, θ — угол между направлением магнитного поля и лучом зрения наблюдателя. Линейная поляризация должна быть малой величиной $\sim (\nu_H/\nu)^2$. Для вычисления поляризации излучения от всего диска звезды $F_{об}$ и $F_{необ}$ надо проинтегрировать по диску с учетом изменения величины и ориентации магнитного поля от точки к точке. Но если магнитное поле звезды достаточно регулярно и не сильно меняется по диску, оценки степени поляризации существенно не изменятся. При этом под H надо понимать некоторое усредненное по диску, эффективное магнитное поле, зависящее от конфигурации и ориентации истинного магнитного поля.

Уравнения переноса поляризованного излучения в магнитоактивной плазме для различных частных случаев были получены и решались в работах [52—56, 66]. Возможность появления круговой поляризации излучения такой плазмы в оптическом диапазоне рассматривалась в применении к астрофизическим объектам в работах [55, 57—59]. Влияние магнитного поля на непрозрачность среды для комптоновского рассеяния исследовалось в [60, 61], для синхротронного из-

лучения — в [62]. Различные поляризационные эффекты в излучении компактных тепловых источников с сильным магнитным полем рассмотрены Гнединым и Сюняевым [63].

В упомянутых ранее работах Кемпа и его сотрудников [28, 29, 52] по-существу рассматривались те же явления, но только в отношении коэффициентов излучения в специфической модели оптически тонкого теплового источника. Источник представлялся в виде совокупности независимых гармонических осцилляторов, собственные частоты которых распределены равномерно. В отсутствие магнитного поля такой источник полагается излучающим как серое тело с независимым от частоты коэффициентом поглощения. При наложении однородного магнитного поля появляется различие в излучении осцилляторов для левой и правой круговой поляризации. Это эквивалентно описанному выше различию в коэффициентах поглощения, так как в данной модели коэффициенты излучения и поглощения связаны по закону Кирхгофа-Планка, поэтому выводы Кемпа неизбежно должны были качественно совпасть с результатами других авторов, что и оказывается в действительности (с точностью до численных множителей порядка нескольких единиц). Что же касается модели излучателя в виде совокупности гармонических осцилляторов, то, с одной стороны, она, казалось бы, претендует на значительную общность, но, с другой стороны, не ясно, как ее увязать с обычно рассматриваемыми в астрофизике процессами излучения и поглощения. Кемп рассмотрел также влияние магнитного поля на свободно-свободные переходы и получил результаты, совпадающие с результатами других авторов.

Как только была надежно установлена зависимость поляризации от длины волны у первого магнитного БК [35], сразу же стало ясно, что она значительно более сложная, чем предсказанный Кемпом линейный рост p_V с λ в оптически тонком случае. Этого, вообще говоря, и следовало ожидать, если поляризация возникает в атмосфере БК, поскольку атмосферы БК никак нельзя считать оптически тонкими. Шипман [65] первый обратил внимание на это обстоятельство и приближенно рассчитал зависимость поляризации от длины волны для моделей оптически толстых атмосфер БК, используя результаты Кемпа для свободно-свободных переходов. Согласие с наблюдениями [35] значительно улучшилось, но все же остались заметные расхождения в ультрафиолетовой и красной областях спектра. Последующие наблюдения Grw + 70° 8247 [47] только усугубили эти расхождения. Похожую работу недавно опубликовали Коллинз и Бюргер [66].

Работа Шипмана стимулировала попытки улучшить предложенные Кемпом представления за счет учета некоторых квантово-механических

ких поправок и более точного математического решения сформулированной им задачи [67, 68], однако это не изменило ситуацию и в [69] авторы пришли к выводу, что наблюдаемые у Gw + 70° 8247 круговая и, в особенности, линейная поляризации не могут быть удовлетворительно объяснены на базе модели Кемпа и что необходим какой-то иной подход. В частности, в сильных магнитных полях энергетическая структура атомов и все вероятности переходов должны изменяться и именно с учетом этих особенностей авторы работы [69] связывают надежды на будущий успех. Но исследования в этом направлении только недавно начались [70—72, 87] и еще не дошли до стадии применения к наблюдениям.

Несколько иной путь объяснения поляризации излучения БК предложен в [85], где БК считается окруженным горячей ($T \sim 10^5 - 10^6$ К, $\rho \sim 10^4$ см $^{-3}$) оптически тонкой короной с магнитным полем $H \sim 10^9$ гс. Именно эта корона дает циркулярно поляризованное циклотронное излучение, которое накладывается на неполяризованное излучение фотосферы БК. Идея горячих корон у БК не нова, она выдвигалась в [86] совсем из других соображений и некоторые свидетельства в ее пользу, возможно, дают наблюдения линейной поляризации [40], так что сама по себе она достаточно правдоподобна. Однако требуемое в [85] магнитное поле представляется слишком большим: так как H изменяется с расстоянием r как r^{-n} , где $n = 3$ для дипольного поля, и если $R_{\text{корона}} \sim (2-5)R_{\text{БК}}$, то на поверхности БК было бы $H \sim 10^9$ гс. Реальность столь большого поля довольно сомнительна.

Надо заметить, что до сих пор основное внимание уделялось попыткам объяснить поляризацию и ее ход с длиной волны главным образом у одного из четырех магнитных БК — Gw + 70° 8247. Между тем, остальные звезды ставят не менее интересные проблемы. Например, почему у одних звезд степень круговой поляризации, без учета знака, вблизи $\lambda 4300$ А имеет максимум, а у других — минимум? Почему большая линейная поляризация наблюдается только у одного БК, а у других ее нет? Чем объясняется скачок фазы между изменениями поляризации в синих и красных лучах у G 195—19 и почему в красных лучах поляризационная кривая становится асимметричной? Действительно ли осевое вращение является причиной переменности поляризации у этой звезды?

Спектральная структура в поляризации, ассоциирующаяся с полосами поглощения в спектре, представляет особый интерес. В [42, 48] она интерпретируется как эффект Зеемана в молекулярных полосах, причем в случае Gw + 70° 8247, где природа полос не ясна, Энджел [42] выдвинул предположение, что по крайней мере некоторые

из наблюдаемых в спектре этой звезды неотжествленных „полос Минковского“ принадлежат молекуле гелия He_2 . По мнению Энджела, этот же эффект Зеемана в других, еще более размытых и ненаблюдаемых полосах мог бы быть причиной поляризации и в континууме, если эффективное поле $H \sim 5 \cdot 10^6$ гс. Тем самым выдвигается некоторая альтернатива подходу, основанному на работах Кемпа. Эта альтернатива кажется еще более правдоподобной после спектрополяриметрических наблюдений G 99—37 [48], у которого поляризация в наиболее сильной полосе молекулы CN оказалась намного больше, чем в континууме. Возможная причина появления остаточной поляризации при наблюдениях с широкополосными фильтрами могла бы остаться прежней — противоположно поляризованные зеемановские σ -компоненты эффективно выходят с различных глубин атмосферы, а потому соответствующие им световые потоки не равны. Эта возможность недавно рассматривалась более подробно Павловым [74], в частности, применительно к водородным линиям в БК спектрального класса DA.

Предложенная Энджелом идентификация „полос Минковского“ с полосами He_2 впоследствии была поставлена под сомнение в [73], где из моделей атмосфер было найдено, что для образования достаточного количества молекул He_2 в атмосфере Grw + 70° 8247 должно быть необычно мало водорода и металлов, а эффективная температура должна быть меньше наблюдаемой.

Таким образом, приходится констатировать, что удовлетворительного объяснения поляризации БК еще не существует, а потому наблюдательные данные нельзя использовать для точного определения величины их магнитных полей. Грубые же оценки, сделанные во многих цитированных выше работах и основанные на изложенных в этом разделе общих соображениях о возможной физике явления, довольно единодушно указывают диапазон $10^6 - 10^7$ гс как наиболее вероятный, и именно такого порядка поля обычно имеют в виду в теоретических работах по магнитным БК.

10. *Происхождение магнитных полей белых карликов.* Как только признается, что наблюдаемая поляризация обусловлена магнитным полем, так сразу же возникает естественный вопрос о происхождении этого поля. Точнее говоря, требуется объяснить, почему у одних БК наблюдается большое магнитное поле, тогда как у других, которых большинство, оно не наблюдается. Конечно, конфигурация магнитных полей и их ориентация могут сказаться на наблюдаемой статистике в сторону уменьшения числа звезд с большой поляризацией, однако отнести весь дефицит магнитных БК за этот счет, очевидно, нельзя.

Авторы посвященных этому вопросу работ [75, 76] видят основную проблему в том, что до сих пор ни у одного DA карлика не было найдено заметной поляризации, тогда как 10% звезд с пекулярными и DC спектрами показали довольно большую поляризацию. Такая постановка вопроса имеет очевидную слабость, выражающуюся в излишне буквальном понимании текущих наблюдательных данных, о чем уже подробно говорилось в разделах 3 и 6. Вероятно, лучше было бы исходить из более надежно установленного сейчас факта сравнительной редкости магнитных BK вообще, без дифференциации по спектральным классам.

В настоящее время о происхождении и эволюции BK почти ничего достоверно не известно. Во-первых, не ясны эволюционные пути, по которым звезды приходят в стадию BK. Принято считать, что BK это бывшие ядра красных гигантов, состоящие в основном из элементов тяжелее водорода, поскольку водород выгорел в ходе предшествующей эволюции. Довольно распространена также версия (см., например, [82]), согласно которой красный гигант попадает в область BK после сброса значительной доли массы через стадию планетарных туманностей, хотя, например, в [9] приводится случай возможного непосредственного образования BK из красного гиганта по почти вертикальному эволюционному треку. Во-вторых, не ясно, что происходит со звездой, уже попавшей в область BK, то есть насколько правильно рассматривать наблюдаемые последовательности BK на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, как последовательности постепенно остывающих вырожденных звезд, эволюционирующих в сторону меньших температур и светимостей? Происходит ли заселение этих последовательностей только с высокотемпературного конца или же вновь образовавшийся BK может попасть в любое место наблюдаемых последовательностей? Например, только что упомянутый случай из [9] как-будто говорит в пользу образования уже довольно холодного BK и свидетельствует против чисто эволюционной трактовки наблюдаемых последовательностей.

По этим проблемам существует обширная литература, которая выходит за рамки обсуждаемого здесь вопроса, однако сами эти проблемы не безразличны для понимания происхождения магнитных BK, которые в основном довольно холодные и имеют тенденцию располагаться ближе к правому нижнему концу упомянутых последовательностей. Если эти последовательности эволюционные, тогда магнитные BK должны считаться сравнительно старыми звездами и надо объяснить, либо почему не все подобные звезды сохраняют свое магнитное поле в процессе эволюции, либо, если большого поля не было с

самого начала, почему у некоторых звезд оно через какое-то время генерируется. Если же эти последовательности не имеют строгого эволюционного смысла, тогда редко встречающиеся магнитные БК могут быть звездами несколько иной судьбы и происхождения, чем остальные „немагнитные“ БК, и разгадка происхождения их магнитных полей может скрываться в свойствах их прародителей.

Любая схема эволюции БК должна объяснить разделение спектров БК на водородные (DA) и гелиевые (DB). Для этого в [78, 79] были предложены две гипотезы. Гипотеза В допускает существенные изначальные различия основных свойств звезд классов DA, DB, DC, тем самым фактически отрицая возможность эволюционных переходов между этими классами. Альтернативная ей гипотеза А рассматривает все БК, как члены единой эволюционной последовательности. Эта гипотеза позднее была модифицирована в [9, 80] с учетом более современных наблюдательных данных.

Согласно гипотезе А, вновь образовавшийся горячий БК попадает на левый верхний конец последовательности температура—светимость, причем у него либо уже имеется некоторая водородная атмосфера, оставшаяся от предшествующих фаз эволюции [80], либо он ее сравнительно быстро приобретает путем аккреции водорода из межзвездной среды [9, 78, 79]. После этого он охлаждается, имея спектр DA. Чтобы у него развился спектр DB, необходимо уничтожить тонкую водородную атмосферу, например, путем ее перемешивания с веществом внутренних слоев, содержащим гелий и более тяжелые элементы. Для этого предполагается, что у некоторых БК, остывших до определенной температуры, может развиваться конвекция, захватывающая достаточно глубокие слои звезды. Если такая конвекция появилась и не прекращается далее, БК становится звездой DB с температурой от ~ 19000 до $\sim 11000^\circ$ К. При температурах ниже 11000° К линии гелия перестают возбуждаться и образуется спектр DC, лишенный спектральных линий. Если же конвекция не развилась, или развилась, но недостаточно глубокая, БК остается звездой DA. Так в рамках этой гипотезы объясняется, почему звезды DA наблюдаются практически при всех возможных температурах, тогда как DB встречаются лишь в узком интервале температур, а DC карлики всегда холоднее, чем DB.

Гипотеза А в целом неплохо согласуется с имеющимися наблюдательными данными, хотя и встречает иногда возражения (см., например, [81]), однако магнитные БК в нее не укладываются. Во-первых, отсутствие больших магнитных полей у большинства БК, в том числе и у более молодых с точки зрения этой гипотезы, чем магнитные БК, нельзя объяснить затуханием поля за времена короче времени эволюции типичной DA звезды. Более точные, чем в [20], расчеты [75—77]

показали, что характерные времена затухания низких мод поля никак не меньше, чем $\sim 10^9$ лет, поэтому поле, если оно было с самого начала, не могло исчезнуть. Имеется, правда, возможность, что большое поле существует внутри звезды, но исчезает на поверхности. Для этого поле должно быть чисто тороидальным, однако образование такой специфической конфигурации и ее сохранение в течение длительного срока авторы работ [75, 76] считают маловероятным. Во-вторых, в [76] показано, что при полях $H \gtrsim 10^4 - 10^5$ гс конвекция в БК существовать вообще не может, поскольку плотность магнитной энергии становится больше плотности кинетической энергии конвективного движения и поле остановит конвекцию. Тем самым исключается возможность генерации поля $\sim 10^9 - 10^{10}$ гс через некоторое время после формирования немагнитного БК, так как подходящие динамо-процессы требуют конвекции, а она не способна породить поля такой величины [76]. По той же причине должно быть исключено высказанное в [41] предположение, что в магнитных БК большое поле существует внутри звезды и выносится наружу конвекцией вместе с тяжелыми элементами, такими, как гелий и углерод.

Таким образом, представляется вероятным, что магнитные БК не проходили через гипотетическую эволюционную последовательность DA—DB—DC, а являются сравнительно молодыми, недавно сформировавшимися объектами [76], на что указывают также и их пространственные скорости [41]. Их большие магнитные поля тогда следует рассматривать как реликтовые, сохранившиеся от их прародительских звезд. Авторы [76], например, склоняются к мнению, что магнитные БК недавно сформировались из ядер планетарных туманностей, в которых большое внутреннее магнитное поле вскрылось после сброса небулярной оболочки. В связи с этим предположением интересно напомнить, что возможность присутствия магнитных полей в планетарных туманностях рассматривалась Гурзядяном еще в книге [83]. Если это предположение правильно, некоторые ядра планетарных туманностей могут иметь поля $\sim 10^4 - 10^5$ гс, что может быть обнаружимо вблизи предела точности поляризационных наблюдений. Имеющиеся сейчас отдельные наблюдения таких объектов [36, 38, 84] пока этого не подтверждают.

Автор благодарен Е. Н. Копанькой за помощь в работе по составлению данного обзора, Г. Г. Павлову и Ю. Н. Гнедину за полезные обсуждения и критические замечания и Н. М. Шаховскому за информацию о работе [40].

MAGNETIC FIELDS IN WHITE DWARFS

O. S. SHULOV

The review regards questions such as quadratic Zeeman effect, circular polarization in spectral lines and in continuum, and the interpretation of the effects in terms of magnetic fields in white dwarfs. Table 1 summarizes the observations of circular polarization in white dwarfs published at the end of 1973. The origin of magnetic fields in white dwarfs is also considered in general.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. Н. Саонов, УФН, 108, 583, 1972.
2. W. J. Luyten, *Vistas in Astronomy*, ed. A Beer, 2, Pergamon Press, N-Y, 1956, p. 1048.
3. J. L. Greenstein, *Handbuch der Physik*, ed. S. Flügge, 50, Springer, Berlin, 1958, p. 161.
4. J. L. Greenstein, *Stars and Stellar Systems*, 6, ed. J. L. Greenstein, Univ. of Chicago, 1960, p. 676 (русск. пер.: Звездные атмосферы, под ред. В. В. Соболева, ИЛ, М., 1963, стр. 679).
5. W. J. Luyten, *Adv. Astr. Astrophys.*, ed. Z. Kopal, 2, Academic Press, N-Y, 1963, p. 199.
6. J. L. Greenstein, *Stars and Stellar Systems*, 5, ed. M. Schmidt, Univ. of Chicago Press, Chicago, 1965, p. 361.
7. W. Weidemann, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, 6, 351, 1968.
8. W. J. Luyten (ed.), *White Dwarfs*, IAU Symp. No. 42, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1971.
9. H. L. Shipman, *Ap. J.*, 177, 723, 1972.
10. W. J. Luyten, *White Dwarfs*, Univ. of Minnesota Press, Minneapolis, 1970.
11. В. А. Амбарцумян, Г. А. Шайн, *Астрон. ж.*, 13, 1, 1936; В. А. Амбарцумян, *Научные труды*, т. 1, Изд. АН АрмССР, Ереван, 1960, стр. 131.
12. M. L. Humason, F. Zwicky, *Ap. J.*, 105, 85, 1947.
13. O. J. Eggen, J. L. Greenstein, *Ap. J.*, 141, 83, 1965; 142, 925, 1965; 150, 927, 1967.
14. J. L. Greenstein, *Ap. J.*, 1, 58, 821, 1969.
15. J. L. Greenstein, *Comments on Astrophys. and Space Phys.*, 1, 62, 1969.
16. J. L. Greenstein, *Ap. J.*, 162, L55, 1970.
17. A. Severny, *Ap. J.*, 159 L73, 1970.
18. E. F. Borra, J. D. Landstreet, *Ap. J.*, 185, L139, 1973.
19. С. Б. Пикельнер, *Основны космической электродинамики*, Физматгиз, М., 1961, стр. 61.
20. А. Местел, в кн. „Внутреннее строение звезд“, под ред. А. Аллера и Д. Мак-Лафлина, пер. с англ. под ред. Д. А. Франк-Каменецкого, Мир, М., 1970, стр. 228.
21. G. W. Preston, *Ap. J.*, 160, L143, 1970.
22. J. L. Greenstein, V. L. Trimbl, *Ap. J.*, 149, 283, 1967.
23. V. Trimbl, *Nature Phys. Sci.*, 231, 124, 1971.

24. V. Trimbl, J. L. Greenstien, Ap. J., 177, 441, 1972.
25. W. L. Wiese, D. E. Kelleher, Ap. J., 166, L59, 1971.
26. E. F. Borra, Ap. J., 183, 587, 1973.
27. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Ap. J., 160, L147, 1970.
28. J. C. Kemp, Ap. J., 162, 169, 1970.
29. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, B. D. Evans, Phys. Rev. Lett., 24, 1211, 1970.
30. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, J. D. Landstreet, J. R. P. Angel, Ap. J., 161, L77, 1970.
31. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Ap. J., 164, L15, 1971.
32. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, R. D. Wolstencroft, Ap. J., 164, L17, 1971.
33. J. D. Landstreet, J. R. P. Angel, Ap. J., 165, L67, 1971.
34. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Ap. J., 178, L21, 1972.
35. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Ap. J., 162, L61, 1970.
36. О. С. Шулов, Е. Т. Белоконов, Астрофизика, 8, 343, 1972.
37. A. Rich, W. L. Villams, Ap. J., 180, L123, 1973.
38. N. S. Nikulin, V. M. Kuvshinov, A. B. Severny, Ap. J., 170, L53, 1971.
39. О. С. Шулов, Е. Н. Конацкая, Астрон. цирк., № 810, 1, 1974; Астрофизика, 10, 117, 1974.
40. Ю. С. Ефимов, Н. М. Шаховской, Изв. КрАО, 50, 68, 1974.
41. J. L. Greenstein, J. E. Gunn, J. Kristian, Ap. J., 169, L63, 1971.
42. J. R. P. Angel, Ap. J., 171, L71, 1972.
43. W. F. van Altena, Ap. J., 165, L77, 1971.
44. V. A. Hughes, P. A. Feldman, A. Woodsworth, Ap. J., 170, L125, 1971.
45. R. D. Ekers, Astron. Astrophys., 22, 309, 1973.
46. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, Ap. J., 162, L67, 1970.
47. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, J. B. Oke, Ap. J., 171, L11, 1972.
48. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Bull. Am. Astron. Soc., 4, 409, 1972.
49. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Ap. J., 165, L71, 1971.
50. J. R. P. Angel, P. M. E. Illing, J. D. Landstreet, Ap. J., 175, L85, 1972.
51. В. А. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, Наука, М., 1967.
52. V. V. Zheleznyakov, Astrophys. Space Sci., 2, 403, 1968.
53. В. Н. Сапоков, В. Н. Цытович, Радиофизика, 11, 1287, 1968.
54. D. B. Melrose, Astrophys. Space Sci., 12, 172, 1971.
55. Ю. Н. Гнедин, Г. Г. Павлов, ЖЭТФ, 65, 1806, 1973.
56. В. В. Железняков, Е. В. Суворов, В. Е. Шапошников, Астрон. ж., 51, 243, 1974.
57. Ю. Н. Гнедин, А. Э. Долиннов, Н. А. Силантьев, Астрон. ж., 49, 689, 1972.
58. Н. А. Силантьев, Автореферат диссертации, ЛФТИ им А. Ф. Иоффе, Ленинград, 1971.
59. A. Z. Dolginov, Yu. N. Gnedin, N. A. Silant'ev, Astrophys. Lett., 13, 85, 1973.
60. V. Canuto, Ap. J., 160, L153, 1970.
61. V. Canuto, J. Lodenquist, M. Ruderman, Phys. Rev., D3, 2303, 1971.
62. A. G. Pacholczyk, T. L. Swihart, Ap. J., 150, 647, 1967; 170, 405, 1971.
63. Ю. Н. Гнедин, Р. А. Сюняев, Препринт № 92, ИПМ АН СССР, 1973.
64. J. C. Kemp, Ap. J., 162, L59, 1970.
65. H. L. Shipman, Ap. J., 167, 165, 1971.
66. G. W. Collins, P. F. Buerger, Ap. J., 197, 163, 1974.
67. G. Chantugat, R. F. O'Connell, A. K. Rajagopal, Ap. J., 175, 157, 1972.
68. G. Chantugat, R. F. O'Connell, A. K. Rajagopal, Ap. J., 177, 719, 1972.
69. K. M. Roussel, R. F. O'Connell, Ap. J., 182, 277, 1973.

70. A. K. Rajagopal, G. Chanmugam, R. F. O'Connell, G. L. Surmelian, Ap. J., 177, 713, 1972.
71. E. R. Smith, R. J. W. Henry, G. L. Surmelian, R. F. O'Connell, Ap. J., 179.
72. Г. Г. Павлов, Астрон. ж., 50, 320, 1973.
73. D. T. Wickramasinghe, R. I. Thompson, P. A. Strittmatter, Ap. J., 178, 763, 1972.
74. Г. Г. Павлов, Астрофизика, 11, 75, 1975.
75. G. Chanmugam, M. Gabriel, Astron. Astrophys., 16, 149, 1972.
76. G. Fontaine, J. H. Thomas, H. M. VanHorn, Ap. J., 184, 911, 1973.
77. G. Chanmugam, M. Gabriel, Ap. J., 182, 915, 1973.
78. P. A. Strittmatter, D. T. Wickramasinghe, White Dwarfs, IAU Symp. No. 42, ed. W. J. Luyten, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland, 1971, p. 116.
79. P. A. Strittmatter, D. T. Wickramasinghe, M.N., 152, 47, 1971.
80. A. Baglin, G. Vauclair, Astron. Astrophys., 27, 207, 1973.
81. E. M. Ston, Ap. Lett., 14, 219, 1973.
82. О. Х. Гусейнов, Астрофизика, 9, 425, 1973.
83. Г. А. Гурзадян, Планетарные туманности, ГИФМЛ, М., 1962, стр. 289.
84. J. C. Kemp, R. D. Wolstencroft, J. B. Swedlund, Ap. J., 177, 177, 1972.
85. В. В. Черномордик, Астрон. цирку., №768, 1973.
86. P. A. Strittmatter, K. Brecher, G. R. Burbidge, Ap. J., 174, 91, 1972.
87. R. F. O'Connell, Ap. J., 187, 275, 1974.
88. J. B. Swedlund, R. D. Wolstencroft, J. J. Michalsky, J. C. Kemp, Ap. J., 187, L121, 1974.
89. H. L. Giclas, R. Burnham, N. G. Thomas, Lowell Obs. Bull., No. 125, 1965.
90. J. C. Kemp, G. V. Coyne, J. B. Swedlund, R. D. Wolstencroft, Ap. J., 189, L79, 1974.
91. L. Greenstein, Ap. J., 189, L131, 1974.
92. J. B. Oke, Ap. J., Suppl., 27, No. 236, 21, 1974.
93. A. Rich, W. L. Williams, Ap. J., 190, 117, 1974.
94. D. N. Brown, A. Rich, W. L. Williams, Ap. J., 191, L111, 1974.
95. J. D. Landstreet, R. P. Angel, Ap. J., 190, L 25, 1974.
96. J. L. Greenstein, M. Schmidt, L. Searle, Ap. J., 190, L27, 1974.
97. J. R. P. Angel, P. Hintzen, P. A. Strittmatter, P. G. Martin, Ap. J., 190, L71, 1974.
98. R. P. Angel, J. D. Landstreet, Ap. J., 191, 457, 1974.

Примечание при корректуре. После составления обзора были опубликованы работы [91—98], существенно дополняющие и отчасти изменяющие некоторые положения основного текста. Приводим их краткий комментарий в порядке следования разделов обзора.

Раздел 1: Гринштейн [91] довел до 336 число спектроскопически подтвержденных БК. Оук [92] опубликовал абсолютные распределения энергии в спектрах 38 БК в области λ 3200—10500 А, полученные методом фотоэлектрического сканирования.

Раздел 6: В [93, 94] сделаны поисковые наблюдения круговой поляризации еще у 16 БК с отрицательным результатом, в том числе не подтверждена заподозренная ранее поляризация у EG 11 и EG 165. Найден еще один БК с круговой и линейной поляризацией — G 240—72 = LP 44—113 [97].

Раздел 7: В [91, 96] GD 229 спектроскопически подтвержден как БК с широкими абсорбционными полосами. Вероятно, он горячий молодой БК населения I. Новый магнитный БК G 240—72 имеет спектральный класс DC, температуру 7000° и $V = 14^m 12$ [97].

Раздел 8: Новые наблюдения GD 229 [95] не подтвердили переменность его круговой поляризации и выявили спектральную структуру с резко обозначенными пиками в $p_V(\lambda)$. Зависимость $p_V(\lambda)$ у G 240—72 оказалась весьма необычной с двукратной переменной знака поляризации в видимой области [97].

Раздел 9: В [98] сделано прямое определение величины магнитного поля у G 99—37 по эффекту Зеемана в циркулярно поляризованном излучении в полосе молекулы в СН на λ 4300 А и получено $H \approx 3.6 \cdot 10^6$ га.

Раздел 10: Найдена статистически значимая небольшая круговая поляризация у ядра планетарной туманности He 2—13 [93].

СВОДКА ПОИСКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

EG, GR	Звезда	V	B-V	U-B	Sp	$p_V \pm \sigma$ (%)	Фильтр	Ссылка	Примечания	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
			Звезды без поляризации							
5	VMa 2	12.36	+0.56	+0.04	DG	-0.03 ± 0.07		37		
9	W 1516	13.88	+0.11	-0.80	DC	-0.12 0.10		35		
10	R 548	14.10	+0.20	-0.54	(DA)	-0.05 0.09		33	Блеск переменный	
15	Oxf-25 6725	13.22	-0.04	-0.85	(DA)	+0.24 0.56				
						+0.38 0.24	C			
						-0.04 0.27	K			
19	F 22	12.65	-0.06	-0.83	DA	-0.16 0.10		35		
						+0.57 0.50	H ₁	27		
20	F 24	12.25	-0.23	-1.25	DAwke	-0.12 0.09		37		
						-0.28 0.36	C	36		
21a	LB 3303	11.2			(DA)	-0.06 0.07		37		
22	L 587-77A	14.0			DA _s	+0.13 0.11		37		
24	W 219	15.20	+0.30	-0.52	λ4670	-0.06 0.10		33		
31	HZ 2	13.86	-0.05	-0.88	DA	-0.46 0.39				
33	40 Eri B	9.52	+0.33	-0.68	DA	+0.04 0.05		33		
						+0.15 0.04	H ₁	27		
40	G 39-27	15.94	+0.65	-0.06	DC	+0.21 0.15		33		
41	L 879-14	14.10	+0.14	-0.65	λ4670	+0.05 0.11		37		
42	HZ 14	13.83	-0.15	-1.04	DA _n	+0.45 0.39				
46	L 1244-26	13.40	-0.15	-0.98	DA	+0.23 0.38				
50	He 3	12.10	-0.08	-0.92	DA _n	-0.23 ± 0.15	C	36		

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
						$+0.23 \pm 0.18$	К	36	
52	G 107—70	14.62	+0.99	+0.40	DC	+0.03 0.10		33	
54	L 745—46A	12.98	+0.29	-0.61	DF	-0.02 0.08		37	
62	L 532—81	12.0			DA, F ₅₇ ?	+0.01 0.05		37	
70	L 852—14	12.97	-0.15	-1.02	DAn	+0.18 0.11		37	
71	F 34	11.20	-0.30	-1.35	DO:?	-0.12 0.06			
72	G 44—32	16.55	+0.29	-0.58	DC	-0.05 0.12		33	Блеск переменный
78	L 971—14	15.30	+0.09	-0.76	DC?	+0.05 0.17		33	
81	F 46	13.24	-0.30	-1.13	DO—B	+0.07 0.05		33	
82	L 145—141	11.44	+0.19	-0.59	4670	-0.01 0.10		37	
85	L 1261—24	15.54	+0.30	-0.60	DC:	-0.02 0.10		35	
87	C 1	13.34	+0.54	-0.48	(DA)	-0.26 0.23			
95	W 457	15.90	+0.64	-0.09	DC	+0.07 0.11		35	
99	W 485 A	12.30	+0.08	-0.61	DA	+0.21 0.10		35	
						-0.36 0.21	H _T	27	
102	Grw + 70 5824	12.79	-0.09	-0.84	DA	+0.05 0.23	С	36	
						-0.31 0.22	К	36	
118	L 770—3	12.40	-0.25	-1.02	DAwk	-0.80 0.37	H _T	27	
122	L 845—70	14.30	+0.02	-0.68	DC?	-0.03 0.07		35	
135	L 997—21	13.69	+0.25	-0.60	DA _s	-0.47 0.47			
138	G 24—9	15.79	+0.40	-0.44	DC?	+0.12 0.09		35	
139	W 1346	11.54	-0.07	-0.87	DA	-0.14 0.10		38	
						-0.06 \pm 0.08	H _T	27	

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
141	L 711-10	12.00			DA	-0.13±0.26	H _T	27	
142	L 24-52	13.50	+0.27	-0.59	(DA)	+0.08 0.10		37	
144	Grw+73 8031	12.88	+0.01	-0.66	DA	-0.24 0.44	C	36	
						-0.09 0.15	K	36	
						-0.20 0.26	H _T	27	
147	Grw+82 3818	13.02	-0.02	-0.72	DA	+0.46 0.57	C	36	
						+0.01 0.37	K	36	
148	L 1363-3	13.23	+0.17	-0.72	DC	+0.01 0.04		35	
157	F 108	12.90	-0.28	-1.06	DA _s :	+0.34 0.24	H _T	27	
158	F 110	11.50	-0.30	-1.20	DO _p	-0.04 0.07		37	
						-0.04 0.30	C	36	
						-0.14 0.14	K	36	
159	G 29-38	13.10	+0.20	-0.65	DA	0			Блеск переменный
162	G 1512-34B	12.90	+0.15	-0.61	DA	-0.05 0.10	C	36	
						-0.03 0.04	K	36	
						-0.11 0.18	H _T	27	
169	G 83-10	15.7			DC	-0.03 0.11		33	
180	G 175-34B	12.45	+0.33	-0.49	DC	+0.12 0.13		33	
182	G 47-18	15.18	0.00	-0.89	4670 _p	-0.04 0.08		33	
184	GD 140	12.50	-0.06	-0.98	DA _{wk}	+0.29 0.16			
193	GD 190	14.72	-0.10	-1.00	DB _s	+0.14 0.10		33	
197	G 169-34	14.08	+0.24	-0.62	DA _{ss}	-0.03 0.39			
201	GD 219	13.01	+0.06	-0.66	DA _n	-0.05±0.13			

1	2	3	4	5	6
204	GD 8	14.0	-0.22	-1.20	DAwk
207	GD 31	14.0	+0.21	-0.68	DA
210	GD 71	13.0	-0.25	-1.16	DAwk
215	GD 84		+0.08	-0.79	DC
216	GD 85		-0.11	-0.99	DBs
233	GD 246	12.5	-0.32	-1.23	DAwk
235	GD 323				DBp
245	G 218-8	14.1			DC
247	G 191-B2B	11.8	-0.32	-1.20	DAwk
251	G 195-42	15.3			DC
252	G 42-33	15.37	+0.32	-0.49	DC
262	G 187-15	15.5			DC
267	F 7	14.5	-0.3		DC
269	GD 279	13.0			DAsp

Таблица 1 (продолжение)

7	8	9	10
+0.18±0.97	С К		
+0.45 0.37			
+0.13 0.32			
+0.03 0.10			33
+0.07 0.10			33
-0.11 0.19			
-0.19 0.20			
+0.04 0.44			
+0.06 0.09			33
+0.10 0.08			33
+0.02 0.04			33
+0.09 0.10			33
-0.02 0.11			33
-0.06 0.10			33
+0.08 0.11		33	
+0.07±0.18			

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Звезды с заподозренной поляризацией									
11	L 870-2	12.84	+0.34	-0.50	DAs	-0.23 ± 0.06		37	
55	NGC 2477-116	13.66	-0.13	-0.95		+0.40 0.10		37	
131	LDS 678A	12.24	+0.07	-0.84	DAwk	-0.24 0.11			
						-0.19 0.21	С К		
						-0.19 0.25			
165	L 362-81	13.05	+0.07	-0.87	(DAs)	-0.17 0.07		37	
208	GD 45	13.0	+0.08	-0.68	DAs	+0.94 0.39			X-XI. 1973 г.
						-0.69 ± 0.32			I-II. 1974 г.
Звезды с уверенной поляризацией									
129	Grw +70°8247	13.19	+0.05	-0.85	λ 4135p	-3.29 ± 0.08		35	
248	G 99-37	14.58	+0.46	-0.53	λ 4670p	+0.68 0.08		33	Среднее из нескольких наблюдений
250	G 195-19	13.79	+0.30	-0.66	DC	-0.42 0.04		31	Поляризация переменна с периодом ~32 час
289	G 99-47	14.12	+0.62	-0.12	DC	+0.44 0.04		34	
	GD 229	14.5:				-1.3 ± 0.2		88	Поляризация переменна на шкале ~1 дн