АСТРОФИЗИКА

ТОМ 44 АВГУСТ, 2001 ВЫПУСК 3

УДК: 524.31.084

СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ УНИКАЛЬНОГО БЕЛОГО КАРЛИКА GD 356 НА БТА-6м

Ю.Н.ГНЕДИН[1], Н.В.БОРИСОВ[2], Т.М.НАЦВЛИШВИЛИ[1], М.Ю.ПИОТРОВИЧ[3]

Поступила 12 января 2001
Принята к печати 20 апреля 2001

Представлены результаты спектрополяриметрических наблюдений уникального магнитного белого карлика с эмиссионными линиями GD 356, выполненных на БТА-6м. Оценена величина магнитного поля звезды и показано отсутствие ее вращения на интервалах времени ≥ 5 лет. Учет магнитной деформации поверхности звезды, приводящей к неоднородному распределению температуры по ее поверхности, позволил показать, что в области магнитных полюсов могут выполняться условия «радиационного дискона» в виде плазменной струи, возникающей в результате действия давления циклотронного излучения. Показано, что эффект неоднородности распределения поверхностной температуры белого карлика может вызвать заметную широкополосную и резонансную поляризацию излучения звезды.

1. *Введение*. GD 356 (LP 137-43, Gr 329, WD 1639+537) является уникальным белым карликом (БК), обладающим сильным магнитным полем. Его уникальность состоит в том, что спектр показывает четкие зеемановские триплеты линий H_α и H_β не в поглощении, как у всех известных одиночных магнитных белых карликов, а в эмиссии. Этот факт может свидетельствовать о наличии у данного БК хромосферы или даже горячей короны, причем природа инверсии температуры, требуемой в данной ситуации, остается до сих пор невыясненной. Это единственный изолированный магнитный БК, показывающий эмиссионные линии.

Эмиссионные H_α и H_β линии GD 356 были открыты Гринстейном и МакКарти [1]. Они же установили, что распределение энергии излучения поверхности белого карлика хорошо описывается функцией Планка с эффективной температурой $T_e = 7500$K в приближении чисто водородной атмосферы. Эмиссионные H_α и H_β линии образуют зеемановские триплеты, по которым Гринстейн и МакКарти оценили примерную величину магнитного поля в области образования эмиссионных линий как ~ 11 МГс. Более детальное моделирование профилей линий триплетов показало, что их объяснение требует довольно необычной геометрии магнитного поля: высокой степени однородности с необычно малой (~ 1.1 МГс) дисперсией. Поэтому Гринстейн и МакКарти предположили, что эмиссионные линии возникают в области довольно однородного магнитного поля, а не в области всей фотосферы.

Феррарио и др. [2] представили результаты новых спектрополяриметрических наблюдений GD 356. Проведенное ими моделирование профилей эмиссионных линий подтвердило точку зрения Гринстейна и МакКарти. Оказалось, что магнитное поле в области образования эмиссионных линий действительно занимает по площади, примерно, 10% от всей поверхности звезды. Существование эмиссии требует, чтобы именно в этой малой области имел место инверсионный ход температуры. Инверсия температуры возникает в результате сферической аккреции (модель Бонда-Хойла) из межзвездной среды. Однако полное отсутствие дополнительных компонентов излучения, возникающих при такой аккреции, в других спектральных диапазонах, таких, как рентгеновский, ультрафиолетовый и др., свидетельствует, что скорость такой аккреции исключительно мала и оценивается как $\dot{M} < 10^{-6}$ г см$^{-2}$с$^{-1}$. Поэтому объяснение появления эмиссионных линий в результате аккреции из межзвездной среды встречается с большими трудностями.

В июне и августе 1999г. нами были выполнены спектроскопические и спектрополяриметрические наблюдения белого карлика GD 356 на 6-метровом телескопе (БТА-6м) САО РАН. Результаты наблюдений и их анализ представлены в данной статье. Мы предлагаем другое объяснение причины возникновения эмиссионных линий в спектре данного объекта. Наше объяснение базируется на теории явления радиационного дискона, предложенной и развитой В.В.Железняковым и его сотрудниками [3-7]. Суть этой теории состоит в том, что с поверхности вырожденной звезды с сильным магнитным полем под действием давления циклотронного излучения истекает плазменный ветер, образуя как струи-джеты, направленные вдоль магнитных осей, так и, вероятно, плазменный диск вблизи магнитного экватора. Мы покажем, что в случае GD 356 выполняются условия для образования струйного течения из магнитных полюсов звезды. Именно в плазме этих джетов и возникают эмиссионные линии.

2. *Наблюдательный материал и результаты наблюдений.* Спектрополяриметрические и спектральные наблюдения GD 356 выполнялись в фокусе Несмита с использованием спектрографа СП-124 и ПЗС камеры PM 1024 с размером пикселя 24 x 24 мкм. При спектральных наблюдениях использовалась дифракционная решетка с размером 1200 штрихов/мм. Такая решетка обеспечивает разрешение 1.3Å/пиксель в диапазоне λλ 3920-5250Å. При спектрополяриметрических наблюдениях использовалась другая решетка с параметрами 300 штрихов/мм, а также анализатор круговой поляризации (АЦП, см. [9]). Используемая решетка обеспечивала дисперсию 4.8Å/пиксель в спектральном диапазоне λλ 3500-8300Å. Размер звездных изображений во время наблюдений не превышал величины 1".5-2".0. В результате удалось получить спектры с двухпиксельным разрешением порядка 2.6Å в спектральной моде и 10Å в режиме спектрополяриметрии. Всего для звезды GD 356 было

получено 7 индивидуальных спектрограмм в двух сетах наблюдений 20 июня и 2 августа. Результаты наблюдений представлены в табл.1. Обработка полученных спектрограмм была выполнена по стандартной схеме с помощью системы автоматической обработки астрономических данных MIDAS [10]. Для всех спектрограмм GD 356 в качестве спектрофотометрического стандарта использовался одиночный белый карлик HZ 44 [11].

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА БТА-6м МАГНИТНОГО БЕЛОГО КАРЛИКА GD 356

20 июня 1999г., спектрополяриметрия			
Время (UT)	Экспозиция (с)	Изображение (")	Дисперсия
18.8	900	1.5	4.8 A/p
19.0	900	1.5	4.8 A/p
19.0	900	1.5	4.8 A/p
2 августа 1999г., спектроскопия			
Время (UT)	Экспозиция (с)	Изображение (")	Дисперсия
19.9	600	2.0	1.3 A/p
20.1	600	2.0	1.3 A/p
20.3	600	2.0	1.3 A/p
20.4	600	2.0	1.3 A/p

На рис.1 и 2 представлены спектры GD 356, на рис.3 представлена зависимость круговой поляризации излучения GD 356 от длины волны в области H_β линии. На последнем рисунке четко видны поляризованные с противоположными знаками зеемановские компоненты линии H_β.

3. *Зеемановский спектр и оценка величины магнитного поля.* Зеемановский триплет линии H_β, представленный на рис.3, можно использовать для оценки величины магнитного поля. Конечно, для значений

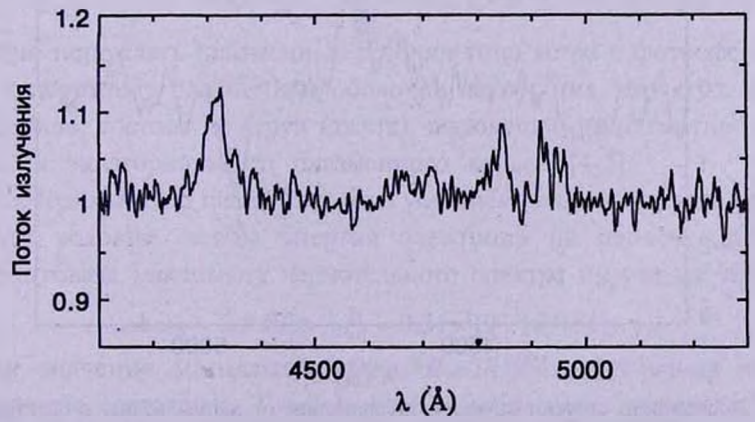

Рис.1. Спектр белого карлика GD 356 в интервале длин волн λλ 3920-5250Å.

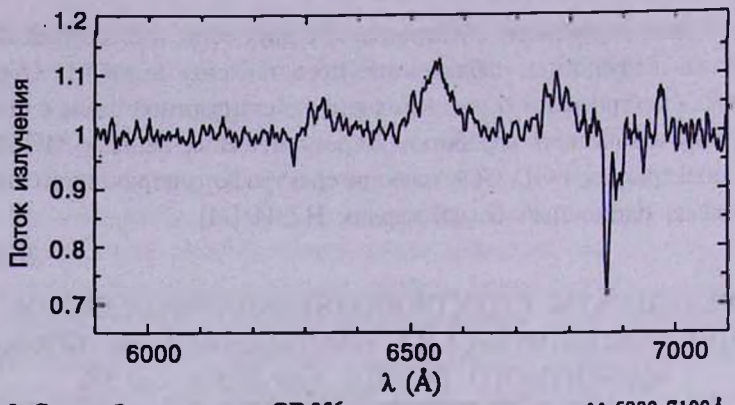

Рис.2. Спектр белого карлика GD 356 в интервале длин волн λλ 5900-7100Å.

магнитных полей, превышающих 1 МГс, нельзя использовать классическую формулу Зеемана, поскольку при таких полях теория возмущений, обычно используемая при расчетах эффекта Зеемана, уже не применима. Численные расчеты энергетических уровней атома водорода, сил осцилляторов уровней и вероятностей связанно-связанных переходов в магнитном поле $0 \le B < 4.7 \times 10^9$ Гс выполнялись многими авторами (см., например, [12-16]). Разность длин волн двух циркулярно поляризованных зеемановских H_β компонентов составляет (рис.3) $\Delta\lambda_B = 227.78$Å. Используя результаты численных расчетов, представленных на рис.2 работы [17], можно оценить значение магнитного поля, соответствующего искомой разности $\Delta\lambda_B$. Оно оказалось равным $B = 17$ МГс, что соответствует оценке магнитного поля GD 356, полученной в [2].

Результаты наших наблюдений позволяют усилить вывод работы [2] об

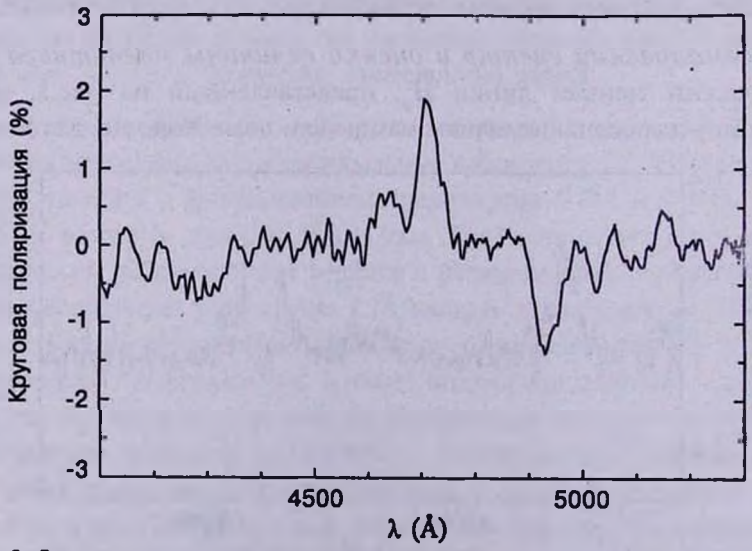

Рис.3. Зависимость степени круговой поляризации от длины волны в спектральном интервале λλ 4100-5300Å.

отсутствии заметного вращения белого карлика на длительном интервале времени. Результаты их наблюдений, выполненных за период 1992-1996гг., позволили исключить значение периода возможного вращения белого карлика $\sim 1 \div 3$ лет. Результаты наших наблюдений расширяют этот интервал. Можно сделать вывод, что если собственное вращение белого карлика GD 356 и имеет место, то значение периода такого вращения, во всяком случае, превышает $P > 5$ лет.

4. *Механизм возникновения эмиссионных линий: модель дискона*? Феррарио и др. [2] детально обсудили вопрос происхождения эмиссионных линий в спектре белого карлика GD 356. На сегодняшний день - это единственный одиночный белый карлик с эмиссионными линиями. Основной вывод работы Феррарио и др. [2] заключается в том, что наиболее вероятным является наличие у этой звезды активной хромосферы с магнитным полем. Однако обнаруженные у этого белого карлика довольно низкие пределы на потоки излучения в других диапазонах длин волн (инфракрасный, рентгеновский, радио и др.) практически исключают наличие развитой хромосферы и горячей короны. Попытка объяснить наличие эмиссионных линий процессом аккреции из межзвездной среды встречается с теми же трудностями. Многочисленные наблюдательные данные исключают также наличие другого компаньона вблизи GD 356 (все детали в работе [2]).

Нам представляется, что явление радиационного дискона, теория которого была предложена и развита в работах В.В.Железнякова и его школы [3-7], вполне может быть приложима к данному случаю. Напомним, что, в соответствии с работами Железнякова и Сербера [5-7], сила давления циклотронного излучения в фотосфере магнитного белого карлика может составлять заметную долю силы тяжести на поверхности звезды и даже превосходить ее. При этом оказывается, что структура внешних слоев такого белого карлика существенно модифицируется. Например, циклотронное излучение на первой гармонике гирочастоты

$$\omega_B = \frac{eB}{m_e c} = 1.76 \times 10^7 (B/1\text{Гс}) \qquad (1)$$

способно порождать плазменные течения типа ветра в фотосферах таких звезд и порождать плазменные оболочки вокруг них, структура которых, как правило, состоит из струи (джета), выходящей из магнитного полюса звезды, и экваториального плазменного кольца [4-5].

Необходимым (но недостаточным) условием реализации такой ситуации является условие, чтобы энергия электрона на первой гирочастоте соответствовала максимуму чернотельного спектра излучения звезды, т.е.

$$h\omega_B = 2.8kT_e; \quad T_e = 0.31 \times 10^{-3} (B/1\text{Гс}), \qquad (2)$$

Для значения магнитного поля $B \approx 1.7$ МГс, требуемая величина температуры составляет $T_e \approx 5.3 \times 10^3$ K, что меньше определенного по спектральным данным значения эффективной температуры белого карлика

GD 356: $T_e = (7500 \div 8000)$K.

Выход из данной ситуации может быть найден в рамках работы Фендта и Дравинса [18], которые решили задачу о влиянии сильного, крупномасштабного поля на структуру атмосферы белого карлика и на распределение температуры в ней. Магнитное поле на поверхности звезды создает, во-первых, дополнительный компонент давления, который приводит прежде всего к распуханию поверхности звезды. Его влияние может составлять

$$\frac{B^2}{8\pi} = 4 \times 10^{12} (B/10\,\text{МГс})^2, \tag{3}$$

что во много раз превышает обычное газовое давление, которое составляет $\sim 10^6$ для оптической глубины $\tau \sim 1$ [19]. Еще Острайкер и Хартвик [20] показали, что в случае магнитного белого карлика размеры его вырожденного ядра значительно больше, чем в немагнитном случае. Во-вторых, анизотропия магнитных сил может приводить к заметному отклонению от сферичности как распределения поверхностной плотности, так и температуры. Хотя полоидальное магнитное поле и является бессиловым, наличие даже небольшого ≤ 1МГс тороидального магнитного поля вполне обеспечивает магнитную деформацию поверхности белого карлика. Именно такой случай и был детально исследован в работе [19].

Главный результат их работы состоит в том, что в случае политропного состояния газа в атмосфере белого карлика, т.е. когда $P \sim \rho^\gamma$ и $T \sim P^{(\gamma-1)/\gamma}$, поверхностные температуры экваториальной и полярной областей звезды существенно отличаются друг от друга, причем:

$$\frac{T_{eq}}{T_{pole}} = \left[\frac{1-(4/9)\beta}{1-(16/9)\beta}\right]^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}, \tag{4}$$

т.е. температура на полюсе звезды может быть существенно ниже, чем на ее экваторе.

Параметр $\beta = (B_{eq} + B_{pole})^2 / 32\pi P_{tot}$, где P_{tot} есть величина полного давления. Если выбрать, как обычно, $\gamma = 5/3$, то соотношение между температурами порядка $T_{pole}/T_{eq} \approx 0.1$ легко достигается при значении $\beta = 0.555$, т.е. при примерном равенстве давлений силового магнитного поля и газового компонента атмосферы. Именно тогда температура на полюсе звезды T_{pole} будет удовлетворять условию (2) образования дискона при значении бессилового дипольного магнитного поля, равном измеренному, т.е. 17 МГс. Давление циклотронного излучения обеспечит эжекцию плазмы из полюсной области белого карлика и таким образом образуется радиационный дискон. Эмиссионные линии возникают в плазме радиационного дискона.

Другой фактор, способствующий возникновению радиационного дискона - это крупномасштабные меридиональные течения, которые могут возникать в звезде с нарушенной сферической симметрией. Такие течения порождаются не только вращением, но и наличием сильных магнитных полей на самой

звезде. Фактором, искажающим звезду и вызывающим меридиональные течения, является торроидальный компонент магнитного поля [21,22]. В случае неоднородного распределения температуры по поверхности белого карлика высота однородной атмосферы на экваторе звезды будет значительно больше, чем на ее полюсе, в силу того факта, что $T_{eq} > T_{pole}$. Поэтому меридиональная циркуляция может привести к течению более горячей плазмы с экватора в область полюса. Таким образом, появляется принципиальная возможность получения инверсии температуры в области магнитных полюсов белого карлика. Наличие инверсии температуры сильно повышает давление циклотронного излучения на плазму (см. в связи с этим [23]) и может вызвать эффективный отток плазмы из области полюсов.

5. ***Критерии проверки модели: возможность резонансной и широкополосной линейной поляризации.*** Эффект магнитной деформации поверхности белого карлика, приводящий к неоднородному распределению температуры по поверхности звезды, может быть проверен прямыми наблюдениями линейной поляризации как в широкополосной системе, так и в резонансных линиях водорода и гелия.

Оценим оптическую толщину атмосферы белого карлика по отношению к электронному рассеянию:

$$\tau_T = N_e \sigma_T H = \frac{N_e \sigma_T k T_e R^2}{G M_{WD} m_p} \cong 10^{-2} \left(\frac{N_e}{10^{18}}\right) \left(\frac{T}{10^4}\right) \left(\frac{R}{10^9}\right)^2 \left(\frac{0.5 M_\odot}{M_{WD}}\right). \qquad (5)$$

При неоднородном распределении поверхностной температуры нарушается сферическая симметрия звезды и возникает интегральная линейная поляризация излучения звезды [16]. Оценки показывают (см. [16]), что ожидаемая степень собственной линейной поляризации GD 356 может быть обнаружена на уровне нескольких десятых процента. В случае резонансного рассеяния на атомах водорода (Lyα) степень линейной поляризации может возрасти и до нескольких процентов.

6. ***Основные выводы.*** В результате выполненных на БТА-6м спектрополяриметрических наблюдений уникального белого карлика с эмиссионными линиями GD 356 измерено его магнитное поле. Сделан вывод, что величина магнитного поля этого белого карлика существенно не менялась на интервале времени более, чем 5 лет, что свидетельствует об отсутствии заметного вращения звезды на интервале времени в несколько лет. Учет магнитной деформации поверхности звезды, обусловившей неоднородное распределение температуры по ее поверхности, позволил оценить величину температуры полюсной области звезды и показать, что она удовлетворяет условию образования радиационного дискона, т.е. такому условию, при котором циклотронная частота попадает в область максимума спектра чернотельного излучения. Сделан вывод о возможности истечения плазмы из области магнитных полюсов под действием давления

циклотронного излучения и образования эмиссионных линий в истекающей плазме. Образованию радиационного дискона может способствовать меридиональная циркуляция, вызывающая течение более горячей плазмы в область более холодного магнитного полюса белого карлика.

Авторы признательны Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку (грант № 99-02-16336). Работа была выполнена также при частичной финансовой поддержке в рамках федеральной программы «Астрономия» (проект №1.4.2.1).

[1] Главная астрономическая обсерватория РАН
[2] Специальная астрофизическая обсерватория РАН
[3] Санкт-Петербургский Государственный технический университет, Россия

SPECTROPOLARIMETRIC OBSERVATIONS OF THE UNIQUE WHITE DWARF GD 356 ON BTA-6m

Yu.N.GNEDIN[1], N.V.BORISOV[2], T.M.NATSVLISHVILI[1], M.Yu.PIOTROVICH[3]

The results of spectropolarimetric observations of the unique magnetic white dwarf GD 356 with emission lines are presented. The observations were made with russian 6-m telescope (BTA-6m). The strength of the stellar magnetic field was estimated. For a time period of ≥ 5 years we could not find the rotation of GD 356. Taking into account the magnetic deformation effect of the stellar surface providing inhomogeneous distribution of temperature onto the stellar surface we show that the physical condition of "radiative discon" can be taken place in the regions of magnetic poles for dipolar magnetic field. In a result a plasma jet can be originated via the effect of cyclotron radiation pressure. The inhomogeneous distribution of temperature on the stellar surface can produce a noticeable amount of broadband and resonance polarization of radiation of a white dwarf with a strong magnetic field.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.L.Greenstein, J.K.McCarthy*, Asrtophys. J. Lett., **416**, 79, 1985.
2. *L.Ferrario, D.T.Wickramasinghe, J.Liebert, G.D.Schmidt, J.H.Bieging*, Mon.

Notic. Roy. Astron. Soc., **289**, 105, 1997.
3. *В.В.Железняков*, "Излучение в астрофизической плазме." Янус-К, М., 1997.
4. *П.А.Беспалов*, *В.В.Железняков*, Письма в Астрон. ж., **16**, 539, 1990.
5. *В.В.Железняков*, *А.В.Сербер*, Письма в Астрон. ж., **17**, 419, 1991.
6. *V.V.Zheleznyakov*, *A.V.Serber*, Space Sci. Rev., **68**, 275, 1994.
7. *V.V.Zheleznyakov*, *A.V.Serber*, *J.Kuypers*, in «Current Topics in Astrophysical and Fusion Plasma Research», dbv. Verlag Graz, 191, 1994.
8. *В.Л.Афанасьев*, Астрофизические исследования САО РАН, **31**, 128, 1991.
9. *И.Д.Найденов*, *Г.А.Чунтонов*, Сообщ. САО РАН, **16**, 63, 1976.
10. *P.Ballester*, ESO/ST-ECF Data Analysis Workshop, **177**, 1992.
11. *P.Massey*, *K.Trobel*, *E.Anderson*, Astrophys. J., **328**, 315, 1988.
12. *G.Wunner*, *W.Rosner*, *H.Ruder*, *H.Herold*, *M.R.C.McDowel*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **198**, 769, 1982.
13. *W.Rosner*, *G.Wunner*, *H.Herold*, *H.Ruder*, J.Phys. B: At. Mol. Phys. **17**, 1301, 1984.
14. *G.Wunner*, *W.Rosner*, *H.Herold*, *H.Ruder*, Astron. Astrophys., **149**, 102, 1985.
15. *D.T.Wickramasinghe*, in "Spectral Line Shapes", eds., L.Frommhold, J.W.Keto, Am. Inst. Phys., N.Y., 1990.
16. *A.Z.Dolginov*, *Yu.N.Gnedin*, *N.A.Silant'ev*, in «Propagation and Polarization of Radiation in Cosmic Media», Gordon and Breach Publs., Amsterdam, B.V., 1995.
17. *R.A.Saffer*, *J.Liebert*, *R.M.Wagner*, *E.M.Sion*, *S.G.Starrfield*, Astron. J., **98**, 668, 1989.
18. *Ch.Fendt*, *D.Dravins*, Astro-ph/0007387, 2000.
19. *M.Steffen*, *H.-G.Ludwig*, *B.Freytag*, Astron. Astrophys., **300**, 473, 1995.
20. *J.P.Ostriker*, *F.D.A.Hartwick*, Astrophys. J., **448**, 305, 1968.
21. *J.L.Tassoul*, in «Theory of Rotating Stars», Princeton Univ. Press, 1978 (русск. перевод: Ж.Л.Тассуль, «Теория вращающихся звезд», Мир, М, 1982).
22. *I.W.Roxburgh*, Astrophys. Space. Sci., **27**, 425, 1974.
23. *А.В.Сербер*, Препр. №432 ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1997.