АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 7 НОЯБРЬ, 1971 ВЫПУСК 4

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЗВЕЗДЫ SCO-X-1

Ю. Н. ГНЕДИН, О. С. ШУЛОВ

Поступила 31 октября 1971

В течение 14 ночей, с 23 июня 1971 г. по 28 июля 1971 г., проводились поляриметрические наблюдения ScoX-1. Была обнаружена циркулярная поляризация оптического излучения ScoX-1 в желто-красной области спектра. Величина поляризации колеблется вокруг нулевого значения и в ее изменениях присутствуют два колебательных процесса с периодами P_1 и $P_2 = P_1/2$. Средняя величина амплитуд p_1 и p_2 порядка 1%, причем $p_2 = \sqrt{p_1}$. Как периоды, так и амплитуды зависят от яркости ScoX-1.

Можно думать, что оптическое излучение ScoX-1 состоит из двух компонент: излучения звездообразного объекта (видимый блеск $15^m \lesssim m_B \lesssim 17^m7$) и излучения оптически толстой магнитоактивной плазменной оболочки, окружающей этот объект. Циркулярная поляризация возникает в результате рассеяния излучения звездообразного объекта в оболочке. Оценивается величина магнитного поля в оболочке: $H \gtrsim 2 \cdot 10^7$ *гаусс*.

1. *Введение.* Обнаружение циркулярной поляризации у нескольких белых карликов [1, 6—8], своеобразная зависимость их циркулярной и линейной поляризации от длины волны [2, 3, 8] и, наконец, обнаружение периодических изменений циркулярной поляризации у белого карлика G 195-19 [9], явно связанных с вращением звезды, ставят множество задач как перед наблюдателями, так и перед теоретиками. Прежде всего, остается во многом неясным механизм обнаруженного явления, так как предложенное Дж. Кемпом [4, 5] объяснение, по-видимому, нельзя признать достаточно удовлетворительным [9]. Однако несомненно, что циркулярная поляризация возникает вследствие существования больших магнитных полей у этих звезд.

Большие магнитные поля могут существовать и у рентгеновских звезд, следовательно, и у них можно ожидать наличия циркулярной поляризации оптического излучения. В работе [10] была оценена величина ожидаемой циркулярной поляризации излучения рентгеновской звезды ScoX-1 в предположении, что областью непрерывного оптического излучения является магнитоактивная плазменная оболочка. Было найдено, что поляризация должна возрастать с длиной волны и в красной части спектра достигать вполне обнаружимой величины.

В связи с этими обстоятельствами нами была начата программа наблюдений циркулярной поляризации у рентгеновских звезд, белых карликов и ядер планетарных туманностей. В данной работе приводятся описание методики наблюдений и результаты исследования рентгеновской звезды ScoX-1.

2. *Аппаратура и метод наблюдений.* Наблюдения выполнялись с помощью одноканального фотоэлектрического поляриметра, установленного в кассегреновском фокусе 20″ рефлектора АЗТ-14 [11] Бюраканской станции АО ЛГУ. Светоприемником служил отобранный из большой партии фотоумножитель типа ФЭУ-79 с мультищелочным фотокатодом, охлаждаемый твердой углекислотой. Поскольку в нашу программу входило много слабых для нашего телескопа объектов, наблюдения делались в двух сравнительно широких цветовых полосах — коротковолновой КВ ($\lambda_{эфф} = 0.44$ *мк*) и длинноволновой ДВ ($\lambda_{эфф} = 0.64$ *мк*). Относительные кривые реакции аппаратуры в этих полосах показаны на рис. 1.

Анализаторами циркулярной поляризации служили две фазовые 90°-пластинки из слюды (светопропускание 81 %) в комбинации с поляроидом, хорошо пропускающим и поляризующим во всей области чувствительности мультищелочного фотокатода.

Метод измерения основан на том известном факте, что 90°-пластинка, ориентированная своей осью наибольшей скорости под углом 0° в принятой системе отсчета углов, преобразует падающий на нее свет с относительными параметрами Стокса $[1, p_X, p_Y, p_V]$ в свет с параметрами $[1, p_X, p_V, -p_Y]$. Иначе говоря, измерение параметра p_V падающего на пластинку света сводится к измерению численно ему равного параметра линейной поляризации p_Y прошедшего через 90° пластинку света, что легко делается обычными методами звездной поляриметрии. Необходимое ориентирование фазовых пластинок достаточно сделать относительно инструментальной системы отсчета углов.

Поляризационное наблюдение складывается из некоторого числа (обычно не менее 4—5) единичных измерений степени циркулярной по-

ляризации p_V. Единичное измерение p_V состоит в том, что при введенной 90°-пластинке берутся 4 отсчета на звезду вместе с фоном при углах поворота поляроида 45°, 135°, 45° и 135° и столько же отсчетов на фон неба при тех же положениях поляроида. Продолжительность одного отсчета составляет 40 *сек* для звезд ярче 10^m и увели-

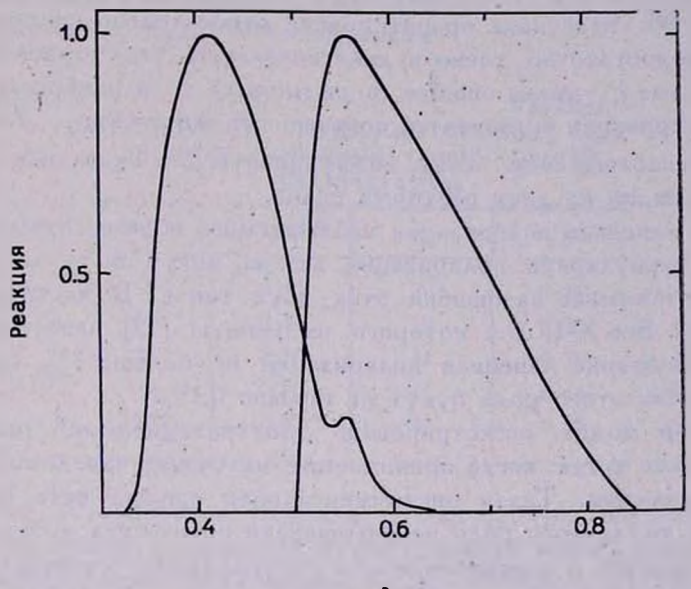

Рис. 1. Кривые реакции аппаратуры в цветовых полосах КВ и ДВ. Длины волн выражены в микронах, реакции—в относительных единицах.

чивается до 100 *сек* для звезд слабее 12^m. Разрешающее время измерений определяется продолжительностью единичного измерения p_V; для звезд слабее 12^m оно равняется 15 *мин*.

3. *Ошибки наблюдений.* При измерениях циркулярной поляризации возможны несколько видов систематических погрешностей. Если фазовая пластинка несовершенна и создаваемый ею сдвиг фаз в действительности равен $\pi/4 + f$, где f— малый угол, и если анализируемое излучение имеет линейную поляризацию с параметрами p_X, p_Y, то возникает погрешность $\Delta p_V = -f p_Y$. Используемые нами 90°-пластинки были подобраны с тем расчетом, чтобы они давали усредненные по цветовым полосам (в предположении равноэнергетического спектрального распределения анализируемого излучения) фазовые сдвиги в пределах $90° \pm 1°$.

Так как такой допуск довольно жесткий, то можно было ожидать, что не очень большие отклонения от равноэнергетического распределения у реальных объектов не приведут к большим ошибкам. И, действительно, измеренные по наблюдениям звезд через дополнительный поляроид коэффициенты f оказались равными -0.06 для КВ и $+0.11$ для ДВ.

Если 90°-пластинка ориентирована относительно системы отсчета углов недостаточно точно и действительный угол ориентации равен $0+\gamma$, где γ—малая ошибка (в *радианах*), то в измеренной циркулярной поляризации p_V появится погрешность $\Delta p_V = 2\gamma p_X$. Также найденные по наблюдениям звезд коэффициенты 2γ оказались равными $+0.02$ в каждой из двух цветовых полос.

Если линейная поляризация наблюдаемого объекта известна, в наблюдения циркулярной поляризации всегда могут быть введены необходимые поправки за ошибки этих двух типов. В частном случае наблюдений Sco X-1, для которого из работы [12] известно, что в видимом диапазоне линейная поляризация не больше 1%, систематические ошибки этого рода будут не больше 0.1%.

Прибор может регистрировать „поляризационные" разности в отечетах даже тогда, когда принимаемое излучение заведомо является неполяризованным. Такая инструментальная ошибка есть результат проявления различного рода несовершенств оптических деталей телескопа и фотометра и неравномерности распределения чувствительности по поверхности фотокатода ФЭУ. Инструментальные ошибки нашей аппаратуры были определены из наблюдений звезд без поляризации и оказались равными $+0.14 \pm 0.02\%$ в КВ и $+0.09 \pm 0.02$ в ДВ. При обработке наблюдений за них вводились соответствующие поправки.

При ориентировании 90°-пластинок могут быть спутаны направления осей наибольшей и наименьшей скорости, то есть допущена ошибка в ориентировании на 90°. Если это произошло, знак p_V, характеризующий направление вращения электрического вектора, должен измениться на обратный.

Калибровка знака наблюдаемой поляризации и одновременно проверка правильности показаний нашей аппаратуры были сделаны по наблюдению белого карлика Gw 70°8247, для которого величина p_V как функция длины волны и направление вращения электрического вектора известны из работ [1, 2]. Наше наблюдение от 1—2 августа 1971 года дало $p_V = -3.42 \pm 0.36\%$ в КВ и $p_V = -3.14 \pm 0.65\%$ в ДВ в хорошем согласии с данными [2]. Знак „минус" у p_V в наших наблюдениях соответствует вращению электрического вектора по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего на звезду.

Величины случайных ошибок можно оценивать по разбросу результатов единичных измерений p_V, составляющих данное наблюдение. Оцененные так ошибки будут включать в себя не только статистические флюктуации отсчетов, но и неучтенные быстрые вариации атмосферной прозрачности и яркости фона неба. Однако такие оценки, сделанные по одному наблюдению, содержащему 4—5 единичных измерений p_V, неизбежно будут неустойчивыми.

Таблица 1

СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ЕДИНИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

m_B	σ_1 % (КВ)	m_V	σ_1 % (ДВ)
9^m	0.30	9^m	0.25
10	0.40	10	0.31
11	0.50	11	0.38
12	0.63	12	0.48
13	0.81	13	0.59

Более устойчивы и надежны оценки ошибок, найденные путем усреднения оценок, полученных по наблюдениям многих звезд. В табл. 1 даются усредненные среднеквадратические ошибки σ_1 единичных измерений поляризации для звезд разного блеска; они получены из наблюдений белых карликов и ядер планетарных туманностей с известными звездными величинами, соответствуют средним условиям наблюдений и учитывают изменение продолжительности отсчетов в зависимости от блеска объекта.

Индивидуальная точность наблюдений в каждом конкретном случае, естественно, может колебаться в ту или иную сторону от указанной в табл. 1 средней меры точности в зависимости от конкретных условий видимости объекта и состояния атмосферы в момент наблюдения. В частном случае наблюдений ScoX-1 случайные ошибки (они приводятся в третьем столбце табл. 3) всегда были несколько больше средней в силу, во-первых, весьма неблагоприятных условий видимости этого объекта на широте Бюракана и, во-вторых, из-за того, что хорошо известные быстрые флюктуации блеска ScoX-1 с неизбежностью входят в случайные ошибки.

В тех случаях, когда поляризацию можно считать неизменной на протяжении наблюдения, состоящего из n единичных измерений p_V, ошибка среднего результата может быть вычислена как $\sigma_1/\sqrt{n}$.

4. *Наблюдения ScoX-1.* Наблюдения циркулярной поляризации ScoX-1 проводились в течение 14 ночей, в период с 23 июня по 28 июля 1971 года. Всего выполнено 5 измерений p_V в КВ и 122 в ДВ. Наблюдения в КВ, сделанные 23—24 июня, не показали заметной поляризации, тогда как выполненные в ту же ночь наблюдения в ДВ продемонстрировали синусоидоподобно меняющуюся p_V с амплитудой $\sim 3\%$ и периодом ~ 3 *часов*. Поэтому все дальнейшие наблюдения ScoX-1 проводились в цветовой полосе ДВ.

Сводка результатов наших поляризационных наблюдений ScoX-1 приводится в табл. 2, где даются гелиоцентрический момент середины наблюдения (в юлианских днях) и измеренная величина p_V (в процентах), которая фактически является результатом единичной оценки поляризации—имея дело с переменной поляризацией и желая сохранить имеющееся временное разрешение, мы избегали каких-либо преждевременных усреднений. Первые 5 измерений p_V, заключенные в общие скобки, относятся к цветовой полосе КВ.

Как правило, один—два раза в ночь делались оценки блеска ScoX-1 в полосе B. Звездой сравнения служила звезда с $V = 11.^m38$, $B - V = -+1.^m05$, расположенная на расстоянии 1.6 *минут дуги* к северо-западу от ScoX-1. Ее блеск и цвет были определены относительно BD $-15^\circ 4301$—звезды, UBV-данные которой известны из [13]. Блеск m_B ScoX-1 в период наших наблюдений дан во втором столбце табл. 3.

5. *Анализ наблюдательных данных.* Графическое представление данных табл. 2 показывает, что во все те ночи, в которые удалось получить достаточно длинные ряды наблюдений, в излучении рентгеновской звезды ScoX-1 в полосе ДВ на фоне значительных случайных ошибок отчетливо прослеживаются регулярные изменения p_V, имеющие синусоидоподобную форму, причем наблюдаются колебания по крайней мере двух периодов: ~ 3 *часов* и ~ 1 *часа*. Эти колебания появляются то по отдельности, то оба вместе. Постоянная составляющая в p_V отсутствует.

Остается неясным, имеется ли измеримая поляризация в КВ, поскольку сделанные в этой цветовой полосе наблюдения приходятся как раз на те фазы, когда в ДВ поляризация должна быть близкой к нулю.

Была предпринята попытка представить найденные изменения циркулярной поляризации ScoX-1 в виде суммы конечного числа гармонических колебаний, для чего был использован метод, описанный

Таблица 2

НАБЛЮДЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ SCOX-1

$JD_{\odot}2441000+$	p_V %	$JD_{\odot}2441000+$	p_V %
1	2	1	2
126.284	+0.8	128.376	+0.4
126.293	−2.1	128.386	+3.2
126.301	+2.1	128.397	+1.5
126.310	−0.6	128.405	−0.6
126.319	+1.1	128.413	+0.9
126.333	−2.1	128.421	−3.0
126.341	−5.1	132.347	+2.0
126.354	−1.3	132.353	+1.8
126.363	−0.5	133.315	+0.3
126.372	−1.3	133.322	+0.3
126.381	+2.4	133.331	+2.2
126.390	+2.2	133.347	−0.8
127.277	−2.1	133.353	−1.1
127.286	+1.0	133.346	0.0
127.295	+2.0	133.380	+0.9
127.305	−1.5	133.388	−2.8
127.312	+0.5	133.395	−0.3
127.318	−3.0	133.402	0.0
127.327	−1.0	133.411	+1.6
127.336	+1.8	133.417	+0.6
127.345	+0.6	143.261	−0.5
127.354	+2.1	143.284	+0.7
127.367	−2.8	143.291	+1.0
127.384	−2.0	144.260	+2.0
127.393	−0.1	144.267	+4.2
127.401	+1.1	144.276	+1.0
127.411	−0.7	144.285	−1.3
127.418	−2.9	144.292	+1.5
127.424	−1.2	144.305	+1.9
128.336	−0.2	147.271	+1.4
128.343	−2.2	147.311	−0.5
128.352	+0.6	147.319	+0.6
128.359	+1.4	147.328	−1.5
128.369	−0.6	147.337	−1.4
		147.346	+0.6

Таблица 2 (продолжение)

1	2	1	2
148.256	−0.7	155.277	+0.5
148.266	−3.6	155.287	+1.1
148.273	0.0	155.294	+0.5
148.281	+0.4	155.301	−1.0
148.289	−0.2	155.310	−0.8
148.298	+0.4	155.317	+2.1
148.305	−1.5	155.325	+1.6
148.313	+0.5	155.332	+0.3
148.321	+1.0	155.345	0.0
148.328	+2.0	157.265	−1.7
148.362	+0.9	157.273	+0.3
151.272	+0.3	157.277	+0.1
151.278	−0.7	157.284	+0.8
151.286	−0.4	157.291	0.0
151.296	+1.6	157.297	0.0
151.306	−1.2	157.305	+0.4
151.314	+1.1	157.312	+0.6
154.254	−1.3	157.319	+0.9
154.263	−1.7	157.326	+0.9
154.270	+0.9	157.333	−1.7
154.280	+0.5	160.263	−1.6
154.287	−0.3	160.270	−0.6
154.294	+0.2	160.279	+0.4
154.303	−2.7	160.288	+0.5
154.309	−0.8	160.297	0.0
154.317	0.0	160.306	+1.2
154.325	+1.5	160.314	+1.0
154.332	−2.0	160.325	0.0
155.273	−0.2	160.334	0.0

в работе [14]. Вычисления, проделанные по этому методу, показали, что строгая периодичность в колебаниях поляризации отсутствует и что периоды колебаний меняются от ночи к ночи.

Тогда была проделана обработка наблюдений, сгруппированных по отдельным ночам. Результаты такой обработки суммируются в табл. 3, в которой последовательно приводятся дата наблюдений (в юлианских днях), блеск m_B в момент наблюдения, ошибка σ_1 и

полученные оценки амплитуд и периодов наблюдавшихся колебаний поляризации вместе с оценками их ошибок.

Данные этой таблицы позволяют (путем графического их сопоставления между собой) установить, что в изменениях циркулярной поляризации ScoX-1 присутствуют только два колебательных процесса, по крайней мере в том интервале возможных значений периодов, который может быть обследован с помощью наших наблюдений. Более того, величины амплитуд и периодов этих колебаний оказываются связанными с блеском объекта, причем эти связи удается представить в неожиданно простых аналитических выражениях.

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ SCO X-1 ЗА ОТДЕЛЬНЫЕ НОЧИ

Дата $JD_{\odot}$ 2441000+	Блеск m_B	σ_1 (%)	Период колебаний поляризации (*мин*)	Амплитуда колебаний поляризации (%)
126	$13^m.82$	1.22	184±14	3.19±0.68
127	13.89	1.31	78± 5	1.82±0.46
128	13.17	1.35	148±25	1.59±0.61
133	~13.0	1.13	160±40	0.91±0.44
147	13.01	0.89	160±69	0.96±0.44
148	12.42	0.80	56± 7	1.23±0.48
			180±59	0.85±0.47
154	12.47	1.04	72±13	0.93±0.44
155	12.76	0.77	62± 8	0.99±0.34
157	12.21	0.45	54± 6	0.79±0.28
			128±27	0.60±0.30
160	12.53	0.46	145±16	1.01±0.23

а). Зависимость периодов от блеска. На рис. 2 показана зависимость периодов P_1 (более медленное колебание) и P_2 (более быстрое колебание) от блеска m_B. Несмотря на относительно большие ошибки в оценках периодов, хорошо видно, что P_1 и P_2 уменьшаются с уменьшением m_B (возрастанием блеска) по линейным законам. Наилучшие прямые, найденные по способу наименьших квадратов с учетом весов отдельных точек (они показаны на рисунке), оказались следующими: $P_1 = 30.9\, m_B - 243.8$, $P_2 = 14.4\, m_B - 121.2$. Правая часть первого уравнения почти точно равна удвоенной правой части второго уравнения и небольшие расхождения в коэффициентах целиком могут быть приписаны влиянию ошибок, поэтому естественно заключить, что

связь периодов с блеском и между собой может быть представлена выражением

$$2P_2 = P_1 = 30m_B - 243. \quad (1)$$

Таким образом оказывается, что второе (более быстрое) колебание поляризации с частотой $\omega_2 = 2\omega_1$ есть ни что иное, как первый обертон основного колебания с частотой ω_1. Однако поскольку периоды зависят от блеска ScoX-1, который, как известно, подвержен

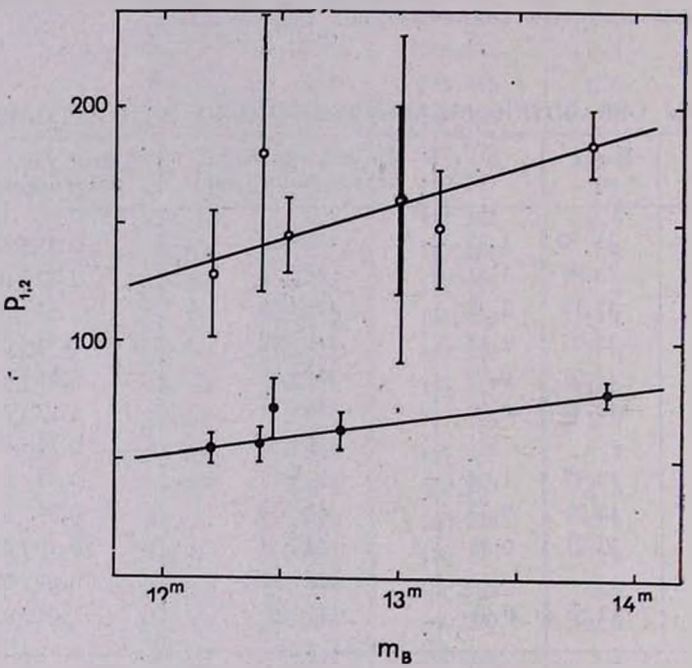

Рис. 2. Зависимость периодов колебаний циркулярной поляризации Sco X-1 от блеска. Кружки соответствуют колебаниям с периодами P_1, точки — с периодами P_2.

значительным изменениям, то они изменяются от ночи к ночи и даже в течение одной ночи. Именно поэтому гармонический анализ всех наблюдений поляризации, рассматриваемых как единый ансамбль однородных данных, не мог дать и не дал положительных результатов.

б) Зависимость амплитуд от блеска. Амплитуды колебаний поляризации уменьшаются с ростом блеска по примерно гиперболическим законам, поэтому было сделано предположение, что имеет место связь в форме $p_{1,2} = \text{const} \cdot I_B^{-n_{1,2}}$, где $p_{1,2}$ — амплитуды (в про-

центах) колебаний p_V с периодами, соответственно, P_1 и P_2, а I_B—интенсивность излучения ScoX-1 в цветовой полосе B. Тогда в координатах $m_B - 2.5 \lg p_{1,2}$ оценки амплитуд из табл. 3 должны ложиться на прямые вида $2.5 \lg p_{1,2} = \text{const} + n_{1,2} m_B$, что и подтверждается рис. 3. Вероятные значения показателей $n_1 = 1.0 \pm 0.2$ и $n_2 = 0.5 \pm 0.3$ подсказывают естественное заключение, что в действительности имеют место строгие равенства $n_1 = 1$ и $n_2 = 0.5$. Найденные с соответствующими этим величинам наклонами наилучшие прямые (показаны на рис. 3) оказались $2.5 \lg p_1 = m_B - 12.74$ и $2.5 \lg p_2 = 0.5\, m_B - 6.31$.

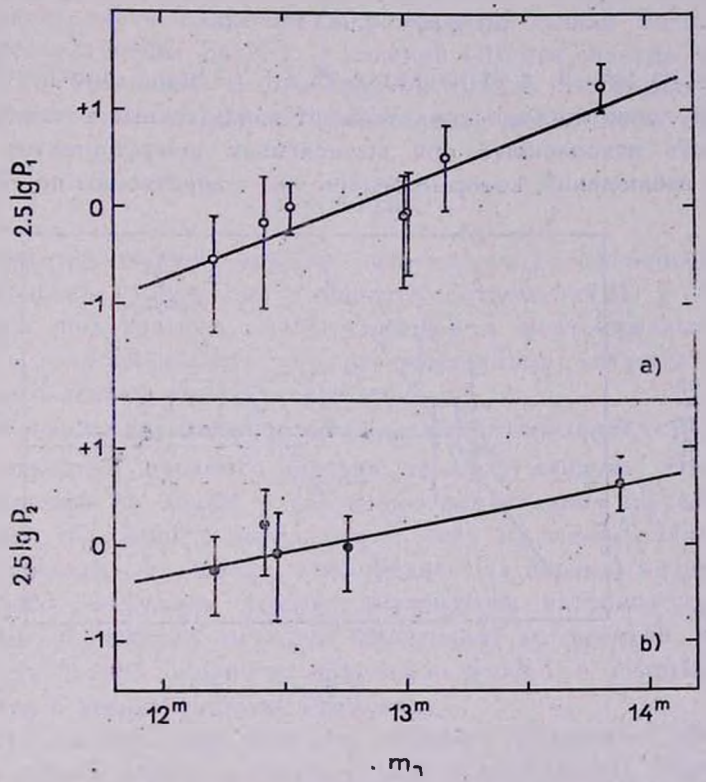

Рис. 3. Зависимость амплитуд колебаний циркулярной поляризации Sco X-1 от блеска. *а*) Колебания с периодами P_1, *б*) Колебания с периодами P_2. Амплитуды p_1 и p_2 выражены в процентах.

Опять видно, что первая часть первого уравнения почти точно равна удвоенной правой части второго, поэтому связь амплитуд с блеском и между собой может быть принята в виде

$$2.5 \lg p_1 = m_B - 12.7$$
$$p_2 = \sqrt{p_1}, \qquad (2)$$

где p_1 и p_2 выражены в процентах.

в) *Зависимость между амплитудами и периодами.* Связь между амплитудами и периодами изменений поляризации теперь может быть найдена как следствие зависимостей (1) и (2). Если (1) и (2) справедливы, то $p_{1,2}$ должны быть связаны с $P_{1,2}$ соотношениями

$$2.5 \lg p_1 = 0.033\, P_1 - 4.6$$
$$2.5 \lg p_2 = 0.033\, P_2 - 2.3\,. \qquad (3)$$

Как видно из рис. 4, в координатах $P_{1,2} - 2.5 \lg p_{1,2}$ соответствующие (3) прямые линии неплохо представляют наблюденные точки, особенно если учесть накопленные при вычислениях коэффициентов ошибки и ошибки наблюдений, которые теперь уже существенны по обеим ко-

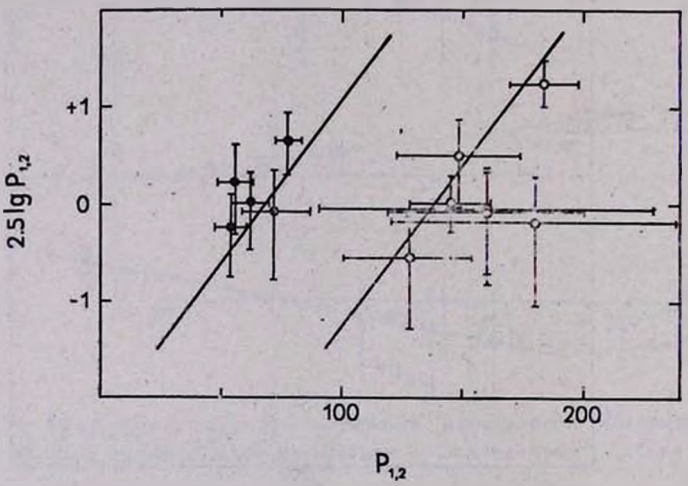

Рис. 4. Зависимость амплитуд колебаний циркулярной поляризации ScoX-1 от периодов этих колебаний. Кружки соответствуют колебаниям с периодами P_1, точки—с периодами P_2. Амплитуды p_1 и p_2 выражены в процентах.

ординатам. Положительный результат такой проверки довольно убедительно подтверждает правильность найденных соотношений (1) и (2).

6. *Обсуждение.* Подробное обсуждение механизма образования циркулярной поляризации в оптическом излучении ScoX-1 мы наде-

емся дать в другой статье, здесь же пока остановимся на некоторых следствиях, непосредственно вытекающих из описанных выше результатов наблюдений.

Из (2) можно получить, что

$$p_1 = \frac{6.00 \cdot 10^{-19}}{I_B} 100\ \%, \qquad (4)$$

где постоянная вычислена для цветовой полосы B согласно калибровке UBVR-системы, данной в [15], и выражена в *ватт/см²/мк*. Так как наши оценки блеска делались в полосе B ($\lambda_{эфф} = 0.44$ *мк*), а поляризационные данные относятся к $\lambda_{эфф} = 0.64$ *мк*, то в (4), к сожалению, левая и правая части относятся к различным длинам волн. Но поскольку цвет излучения ScoX-1 в видимой области спектра меняется не сильно по сравнению с изменениями блеска, то можно считать, что на любой длине волны из этой области имеет место соотношение вида

$$p_1 = \text{const}/I, \qquad (5)$$

где величина постоянной, конечно, изменяется с изменением длины волны. Тот факт, что удалось установить соотношения (1) и (2) между параметрами поляризации, наблюдавшейся в желто-красных лучах, с блеском в голубой области спектра, по-видимому, является сильным аргументом в пользу такого утверждения.

Поскольку по определению наблюдаемая поляризация есть $p_V = V/I$, где V — четвертый параметр Стокса, то из (5) следует, что в оптическом диапазоне на любой длине волны амплитудное значение параметра V для колебаний с периодами P_1 есть $V_1 = \text{const}$. Иными словами, мы приходим к выводу, что средняя (за период) мощность поляризованного излучения, степень поляризации которого колеблется с периодами P_1, всегда остается постоянной во времени, несмотря на изменения полной мощности излучения ScoX-1 в видимом диапазоне спектра в весьма широких пределах.

Простое и, как нам кажется, наиболее вероятное объяснение этого заключения можно получить в рамках модели [10]. Будем предполагать, что излучение ScoX-1 в оптической области слагается из двух компонент: переменного и неполяризованного излучения I_* магнитоактивной плазменной оболочки с температурой kT порядка нескольких *кэв*, размерами $\sim 10^8 - 10^9$ *см* и концентрацией $10^{16} - 10^{17}$ *см*$^{-3}$ [16, 17] и излучения интенсивности I_1, которое приобретает круговую поляризацию при прохождении через плазменную оболочку, причем $I_1 \ll I_*$. Отметим, что плазменная оболочка с вышеприведенными па-

раметрами является оптически толстой по отношению к томсоновскому рассеянию ($\tau \sim 10$). В этом случае, согласно [10], степень круговой поляризации равна

$$p_1 = \frac{V_1}{I_1 + I_*} \cong 7.6 \cdot 10^{-5} \lambda H \cos\beta \frac{I_1}{I_*}. \qquad (6)$$

Здесь λ — длина волны падающего излучения, β — угол между направлением на наблюдателя и осью магнитного дипольного поля, H — величина магнитного поля в плазменной оболочке.

Тогда наблюдаемая зависимость изменения амплитуд p_1 будет простым отражением вариаций блеска ScoX-1 ($I = I_* + I_1 \approx I_*$). Конечно, формула (6) справедлива и для мгновенного значения поляризации $p_V(t)$.

С помощью формулы (6) можно оценить величину проекции магнитного поля на луч зрения в плазменной оболочке. Мы будем предполагать, что соответствующий I_1 блеск, по крайней мере, на 1^m слабее минимального наблюдаемого полного блеска ScoX-1 ($m_B = 14^m$). Поскольку амплитуда $p_1 = 1\%$ наблюдается при $m_B = 12^m.7$, то по формуле (6) получаем оценку величины магнитного поля $H \gtrsim 2 \cdot 10^7$ *гс*. Таким образом, наблюдаемые значения амплитуд p_1 не противоречат предположению, что внутри плазменной оболочки с магнитным полем $H \gtrsim 2 \cdot 10^7$ *гс* находится звездообразный источник оптического излучения, видимый блеск которого заключен в пределах $15^m < m_B \leqslant 17^m.7$. Верхний предел следует из того, что $I_1 \geqslant V_1$, а согласно (2) $V_1 = 17^m.7$.

Изменение поляризации со временем может быть объяснено изменением магнитного поля H с характерными периодами P_1 и P_2. Наличие гармонических колебаний в поляризации позволяет предполагать, что изменение структуры магнитного поля связано, например, с вращением горячих слоев плазмы с вмороженным магнитным полем. Вполне возможно, что изменение поля с временами порядка часов могло бы возникать в результате вращения нейтронной звезды, окруженной толстой плазменной оболочкой [18, 19].

Однако в рамках общепринятой модели [16, 17], в которой считается, что оптическое и рентгеновское излучение ScoX-1 возникает в одной и той же области с размерами $\sim 10^8$—10^9 *см*, довольно трудно понять наблюдаемое уменьшение величины амплитуд $p_{1,2}$ и периодов $P_{1,2}$ с возрастанием блеска звезды. Наши результаты можно было бы объяснить, если, например, предположить, что с увеличением температуры оболочки T уменьшается ее радиус R так, что ве-

личина R^2T возрастает; тогда происходило бы возрастание частоты вращения оболочки и ее блеска. Однако, если оставаться в рамках модели [16], то из одновременных оптических и рентгеновских наблюдений ScoX-1 [17, 20] следует, что с возрастанием температуры T и уменьшением радиуса R величина R^2T также уменьшается, то есть блеск звезды падает. Правда, достоверность этого вывода невелика, так как ошибки в определении температуры по спектру рентгеновского излучения довольно большие [17]. Если этот вывод подтвердится, то результаты поляризационных, оптических и рентгеновских наблюдений трудно объяснить в предположении, что оптическое и рентгеновское излучение Sco X-1 возникают в одном и том же объеме радиуса R.

Кроме того, трудно объяснить зависимость между периодами $P_2 \sim P_1/2$. Качественно эту зависимость можно было бы интерпретировать в рамках работы [21], в которой показано, что в нелинейной среде (в том числе и в плазме) при наложении на нее периодического во времени магнитного поля с частотой ω (магнитная накачка) развивается неустойчивость, при которой будет возбуждаться волна с частотой $\omega/2$.

Появление второго периода P_1 можно также пытаться объяснить следующим образом. Пусть магнитное поле меняется по синусоидальному закону с периодом P_1. Если компонента излучения I_1 наряду с постоянной составляющей имеет синусоидальную составляющую с периодом, строго равным P_1, то согласно (6) в зависимости $p_V(t)$, наряду с колебанием с периодом P_1 появится еще одно колебание с периодом $P_2 = P_1/2$, которое является результатом сложения колебаний $H(t)$ и $I_1(t)$. При этом из установленного наблюдениями отсутствия постоянной составляющей в $p_V(t)$ следует требование строгой синхронизации фаз гармонических колебаний $H(t)$ и $I_1(t)$. Это означало бы строгую синхронизацию фаз вращения магнитного поля H и колебаний компоненты I_1. Заметим, что синусоидальное изменение поля и есть магнитная накачка.

При магнитной накачке в плазме будут эффективно ускоряться электроны [22]. При этом спектр ускоренных электронов не противоречит результатам наблюдений жесткого рентгеновского и радиоизлучения ScoX-1, если предполагать, что они возникают в результате синхротронного излучения этих электронов во внешней области. Отметим также, что полученные нами характерные времена изменения поляризации по порядку величины сравнимы с временем медленной вариации рентгеновского излучения ScoX-1 [19].

В такой плазме может происходить также ускорение протонов и образование быстрых протонных пучков, которые, в свою очередь,

образуют возбужденные нейтральные атомы водорода в результате процессов перезарядки во внешней области рентгеновской звезды Sco X-1 с эффективными размерами 10^{11} *см*. Такие атомы действительно наблюдались во внешней области Sco X-1, причем характерные времена их лучевых скоростей [23] весьма близки к характерным временам изменения циркулярной поляризации.

Авторы благодарят профессора В. А. Домбровского за поддержку данной работы, профессора А. З. Долгинова за критические замечания, Е. Т. Белоконь, В. Н. Гуман и Н. А. Воробьеву за выполнение части вычислений.

Примечание при корректуре. Как нам стало известно, практически одновременно с нами наблюдения циркулярной поляризации в спектральной области 0.4—0.6 *мк* проводились Н. С. Никулиным, В. М. Кувшиновым и А. Б. Северным в Крымской обсерватории. Их результаты, очень хорошо согласующиеся с нашими, показывают, что найденная циркулярная поляризация существует и в более коротковолновой области спектра.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинградский университет

THE DISCOVERY OF VARIABLE CIRCULAR POLARIZATION IN THE LIGHT OF X-RAY STAR SCO X-1

Yu. N. GNEDIN, O. S. SHULOV

The polarimetric observations of Sco X-1 have been carried out during 14 nights from 1971 June 23 to 1971 Jule 28. As a result the discovery was made of circular polarization in the yellow-red light of Sco X-1. The polarization oscillates around the zero mean level and shows two oscillating processes with periods P_1 and $P_2 = 1/2\ P_1$ and the percentage amplitudes p_1 and $p_2 = \sqrt{p_1}$. Both periods and amplitudes depend on the brightness of Sco X-1.

It is assumed that the optical radiation of Sco X-1 is a sum of two components the first being the radiation of a star-like object (observed brightness $15^m < m_B \leqslant 17^m.7$) and the second being the radiation of optically thick magnetoactive plazma shell surrounding this object. The circular polarization is explained as a product of Thomson scattering of star-like object light in the shell. The magnetic field value in the shell is estimated as $H \gtrsim 2 \cdot 10^7$ gauss.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J. C. Kemp, J. B. Swedlund, J. D. Landstreet, J. R. P. Angel*, Ap. J. (Letters), 161, L77, 1970.
2. *J. R. P. Angel, J. D. Landstreet*, Ap. J. (Letters), 162, L61, 1970.
3. *J. C. Kemp, J. B. Swedlund*, Ap. J. (Letters), 162, L67. 1970.
4. *J. C. Kemp*, Ap. J., 162, 169, 1970.
5. *J. C. Kemp*, Ap. J. (Letters), 162, L69, 1970.
6. *J. R. P. Angel, J. D. Landstreet*, Ap. J. (Letters), 164, L15, 1971.
7. *J. C. Kemp, J. B. Swedlund, R. D. Wolstencroft*, Ap. J. (Letters), 164, L17, 1971.
8. *J. D. Landstreet, J. R. P. Angel*, Ap. J. (Letters), 165, L67, 1971.
9. *J. R. P. Angel, J. D. Landstreet*, Ap. J. (Letters), 165, L71, 1971.
10. *Ю. Н. Гнедин, А. З. Долгинов, Н. А. Силантьев*, Астрон. ж., (в печати); ЖЭТФ, 59, 865, 1970.
11. *В. А. Домбровский и др.*, Труды АО ЛГУ 22, 83, 1965.
12. *W. A. Hiltner, D. E. Mook, D. J. Ludden, D. Graham*, Ap. J. (Letters), 148, L47, 1967.
13. *A. R. Sandage et al.*, Ap. J., 146, 316, 1966.
14. *F. J. M. Barning*, BAN, 17, 22, 1963.
15. *H. L. Johnson*, Comm. LPL, 3, 73, 1965.
16. *G. Neugebauer, J. B. Oke, E. E. Becklin, G. Garmire*, Ap. J., 155, 1, 1969.
17. *T. Kitamura et al.*, Paper presented at 13-th COSPAR Meeting, Leningrad, 1970.
18. *B. Coppi, A. Treves*, Ap. J., 167, L9, 1971.
19. *K. Davidson, F. Pacini, E. E. Salpeter*, Preprint CRSR, 425, 1971.
20. *G. Chodil et al.* Ap. J., 154, 645, 1968.
21. *В. Е. Захаров, В. С. Львов*, ЖЭТФ, 60, 2066, 1971.
22. *М. Ф. Бахарева, В. Н. Ломоносов, Б. А. Тверской*, ЖЭТФ, 59, 2003, 1970.
23. *J. A. Westphal, A. Sandage, J. Kristian*, Ap. J., 154, 139, 1968.