

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 16

АВГУСТ, 1980

ВЫПУСК 3

УДК 524.35

ОБЪЯСНЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЗВЕЗДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГИПОТЕЗЫ ОБ «АКТИВНЫХ ДОЛГОТАХ» НА ПРИМЕРЕ U Mon

Т. А. ПОЛЯКОВА

Поступила 5 октября 1979

Пересмотрена 17 марта 1980

Качественно обсуждается гипотеза, объясняющая переменность некоторых звезд присутствием на их поверхности антиподальных активных областей. Направление поляризации при этом определяется средним направлением силовых линий магнитного поля над активной областью. Изменения параметров поляризации связываются с вращением такой звезды с периодом, равным удвоенному периоду наблюдаемого раздвоения некоторых спектральных линий.

1. *Введение.* В изменениях параметров поляризации со временем у некоторых физических переменных звезд большой светимости можно отметить следующую характерную особенность: значительное и быстрое изменение позиционного угла плоскости поляризации во время уменьшения степени поляризации. Такое поведение поляризации наблюдается неоднократно и хорошо заметно, если ряды наблюдений достаточно продолжительны и плотны. Подходящие ряды были получены, например, для звезд μ Ser, RW Ser, V CVn и U Her, сведения о которых собраны в [1]. Этот ряд звезд, хорошо обеспеченных наблюдениями поляризации, может быть дополнен звездами \circ Cet [2] (у которой изменения поляризации напоминают изменения у V CVn) и U Mon, которая по разносторонности собранного к настоящему времени наблюдательного материала оказалась в наилучшем положении из всех указанных звезд. Для нее имеется ряд поляриметрических и фотометрических наблюдений Серковского [3], а также продолжительный ряд спектральных наблюдений с высокой дисперсией, полученный Престоном [4]. Поэтому наблюдения U Mon (рис. 1) были выбраны в качестве материала для приложения предлагаемой ниже рабо-

чей гипотезы об активных областях на звезде, с помощью которой здесь будет сделана попытка осмыслить с одной позиции наиболее характерные особенности в изменениях поляризации, блеска и спектра этой звезды.

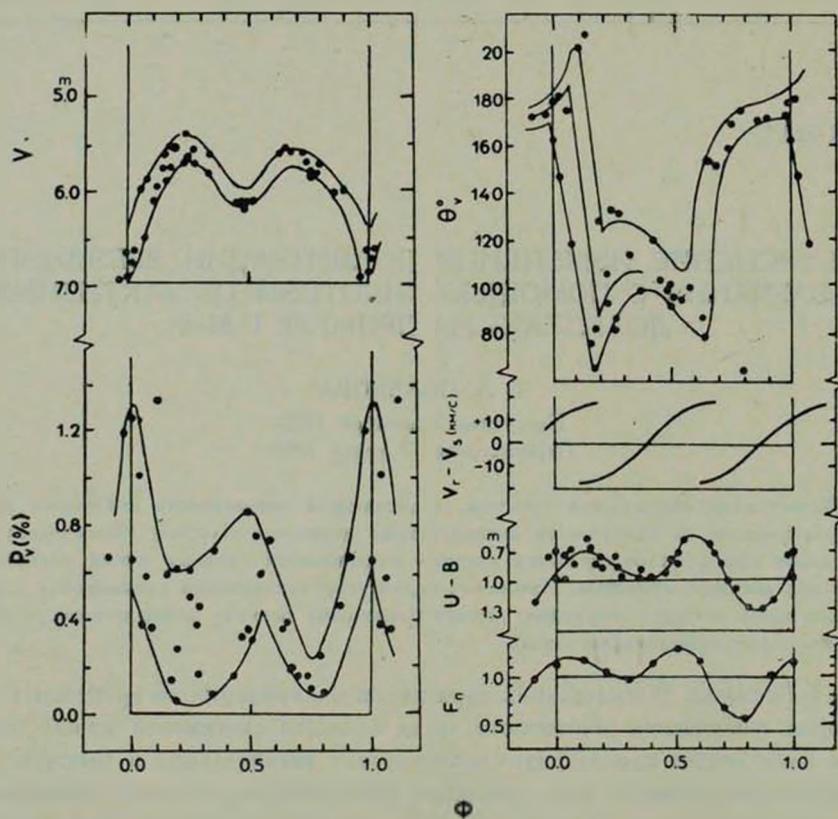


Рис. 1. Изменения блеска, цвета и собственной поляризации U Моп [3]; изменения лучевой скорости по линиям, показывающим раздвоение [4]; изменения поляризованного потока F_{Π} в относительных единицах.

2. О локализации источников поляризованного излучения звезд. Собственная поляризация света звезд чаще всего связывается с рассеянием их излучения в околозвездных газопылевых оболочках. Такое предположение основывается на том наблюдательном факте, что у звезд с собственной поляризацией обнаружены инфракрасные избытки. Для объяснения переменности поляризации при рассеянии в околозвездной оболочке предлагались процессы роста и разрушения пылевых частиц, связанные с температурными изменениями поверхности звезды. Однако более поздние исследования в ИК-диапазоне [5] приводят к заключению, что полное число частиц в околозвездных оболочках мало изменяется со временем, и поэто-

му изменяющуюся собственную поляризацию следует считать обусловленной эффектами рассеяния и поглощения в областях меньших характерных размеров, чем вся оболочка, если только не предполагать, что какие-нибудь причины вроде звездного ветра или магнитного поля могут переориентировать частицы во всей оболочке достаточно быстро (например, в течение нескольких дней).

С другой стороны, Шварцшильдом [6] было сделано предположение о неравномерном освещении оболочки разными участками поверхности сверхгигантской звезды, на которой случайное распределение очень крупных конвективных ячеек могло бы создавать участки разной яркости. Но при таких процессах изменения поляризации вряд ли могут носить регулярный характер.

Шаховской [7] предлагал объяснять происхождение собственной поляризации у гигантов спектральных классов от F до M молекулярным рассеянием излучения фотосферы в протяженных атмосферах этих звезд. При этом необходимо предположить значительную асимметрию в расположении плотных и разреженных участков в атмосферах звезд. Вообще исследователи все чаще приходят к выводу, что источники переменной составляющей поляризации звездного света могут быть локализованы вблизи атмосферы звезды и что эта составляющая скорее всего связана с какого-нибудь рода асимметрией. В этом случае для объяснения повторяемости в изменениях поляризации можно было бы использовать вращение звезд.

Механизм активной деятельности, ограниченной по широте, известен и на Солнце. Выяснено также, что действие этого механизма ограничено и по долготе [8, 9], то есть существуют довольно устойчивые «активные долготы», расположенные антиподально, которые сохраняются на протяжении нескольких циклов активности.

Если на других звездах возможна более сильная активность, чем на Солнце, то можно, вероятно, рассматривать существование там подобного механизма в качестве источника различных изменений в излучении. Предположив, что внутри звезд существует общее магнитное поле, как это предположил для Солнца Пиддингтон [10], можно также думать, что в силу общности законов взаимодействия магнитного поля с плазмой, его активность будет проявляться в ограниченных по широте и долготе областях на звезде.

Уместно вспомнить, что в последнее время для объяснения наблюдений не раз приходилось обращаться к неравномерности распределения или температуры (переменные типа BV Dga [11]), или химического состава (A_p -звезды [12]) по поверхности звезды. Кроме того, полученные недавно изображения поверхности некоторых переменных сверхгигантов свиде-

тельствуют о существовании крупномасштабных флюктуаций поверхностной яркостной температуры [13].

3. *Применение гипотезы об активных долготах для объяснения изменений в излучении U Mon.* По принятым в настоящее время представлениям U Mon (тип RV Tau) — пульсирующая переменная. Однако некоторые характерные особенности в изменениях спектров таких звезд не нашли еще окончательного объяснения в рамках пульсационной теории. К таким особенностям относятся, во-первых, раздвоение некоторых линий поглощения вблизи максимумов блеска. Во-вторых, в период глубокого минимума наблюдается появление сильных полос TiO, соответствующих спектральному типу M, хотя спектральная классификация по другим линиям дает на этих фазах тип G или K [14]. В-третьих, и это главное, здесь мы сталкиваемся с тем фактом, что между амплитудами изменения лучевых скоростей и амплитудами изменений блеска нет никакой корреляции [15]. Так, например, если два соседних минимума блеска различаются по глубине почти вдвое (как в рассматриваемом здесь случае U Mon), то в это время амплитуды изменений лучевых скоростей одинаковы [4].

В такой ситуации, возможно, будет не безынтересным хотя бы качественно обсудить в общих чертах непулсационную модель для U Mon, если в этой модели можно будет объяснить несколько большую совокупность наблюдательных данных.

1) Для U Mon сделаем следующие предположения: а) на поверхности этой звезды существуют две обширные антиподальные активные области разной площади и б) так как предполагается объяснить фотометрические, спектральные и поляризационные изменения света этой звезды изменением видимости активных областей вследствие вращения звезды, то предположим, что фотометрический период между глубокими минимумами (~ 92 дня) есть период вращения звезды.

2) Тогда следующее рассмотрение спектральных и фотометрических данных позволяет установить, что а) температура в активных областях меньше, чем на остальной поверхности звезды и б) направление оси вращения близко к картинной плоскости.

Действительно, а) так как спектральный класс U Mon изменяется от F8, Ib в максимуме до K0, Ib в глубоком минимуме, вычислим радиус сверхгигантов спектральных классов F8 и K0, исходя из светимости и показателя цвета, по формуле:

$$\lg R = 0.72(B - V)_0 + 0.2(-M_V) + 0.51, \quad (1)$$

где R — радиус звезды в единицах солнечного радиуса; $M_V = -4.07$ [16], а $(B - V)_0 = 1.35$ для случая K0 I [17] и $(B - V)_0 = 0.58$ для F8 I [17].

Тогда с периодом 92 дня найдем, что скорость вращения звезды К₀ должна составлять ~ 145 км/с, то есть на порядок превышает среднюю скорость вращения таких сверхгигантов; а во втором случае $v_e \approx 40.8$ км/с, что только вдвое больше средней скорости вращения для сверхгигантов класса F.

Кроме того, о том, что области, из-за которых происходит по предлагаемой гипотезе раздвоение спектральных линий, следует считать в среднем холодной остальной поверхности звезды, может свидетельствовать факт, отмеченный Престоном [4]: значительное раздвоение ограничивается линиями с уровней, имеющих потенциалы возбуждения $0.5 \text{ эВ} < \chi < 1.5 \text{ эВ}$, в то время как большинство линий с $1.5 \text{ эВ} < \chi < 2.5 \text{ эВ}$ — одиночные и имеют скорости, попадающие в интервал между величинами, получающимися для компонентов раздвоенных линий. В рамках предлагаемой модели эти наблюдения могут быть интерпретированы в том смысле, что вблизи максимума блеска те спектральные линии, которые сильнее или присутствуют только в излучении активных областей, будут наблюдаться раздвоенными, так как эти области видны на противоположных краях диска. Красный компонент при этом вскоре исчезнет (соответствующая область зайдет за край диска), а голубой будет постепенно смещаться на его место, линии же спектра горячих областей звезды не могут быть раздвоенными.

б) При сильном наклоне оси вращения U Mop к картинной плоскости заходящая активная область могла бы стать невидимой раньше выхода из-за противоположного края звезды другой активной области и линии не раздвоились бы, или (не в столь крайнем случае) компоненты раздвоенных линий изменялись бы по интенсивности противоположным образом каждые полпериода вращения звезды. Но Престон [4] подчеркивает, что в изменениях линий нет систематической разницы между циклами в 46 дней на протяжении всех наблюдавшихся девятнадцати циклов. Этот факт послужил основанием для предположения о том, что наклон оси вращения к лучу зрения не сильно отличается от 90° . Впоследствии, однако, нам встретится момент («забросы» θ), для объяснения которого необходим некоторый небольшой (около 15°) наклон оси вращения к картинной плоскости. Это требование не будет в противоречии с обстоятельством, отмеченным Престоном, если предположить, что в более открытом наблюдателю полушарии звезды расположена меньшая по площади активная область. Это приведет как раз к выравниванию компонентов спектральных линий при разных по площади активных областях.

Одним из признаков пульсаций считается наличие петли на двухиндексной диаграмме, проходимой представляющей точкой за период изменений блеска. Однако этот фотометрический эффект можно при желании

пытаться объяснить не только в рамках пульсационной теории. В предлагаемой здесь модели для его объяснения было бы, вероятно, достаточно предположить некоторую асимметрию активной биполярной области в смысле распределения или температуры или содержания металлов. Вследствие этого могут появиться достаточные (при наблюдающихся узких петлях [15]) изменения в распределении энергии по спектру из-за различия эффектов бланкетирования [17] при начале и конце минимума блеска.

3) Выясним теперь, можно ли в рамках предложенной гипотезы получить наблюдаемую амплитуду изменений блеска U Моп. Для этого оценим отношение излучаемых потоков в максимумах и минимумах блеска (максимумы будем считать одинаковой высоты). Для упрощения пренебрежем эффектом потемнения к краю, так как у сверхгиганта класса F потемнение к краю должно стать существенным на таком же (по порядку величины) относительном расстоянии (по отношению к радиусу звезды) от центра диска, как и у Солнца. «Запятненные» области, по аналогии с солнечными, должны бы занимать несколько вытянутые области, но для простоты подберем для них площади (~ 0.4 и ~ 0.2 от площади диска звезды) как площади дисков с радиусами $0.65R$ и $0.45R$, где R — радиус звезды. А площади видимых во время максимумов блеска участков активных областей (если пренебречь небольшим наклоном оси вращения к картинной плоскости), из-за перспективного сокращения положим равными примерно $1/6$ от их площадей (площади сегментов равны $\sim 0.2R^2$ и $\sim 0.1R^2$) (рис. 2). Тогда светимости L_1 — для глубокого минимума, L_2 — для максимума блеска и L_3 — для вторичного минимума запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \sigma T_1^4 [\pi R^2 - \pi (0.65R)^2] + \sigma T_2^4 \pi (0.65R)^2, \\ L_2 &= \sigma T_1^4 \left[\pi R^2 - \frac{\pi}{6} (0.65R)^2 - \frac{\pi}{6} (0.45R)^2 \right] + \\ &\quad + \sigma T_2^4 \frac{\pi}{6} [(0.65R)^2 + (0.45R)^2], \\ L_3 &= \sigma T_1^4 [\pi R^2 - \pi (0.45R)^2] + \sigma T_2^4 \pi (0.45R)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \sigma \pi R^2 (0.5775 T_1^4 + 0.4225 T_2^4), \\ L_2 &= \sigma \pi R^2 (0.8958 T_1^4 + 0.1042 T_2^4), \\ L_3 &= \sigma \pi R^2 (0.7975 T_1^4 + 0.2025 T_2^4), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где T_1 и T_2 — эффективные температуры для «незапятненной» области и для активных областей соответственно.

Предположим для «незапятнанной» поверхности звезды немного более ранний спектральный подкласс, чем наблюдается в максимуме блеска, для активных областей несколько более поздний, чем наблюдается в $\min I$:

Sp	T_e K	$T_e^4 \cdot 10^{14}$
F6	6500	17.851
K4	4000	2.560

Это вызвано тем, что в предлагаемой модели в максимумах и в минимумах блеска спектры должны быть смешанными, что, вероятно, и вызывает многие особенности и трудности спектральной классификации.

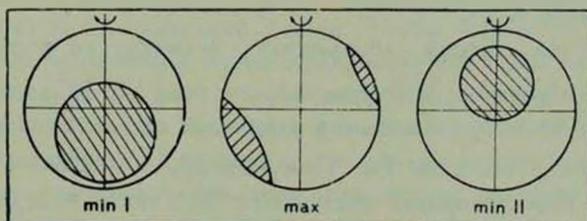


Рис. 2. Схема расположения активных областей при трех фазах изменений блеска.

Наблюдаемые средние звездные величины \bar{V} (из рис. 1) и болометрические поправки для сверхгиганта следующие [16]:

	\bar{V}	Sp	BC
max	5 ^m 6	F8	-0.2
min I	6.8	K0	-1.0
min II	6.1	G4	-0.4

Тогда отношения полных потоков будут: $F_{\max}/F_{\min I} = 1.44$ и $F_{\max}/F_{\min II} = 1.09$, а получающиеся при подстановке численных значений в уравнения (3) отношения светимостей: $L_2/L_1 = 1.43$ и $L_2/L_3 = 1.10$. Таким образом, если ~ 0.4 (в $\min I$) и ~ 0.2 (в $\min II$) площади диска звезды класса F6 будут заняты активной областью с эффективной температурой, пониженной на $\sim 2500^\circ$, то можно получить наблюдаемые амплитуды в изменениях блеска.

Активность антиподальных областей может быть различной и изменяться со временем, отчего главный и вторичный минимумы могут временами становиться одинаковыми или поменяться местами, что и наблю-

дается у звезд типа RV Tau. А отмечавшееся иногда прекращение колебаний блеска у этих звезд [15] может быть интерпретировано как окончание очередного цикла активности.

4) Оценим радиус U Моп пользуясь сделанными предположениями. Наблюдаемая при раздвоении спектральных линий скорость достигает 20 км/с [4]. Предположим, что эта скорость осуществляется на широте примерно $20^\circ \div 30^\circ$, тогда скорость на экваторе можно считать достигающей $25 \div 30$ км/с (при сделанной ниже оценке угла наклона оси вращения к лучу зрения $\sin i$ близок к 1). Такие значения скорости вращения не выходят за пределы v_* для сверхгигантов класса F [16]. Так как за период вращения мы приняли 92 дня, то для радиуса звезды получим следующие значения: $R_* \approx 46 \div 56 R_\odot$. Этот результат не находится в противоречии со значением, полученным в [18] для среднего радиуса звезд типа RV Tau ($100 R_\odot$).

Для контроля оценим абсолютную величину по формуле (1), где $(B-V)_0$ возьмем равным 0^m58 для сверхгиганта F8 [17], так как в максимуме блеска (из-за примешивания излучения от холодных областей) мы наблюдаем спектр F8, а не F6. Получим $M_V = -3^m6 \div 4^m1$, что не противоречит классификации светимости Ib, а также находится в согласии со средней M_V для звезд типа RV Tau (-3^m5), полученной в [18] при звездно-динамическом исследовании.

5) Теперь обратимся к изменениям поляризации излучения U Моп. Наблюдения U Моп приводят к следующей картине изменений параметров собственной поляризации (рис. 1): быстрые изменения позиционного угла плоскости поляризации происходят во время подъемов блеска. Это происходит как раз тогда, когда наблюдается раздвоение некоторых спектральных линий. Степень поляризации достигает максимумов при минимумах блеска.

У этой звезды имеется мощная газо-пылевая оболочка, о чем говорит очень большой показатель $[3.5 \text{ мкм}] - [11 \text{ мкм}] = 4^m2$ [19], и постоянное присутствие в спектре U Моп линий околозвездного происхождения [4]. Если оболочка сколько-нибудь не сферически симметрична, то в ней создается поляризация света. Однако непременная часть поляризации не входит в ту величину, которую Серковский выделил как собственную, так как метод, примененный им для определения межзвездной составляющей по наблюдаемой поляризации света самой звезды [3], отделяет в качестве собственной составляющей только переменную часть поляризации. Так как скорее надо считать, что общее количество пыли в оболочке почти постоянно [5], то переменная поляризация в оболочке могла бы возникнуть только при неравномерном освещении ее звездой, то есть необходимо

предположить какую-нибудь переменную асимметричность звезды. Серковский [3] предлагал объяснять изменения собственной поляризации у U Моп следствием несферических пульсаций звезды, приобретающей форму трехосного эллипсоида, которые должны происходить синхронно с вращением звезды. Такое предположение, как показал Серковский, может объяснить изменения позиционного угла, однако объяснить раздвоение линий в спектре U Моп этот механизм не может, оставляя это другим гипотезам (например, гипотезе об ударных волнах), выдвинутым раньше, когда еще не было возможности учесть поведение поляризации.

В предлагаемой здесь модели обсуждение фотометрических и спектральных данных приводит к выводу, что максимум степени поляризации, наблюдаемый во время минимума блеска, должен происходить, когда активная область проходит через центральный меридиан обращенной к наблюдателю стороны звезды. Однако степень поляризации у переменной звезды зависит и от изменений блеска. Чтобы выяснить, как на протяжении периода изменяется поток поляризованного излучения, умножим среднюю кривую изменения степени поляризации p_V на нормированную кривую изменения потока излучения в полосе V. Ход изменений поляризованного потока (рис. 1) в принципе не сильно нарушился по сравнению с изменениями степени поляризации. Его можно описать так, как будто во время глубокого минимума блеска появляется поляризованное излучение с позиционным углом $\theta \approx 170^\circ$, а во время вторичного минимума поляризованный поток вновь увеличивается, но теперь θ принимает значение $\sim 100^\circ$. Между этими максимумами поляризации происходит быстрое изменение угла θ от одного из указанных значений к другому. Так как разница $\Delta\theta$ составляет примерно 70° , то поляризованное излучение должно на центральном меридиане иметь направление колебаний электрического вектора, составляющее с экватором угол $\sim 35^\circ$. Не будем здесь конкретизировать механизм возникновения поляризованного потока над активными областями, но проследим за возможностями изменений θ в условиях предлагаемой модели. Чтобы две антиподальные области давали при прохождении через центральный меридиан поляризованный свет с различными позиционными углами, остается предположить, что направления плоскостей преимущественных колебаний определяются средним направлением магнитного поля над биполярными областями.

Задание направления поляризации с помощью магнитного поля дает возможность объяснить наблюдаемую особенность в изменениях позиционного угла собственной поляризации у этой звезды. Она состоит в том, что при переходе от $\sim 170^\circ$ к $\sim 100^\circ$ наблюдаются «забросы» угла сначала в сторону $\theta > 170^\circ$, а затем в сторону $\theta < 100^\circ$ (рис. 1). Такое явление могло бы наблюдаться при некотором наклоне оси вращения к кар-

тинной плоскости из-за кажущегося изменения наклона силовых линий поперечного магнитного поля над биполярной областью при ее смещении от центра видимой стороны звезды к краю. Схема, приведенная на рис. 3, должна пояснить это рассуждение в случае, когда направление преимущественных колебаний электрического вектора (стрелки) параллельно магнитному полю (тройные линии). На левой части рис. 3 представлено схематично ожидаемое при этом поведении позиционного угла, которое весьма похоже на изменения θ у U Mon (рис. 1).

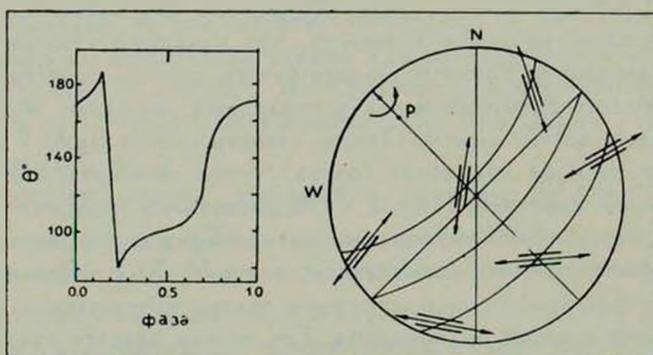


Рис. 3. Схема, поясняющая изменения позиционного угла θ при вращении звезды.

При таком объяснении из величины «забросов» угла θ можно определить приблизительно наклон оси вращения звезды. Проведя (от руки) среднюю кривую изменений θ , получим $90 - i \approx 15^\circ$.

4. *Заключительные замечания.* Несмотря на неполное рассмотрение некоторых аспектов, предпринятая попытка, кажется, приводит к непротиворечивому в целом описанию основных изменений параметров излучения U Mon на основе гипотезы об активных областях на поверхности звезды. Однако необходимо отметить, что здесь, как и в гипотезе Мензела [20] о перегретых пятнах на звезде, возникает проблема устойчивости этих образований, то есть в данном случае активных долгот, на поверхности звезды. Устойчивость активных долгот должна быть не меньшей, если не большей, чем у Солнца, а даже в случае Солнца это явление еще не нашло вполне достаточного объяснения.

Для разработанных к настоящему времени моделей внутреннего строения звезд это явление, как и причины, вызывающие активность, вообще представляют еще сложную проблему. Но от моделей звезд, о которых говорится в работе Минина [21], то есть звезд со сверхплотными ядрами типа нейтронных звезд, окруженных плазменными оболочками,

такой устойчивости можно было бы ожидать скорее, так как в поведении пульсаров, то есть ядер, оставшихся без плазменной оболочки, наблюдаются устойчивые эффекты, которые можно связать с такой геометрией магнитных полей, в которой естественно обнаруживается активность почти противоположных долгот (например, [22]). Интересно по этому поводу отметить, что в изменениях поляризации в излучении некоторых пульсаров наблюдаются разрывные изменения позиционного угла при уменьшении степени поляризации [23, 24]. А у пульсара в Крабовидной туманности в изменениях поляризации можно заметить черты, которые напоминают изменения θ у U Моп особенно если значения θ , взятые из работы [22], расположить не переходя значительно во вторую шкалу для θ (рис. 4). Здесь во время импульса и интеримпульса степень поляризации уменьшается почти до 0% и в это время θ быстро изменяется, демонстрируя уже упоминавшиеся «забросы». Возможно, что геометрическая сторона этого явления в некотором роде подобна и у пульсаров, и у сверхгигантов.

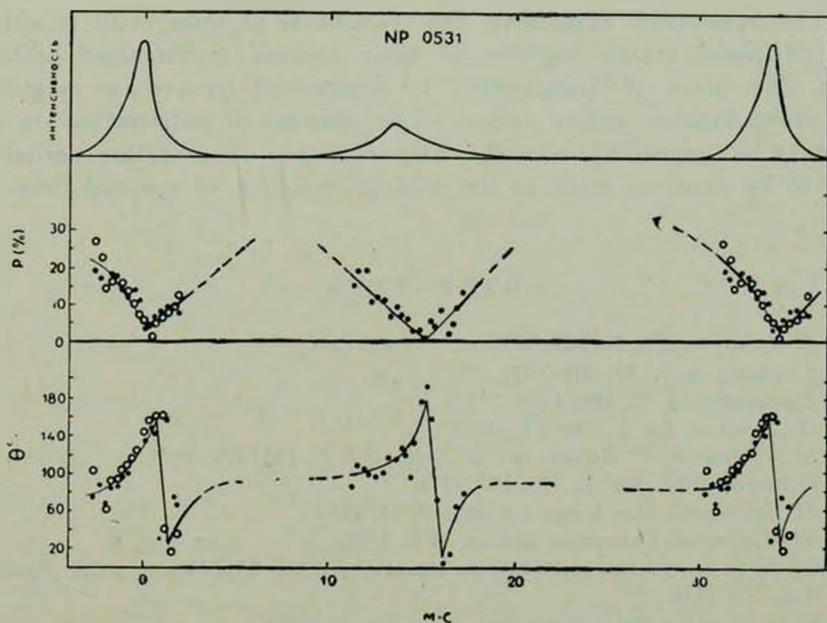


Рис. 4. Изменения поляризации пульсара P 0531 в оптическом диапазоне [22].

Во введении упоминалось о других звездах, у которых наблюдаются изменения θ при уменьшении степени поляризации. Вероятно, в разных случаях фотометрические и спектральные изменения, а также появление

поляризованного потока могут объясняться разными причинами, но при объяснении изменений со временем позиционного угла плоскости поляризации, возможно, часто будет полезно обращаться к магнитным полям звезд, которые могут определять, по крайней мере, геометрическую сторону этого явления. Подобный взгляд на роль магнитных полей в определении направления поляризации излучения некоторых объектов уже высказывался и другими исследователями [25].

Ленинградский государственный
университет

AN EXPLANATION OF STAR LIGHT POLARIZATION CHANGES BY AN "ACTIVE LONGITUDE" HYPOTHESIS WITH U MON AS AN EXAMPLE

T. A. POLYAKOVA

The hypothesis explaining the variability of some stars resulting from antipodal active regions on their surface is discussed qualitatively. The plane of polarization is determined by average magnetic field of the bipolar active region. The changes of polarization are assumed to be connected with the star rotation. The rotation period is taken to be twice as much as the period doubling of spectral lines.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. А. Полякова, ПЗ, 20, 523, 1978.
2. S. J. Shawl, A. J., 80, 602, 1975.
3. K. Serkowski, Ap. J., 160, 1107, 1970.
4. G. W. Preston, Ap. J., 140, 17, 1964.
5. W. J. Forrest, F. C. Gillett, W. A. Stein, Ap. J., 195, 423, 1975.
6. M. Schwarzschild, Ap. J., 195, 137, 1975.
7. Н. М. Шаховской, Изв. Крымской обс., 39, 11, 1969.
8. Ю. И. Витинский, Солнечные данные, № 3, 1958.
9. Наблюдения и прогноз солнечной активности, ред. П. Мак-Интош и М. Драйер, Мир, М., 1976.
10. J. H. Piddington, Proc. Astr. Soc. Austr., 2, 7, 1971.
11. П. Ф. Чулайнов, Изв. Крымской обс., 54, 85, 1976.
12. С. Мэгессис, Astron. Astrophys., 39, 263, 1975.
13. C. R. Lynds, S. P. Worden, J. W. Harvey, Ap. J., 207, 174, 1976.
14. G. W. Preston, Ap. J., 136, 866, 1962.
15. В. П. Цесевич, Пульсирующие звезды, ред. Б. В. Кукаркин, гл. 4, М., 1970.
16. К. У. Аллен, Астрофизические величины, Мир, М., 1977.

17. В. Страйжис, Многоцветная фотометрия звезд, гл. 6, Вильнюс, 1977.
18. Е. Д. Перепелкина, ПЗ, 7, № 71, 1950.
19. P. N. J. Wisse, M. Wisse, *Astron. Astrophys.*, 23, 463, 1973.
20. F. L. Whipple, *Lick Bull.*, No. 16, 1, 442, 1932.
21. И. Н. Минин, *Астрофизика*, 15, 121, 1979.
22. J. Kristian, N. Visvanathan, J. A. Westphal, G. H. Snellen, *Ap. J.*, 162, 475, 1970
23. R. N. Manchester, *Ap. J., Suppl. ser.*, 23, 283, 1971.
24. R. N. Manchester, J. H. Taylor, J. R. Huguenin, *Ap. J.*, 196, 83, 1975.
25. Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов, *Изв. Крымской обс.*, 56, 39, 1977.