

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ КРАСНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ
ЗВЕЗД ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ

В. А. ДОМБРОВСКИЙ

Поступила 25 декабря 1969

Рассмотрены результаты многоцветных поляриметрических наблюдений ряда красных переменных звезд высокой светимости, сделанных в течение нескольких последних лет в АО АГУ. Излучение многих из этих звезд обладает собственной поляризацией, которая во всех случаях найдена переменной. Установлено, что степень поляризации и пределы ее изменений возрастают с уменьшением длины волны, позиционный же угол плоскости колебаний для большинства звезд оказался в общем независимым от длины волны, хотя его значения в отдельные моменты времени найдены заметно различными в разных цветах. Поведение поляризации со временем найдено различным у разных звезд, меняющимся со временем у каждой звезды и обремененным множеством неправильностей. Для ряда звезд установлена связь между изменениями поляризации, блеска и цвета. На рис. 1—3 представлено поведение поляризации — p и θ —, блеска V и показателя цвета $B-V$ для $V CVn$, $X Her$ и $Z UMa$. Для нескольких звезд длинноволновая зависимость поляризации была прослежена до $\lambda \approx 2.5 \mu$ (рис. 4). АК Peg изучена спектрополяриметрически (рис. 5).

Обсуждены различные гипотезы, выдвинутые для объяснения собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости. Найдено, что наиболее вероятным представляется механизм возникновения поляризации в излучении этих звезд при его рассеянии в облаках околосредней материи.

В последние годы было установлено, что излучение многих красных переменных звезд высокой светимости — долгопериодических, полуправильных, неправильных переменных — заметно поляризовано. Эта поляризация в большинстве случаев должна быть признана „собственной“. То, что ее, как правило, нельзя считать межзвездной, вытекает из следующего: 1) Значительная поляризация найдена у многих звезд, расположенных в высоких галактических широтах, где нельзя ожидать сколько-нибудь заметной межзвездной поляризации. 2) Ее длинноволновая зависимость оказалась отличной от длинноволновой зависимости

ти межзвездной поляризации. 3) Для большинства звезд была установлена переменность поляризации и для некоторых из них найдена связь изменений поляризации с изменениями других характеристик звезд. Конечно, можно не сомневаться, что в отдельных случаях мы должны иметь дело и с поляризацией, возникшей от сложения собственной и межзвездной поляризации и нужно заметить, что тогда выделение собственной поляризации оказывается довольно сложной задачей.

Несмотря на то, что с момента открытия собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости прошло уже несколько лет, ее характер и, самое главное, закономерности поведения со временем и, особенно, в связи с изменением других параметров звезды все еще изучены плохо и это до сих пор не дало возможности предложить достаточно обоснованную ее интерпретацию.

Исходя из желания получить материал для суждения об основных чертах собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости и, самое главное, об особенностях ее поведения со временем, в Астрономической обсерватории Ленинградского государственного университета еще в 1964 г. были начаты систематические наблюдения некоторых из этих звезд. Программа наблюдений затем, в 1967 г. и последующих годах, была значительно расширена. Сейчас в нее входят наблюдения ряда переменных звезд ранних типов, в том числе Миры Кита, RV Тельца, полуправильных и неправильных переменных звезд, принадлежащих к различным спектральным классам: K — M, C, S.

Большинство поляриметрических наблюдений, которые, начиная с 1965 года, было найдено полезным сопровождать фотометрическими и колориметрическими оценками, выполнено на 20" рефлекторе с одноканальным электрофотометром, приспособленном для фотометрических и поляриметрических наблюдений, установленном на Бюраканской астрофизической станции Астрономической обсерватории Ленинградского государственного университета [1]. Методика поляризационных измерений была обычной, принятой в АО ЛГУ [2]. Сведения о всех усовершенствованиях в аппаратуре или в методике наблюдений, произведенных за эти годы, содержатся в работах [3—5]. Начиная с 1965 года, поляризационные измерения обычно делались уже отдельно в разных спектральных областях, как правило, полосах стандартной фотометрической системы UBVR, хотя при ослаблении блеска звезды иногда приходилось переходить к более широким полосам. В этой же стандартной системе делались и фотометрические оценки. Точность измерений степени поляризации, определяемая через σ_p , нормально

была порядка $0.10 - 0.15\%$ и, соответственно, σ_p составляло $28^{0.5} \sigma_p / p$. Эта точность, как правило, падала при наблюдениях в полосе U, при ослаблении блеска звезды ниже 10^m или при наблюдениях в особо неблагоприятных условиях. Точность фотометрических оценок была обычной для фотоэлектрической методики.

Некоторое количество наблюдений было получено на 9" рефракторе с одноканальным электрофотометром, тоже приспособленном для проведения фотометрических и поляриметрических наблюдений, установленном на учебной обсерватории в Ленинграде. Из-за неблагоприятных атмосферных условий в Ленинграде точность этих наблюдений была несколько ниже точности наблюдений в Бюракане.

В 1969 году, для того, чтобы расширить спектральный интервал, охватываемый поляриметрическими и фотометрическими наблюдениями, параллельно с описанными выше наблюдениями в видимой области спектра были поставлены для некоторых наиболее ярких звезд эпизодические наблюдения и в инфракрасной области. Для этой цели использовались созданные в АО ЛГУ два ИК-фотометра—один с фотоумножителем, имеющим кислородно-цезиевый фотокатод (ФЭУ—62), другой—с серно-свинцовым фотоспротивлением [7]. Питательной системой в обоих случаях служил 25" зеркальный телескоп, установленный на Бюраканской станции АО ЛГУ. Поляриметрические и фотометрические наблюдения делались обычно в полосах J и K. К сожалению, этим наблюдениям, особенно в полосе K, оказались доступными лишь очень немногие из объектов, наблюдаемых нами в видимой области спектра. Чтобы охватить наблюдениями возможно большее число объектов, часть наблюдений более слабых звезд была сделана в широкой спектральной области $0.8 - 2.5 \mu$. Точность ИК-наблюдений благодаря тому, что аппаратура обычно использовалась на пределе возможностей, была заметно ниже точности наблюдений в видимой области спектра.

В том же 1969 году, для получения дополнительного материала для интерпретации собственной поляризации излучения красных переменных звезд высокой светимости, некоторые из этих звезд, уже включенные в нашу программу поляризационных исследований, были дополнительно изучены спектрополяриметрически. Изучение было проведено фотографическим путем. Для наблюдений использовался сконструированный и изготовленный в АО ЛГУ дифракционный спектрограф с дисперсией $340 \text{ \AA/мм}$, установленный в ньютоновском фокусе 18" зеркального телескопа Бюраканской станции АО ЛГУ. Для каждой изучаемой звезды получалось по несколько пар спектрограмм с поляроидом, помещенным перед диагональным зеркалом 18" телескопа таким обра-

зом, что его плоскость пропускания в одном снимке совпадала с плоскостью преимущественных колебаний в излучении звезды, в другом была ей перпендикулярна. Каждая такая спектрограмма сопровождалась калибровочным снимком. Так как не принималось никаких специальных мер, обеспечивающих сравнение полученных пар снимков между собой, они не позволяли выводить абсолютные значения поляризации в разных длинах волн, но позволяли судить о ее изменении в зависимости от длины волны.

Оригинальные наблюдения частично уже опубликованы в „Трудах АО ЛГУ“ [4, 5], остальные будут опубликованы в ближайших томах „Трудов“. Настоящее исследование основывается прежде всего на результатах этих наблюдений, однако были привлечены и известные нам результаты других наблюдателей.

Этот материал уже сейчас позволяет сделать ряд заключений, которые, естественно, должны будут приниматься в расчет при любой попытке дать интерпретацию собственной поляризации. Здесь нам представляется нужным отметить прежде всего то, что собственная поляризация до сих пор была найдена лишь в излучении переменных звезд; в излучении же красных звезд высокой светимости, но постоянных по блеску, собственная поляризация найдена не была. Это заключение основывается на поисках собственной поляризации в излучении красных гигантов, предпринятых Р. Р. Цаппала [8] и Р. А. Варданяном [9]. Однако их поиски не обладают необходимой полнотой, чтобы это заключение могло считаться окончательным. Далее, представляется важным отметить, что собственную поляризацию до сих пор удалось открыть в излучении даже далеко не всех переменных звезд. Можно принять, что современные наблюдения позволяют ее уверенно выявлять, когда она составляет не менее нескольких десятых долей процента. При этом ограничении наблюдения показывают, что излучение многих красных переменных звезд должно считаться практически неотягченным собственной поляризацией. Так наши, охватывающие достаточно длительные интервалы времени, наблюдения γ CVn, Т Сер, α Her, ρ Per и ряда других звезд не показали присутствия поляризации более 0.2—0.3%. У некоторых же звезд она была найдена значительной, но постоянной, и мы не нашли оснований считать ее не межзвездной (например, поляризация с $p = 0.8\%$ при $\theta = 170^\circ$ у UX Dra). Аналогичное заключение об отсутствии собственной поляризации, большей 0.2—0.3% у ряда красных переменных звезд высокой светимости можно сделать и из наблюдений других наблюдателей, например Х. Дика [10].

И, вместе с тем, сейчас можно назвать много красных переменных звезд высокой светимости, присутствие собственной поляризации в излучении которых является несомненным. Эта поляризация по нашим данным и данным других наблюдателей в коротковолновой области спектра может достигать очень больших значений (порядка 20% у VY CMa по наблюдениям АО АГУ, данным К. Серковского [11] и др., порядка 10% у V CVn и L₂Pup, согласно работе А. Крушевского, Т. Герелса, К. Серковского [12] и т. д.).

Число переменных, в излучении которых присутствие собственной поляризации установлено достаточно уверенно, достигает сейчас, по крайней мере, 50 звезд, и несомненно этот список отнюдь не полон, т. к. работы по поискам собственной поляризации еще весьма далеки от завершения. При этом собственная поляризация найдена в излучении красных переменных звезд самых различных типов переменности: Миры Кита, полуправильных и неправильных переменных, примыкающих к ним звездах типа RV Тельца; у звезд, принадлежащих, вместе с тем, к различным спектральным классам: K—M, C, S. Но необходимо заметить, что материал пока еще слишком мал и неоднороден, чтобы служить основой для каких-либо статистических изысканий.

Для разработки теории возникновения собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости, нам кажется, очень большое значение должно иметь заключение, полученное нами из рассмотрения звезд с поляризованным и неполяризованным излучением, что сейчас представляется невозможным указать какое-либо очевидное различие между ними. И те, и другие могут обладать совершенно одинаковым характером переменности, и у тех, и у других могут быть совершенно одинаковые спектры.

Имеющийся сейчас наблюдательный материал свидетельствует о том, что собственная поляризация в излучении красных переменных звезд высокой светимости во всех случаях является переменной. Однако не следует забывать, что именно переменность поляризации всегда служила одним из основных аргументов в пользу того, чтобы признать ее собственной.

Попытки установить закономерности в поведении собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости со временем, используя длительные ряды наблюдений отдельных звезд, полученные в АО АГУ, выявили очень сложную картину ее поведения. Характер изменений оказался весьма различным у разных звезд, и для каждой звезды сами изменения были найдены в свою очередь меняющимися со временем. Эти ряды наблюдений показывают также, что многочисленные сообщения о том или ином поведении

поляризации в излучении отдельных звезд, неоднократно делавшиеся различными наблюдателями на основании весьма непродолжительных рядов их наблюдений, как правило, не могут претендовать на сколько-нибудь общее значение. При установлении закономерностей в поведении поляризации нужно также иметь в виду, что наложение на собственную поляризацию межзвездной может существенно исказить ее поведение. Поэтому нам представляется целесообразным такие случаи, до надежного учета действия межзвездной поляризации, исключить из рассмотрения. Из-за этого к настоящему рассмотрению не привлекались звезды, в излучении которых предполагается присутствие межзвездной поляризации. Именно по этим соображениям и была исключена из рассмотрения μ Сер, хотя для нее мы располагаем серией наблюдений наибольшей продолжительности.

Ниже рассматривается поведение поляризации у трех полуправильных переменных, которые наблюдались в АО ЛГУ в течение нескольких лет.

V Canum Venaticorum является полуправильной переменной звездой с довольно четко выраженной переменностью (тип S Ra, период 192 дня). Ее спектральный класс M4e — M6e. Большая галактическая широта звезды ($b = +71^\circ$) не дает оснований предполагать присутствие в ее излучении сколько-нибудь значительной межзвездной поляризации.

V CVn регулярно наблюдалась в АО ЛГУ на предмет изучения поведения поляризации в ее излучении с 1966 по 1969 г. На основании, прежде всего, этих наблюдений, а также небольшого количества наблюдений, опубликованных в работах К. Серковского [13, 14] и А. Крушевского, Т. Герелса и К. Серковского [12] и единичных оценок других наблюдателей, на рис. 1 в его полосах а) и б) представлено поведение поляризации — p и θ — V CVn в цветах В и V с 1966 г. по 1969 г. Сплошными кружками представлены значения p_B и θ_B , а незаполненными кружками — значения p_V и θ_V . Неуверенно определенным значениям соответствуют кружки меньшего размера. На том же рис. 1 в полосах в) и г) представлено поведение блеска и цвета — V и (B — V) — V CVn тоже, прежде всего, на основании наблюдений АО ЛГУ. В полосе г) точками нанесены кроме того значения блеска звезды, полученные из усредненных и редуцированных к нашей системе ее визуальных оценок, взятых из [15].

Из рис. 1 видно, что изменение степени поляризации V CVn в рассматриваемый период времени происходило в цветах В и V в общем синхронно. При этом p_B обычно было больше p_V и амплитуда колебаний p_B также была большей; что же касается позиционного

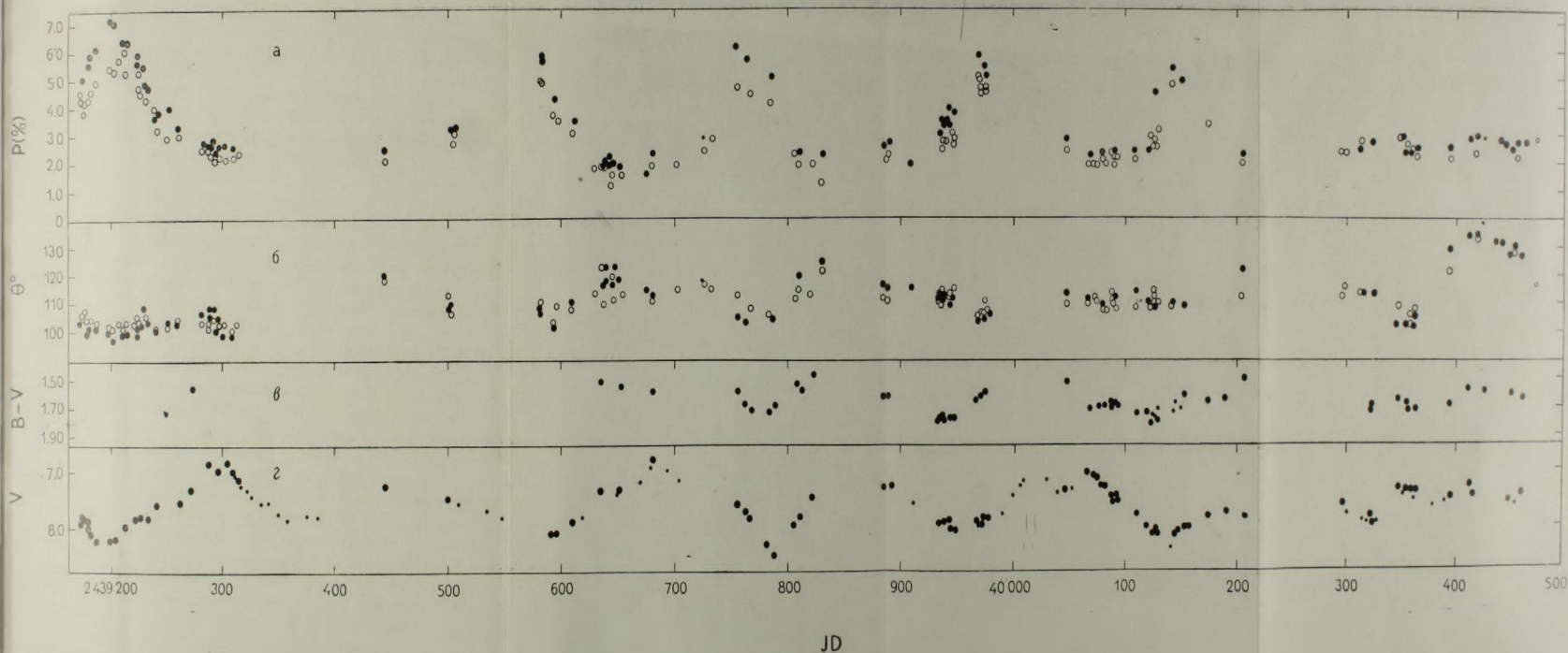


Рис. 1. Поведение поляризации, блеска и цвета V CVn за период 1966–1969 гг. (показания к рисунку в тексте).

угла плоскости преимущественных колебаний θ , то хотя θ_B в некоторые периоды заметно и отличалось от θ_V , в целом, для всего периода наблюдений, сколько-нибудь значительных систематических различий между ними отметить нельзя.

Заключения такого же характера можно получить и из не представленных на рисунке наблюдений в других цветах U , R , I . Таким образом наблюдения позволяют утверждать, что степень поляризации в излучении $V CV_n$ зависит от длины волны, увеличиваясь с ее уменьшением. При этом изменения величины поляризации происходят синхронно во всех длинах волн, но с амплитудой, увеличивающейся с уменьшением длины волны. Положение же плоскости преимущественных колебаний, несмотря на некоторые ее различия для разных цветов в отдельные моменты времени, в общем должно быть признано от длины волны независимым и меняющимся во всех длинах волн одинаково.

Степень поляризации в излучении $V CV_n$ в 1966 и 1969 гг. была всегда значительной и явно переменной. При этом в переменности нетрудно усмотреть черты периодичности. Обычно поляризация более или менее плавно колебалась около уровня 2^0_0 и на эту поляризацию периодически, через интервалы времени примерно равные периоду изменения блеска звезды, накладывались как бы „всплески“ поляризации, когда она в лучах B достигала $6-7^0_0$, а в лучах U еще больших значений. Однако вся картина изменений степени поляризации представляется крайне нестационарной, подтвержденная многими иррегулярностями, вплоть до того, что в 1969 г. на месте ожидаемого „всплеска“ поляризации наблюдалось лишь плавное и очень незначительное ее повышение. Позиционный угол плоскости преимущественных колебаний испытывал сравнительно небольшие изменения в пределах примерно 15° в ту и другую сторону от среднего значения $110-115^\circ$. При этом мы не смогли заметить никаких закономерностей, тем более периодичности в этих изменениях или связи в изменении θ с изменениями p .

Изменение блеска $V CV_n$ в 1966--1969 гг. являлось, как это видно из рис. 1, обычным для звезд типа SRa . Кривые изменения блеска в рассматриваемый период времени были весьма сходные с теми, которые для нее получались ранее. При этом максимумы блеска опережали эфемериду от элементов ОКПЗ примерно на 45 дней. Изменение блеска сопровождалось изменением цвета. Обращает на себя внимание, что показатель цвета $B-V$ достигал наибольших значений обычно несколько ранее минимумов блеска. Изменение показателя $U-B$, не представленного на рисунке, происходило гораздо более иррегулярно в пределах 1^m07-1^m54 и связь его изменений со световой кривой кажется выражена гораздо слабее.

Сопоставление фотометрических наблюдений с поляризационными показывает, что между изменениями поляризации и блеска V CVn существует вполне определенная зависимость — всплески поляризации всегда приходятся на эпохи минимумов блеска. Интересно отметить, что в 1969 году, когда не наблюдался очередной „всплеск“ поляризации, минимум блеска звезды был заметно менее глубоким, чем обычно.

X Herculis является полуправильной переменной (тип SRb) с колебаниями блеска, не превосходящими в фотографических лучах 1^m1. Временами четко выявляется 95 дневный период этих колебаний, иногда же они вообще почти совершенно исчезают. Спектральный класс звезды определен как Mbe. Достаточно большая галактическая широта звезды ($b = +47^\circ$) не допускает, так же, как и в случае V CVn, присутствия в ее излучении значительной межзвездной поляризации.

Результаты поляриметрических и фотометрических наблюдений X Her в цветах В и V, выполненных в АО ЛГУ в 1967—1968 гг., приведены на рис. 2. Построение этого рисунка и принятые на нем обозначения аналогичны таковым рис. 1. В полосе г) рис. 2, помимо полученных в АО ЛГУ фотозлектрических оценок величины V, использованы усредненные и редуцированные к нашей системе визуальные оценки блеска X Her из [15] (они представлены точками).

Из рис. 2 видно, что поляризация излучения X Her в рассматриваемый период в цветах В и V вела себя сходным образом. При этом у X Her, так же, как и у V CVn, величина p_B всегда была заметно больше p_V , а θ_B от θ_V систематически не отличалось. Включения такого же характера могут быть сделаны и на основании наблюдений в других цветах U, R, I, которые на рисунке не представлены, но являются достаточно многочисленными для получения уверенных выводов. Таким образом изменение степени поляризации излучения X Her может быть принято происходящим подобным образом во всех цветах, но p_U всегда больше p_B ; p_B , в свою очередь, больше p_V и, далее, p_R и p_I ; положение же плоскости поляризации представляется в целом независимым от цвета.

Поляризация излучения X Her вообще невелика. В 1967 г. она почти все время была мала, в 1968 г. заметно возросла, а в 1969 г. снова уменьшилась. При этом изменения ее величины носили плавный характер. Положение плоскости преимущественных колебаний также менялось плавно между, примерно, 30 и 70°, но без всякой видимой связи с изменением степени поляризации. Большой разброс значений θ в 1967 г. объясняется, очевидно, прежде всего малостью в этот год самой величины поляризации.

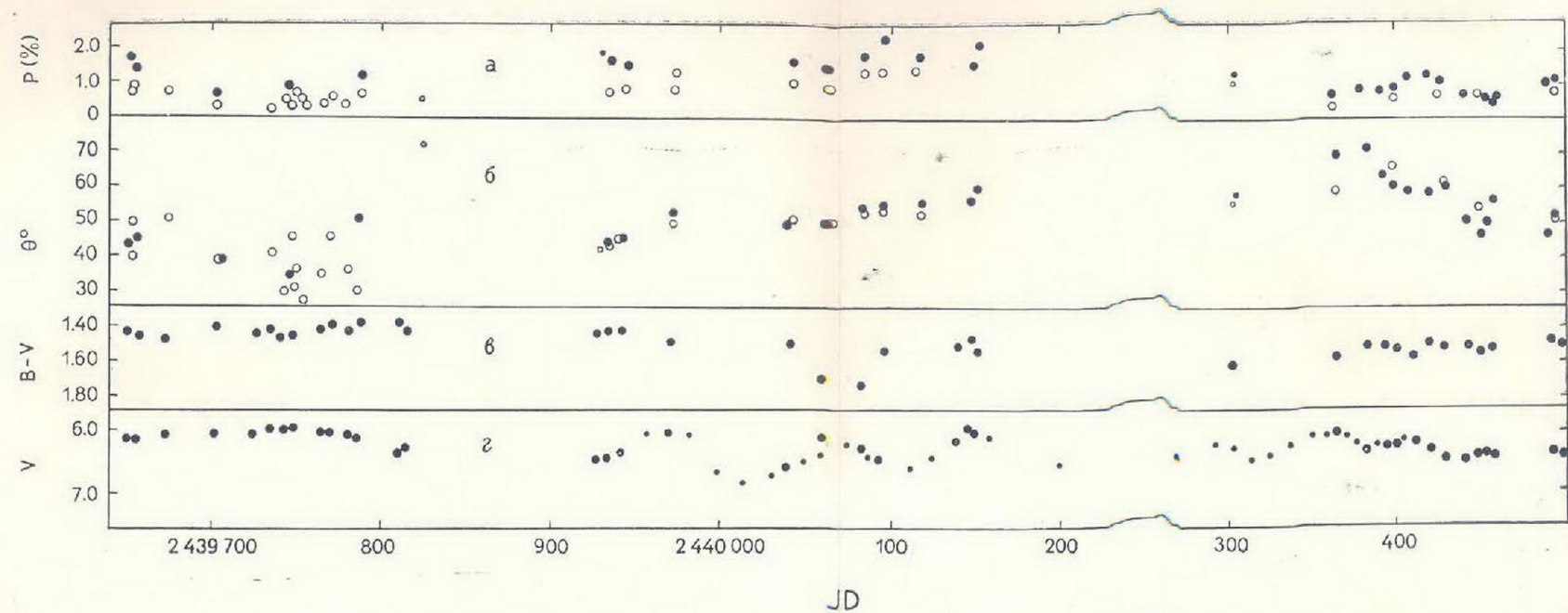


Рис. 2. Поведение поляризации, блеска и цвета X Her за период 1968—1969 гг. (подснения к рисунку в тексте).

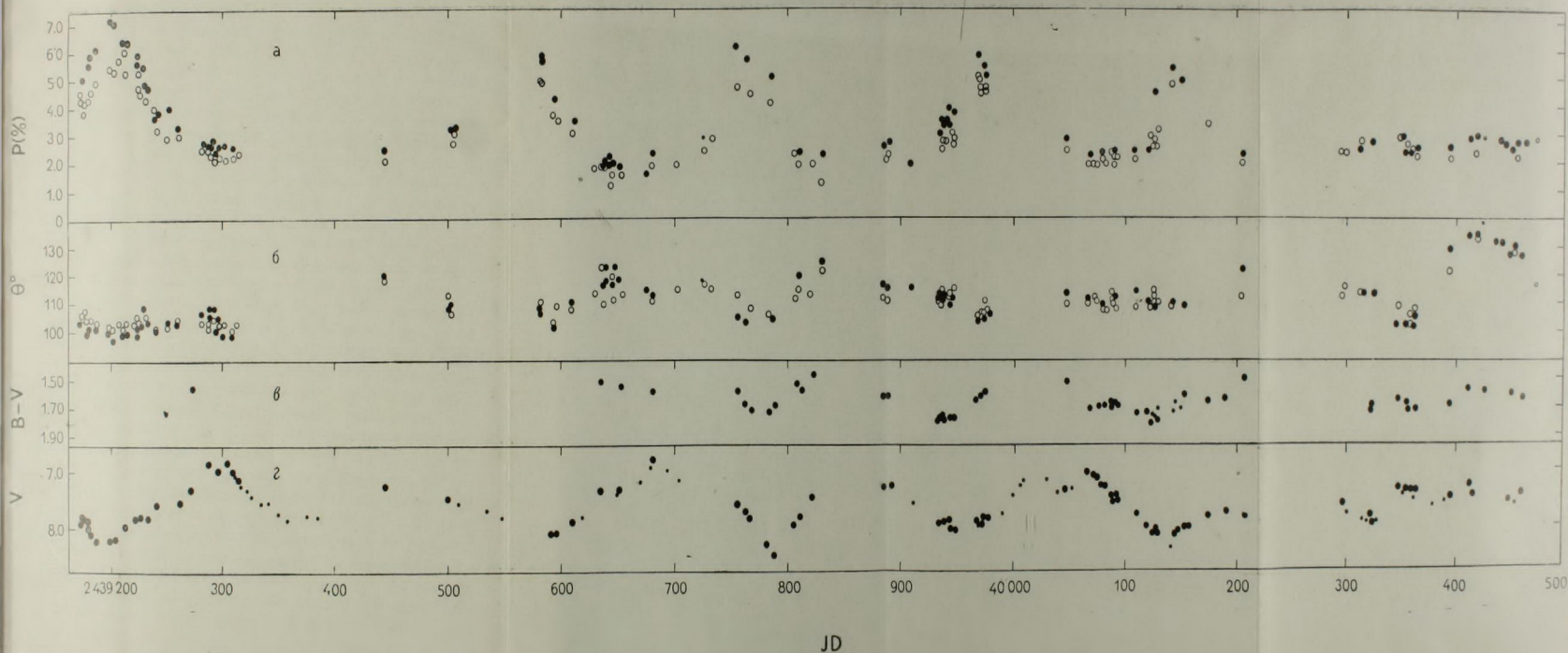


Рис. 1. Поведение поляризации, блеска и цвета V CVn за период 1966–1969 гг. (показания к рисунку в тексте).

В 1967 г. блеск X Her менялся мало и был близок к максимальному; в 1968 г. звезда была заметно более активна и в изменениях ее блеска можно проследить 95-дневный период; в 1969 г. снова звезда стала более спокойной. Изменения показателя цвета $B-V$ были наиболее значительными также в 1968 г., но мы не усмотрели связи в изменениях величины $B-V$ с изменением блеска. То же самое можно сказать и об изменении не представленного на рисунке показателя цвета $U-B$.

Изменения поляризации излучения X Her в 1967 г. не кажутся находящимися в зависимости от изменений ее блеска. Единственное, что, вероятно, можно отметить, это то, что наиболее значительная поляризация в излучении звезды наблюдалась в то время, когда она находилась в активной стадии.

Z Ursae Majoris принадлежит к полуправильным переменным звездам (тип SRb). Кривая изменения блеска имеет черты звезд типа RV Тельца. Период изменения блеска Z UMa был найден равным 198 дням, амплитуда колебаний блеска — $2^m.5$ (в фотографических лучах), спектральный класс — M5 III с небольшими изменениями в течение периода. Высокая галактическая широта Z UMa ($b = +58^\circ$) снова, как и для рассмотренных выше звезд V CVn и X Her, делает невероятным присутствие в ее излучении сколько-нибудь заметной межзвездной поляризации.

На рис. 3 в полосах а) и б) представлено поведение поляризации — p и θ — Z UMa в лучах В и V на основании наблюдений АО ЛГУ за 1967—1968 гг. и наблюдений К. Серковского [14] за 1966 г. В полосах в) и г) того же рисунка представлены параллельно выполненные измерения величин V и $B-V$. Обозначения на рис. 3 те же самые, что и на предыдущих рисунках. Точками в полосе г) представлены усредненные и приведенные к нашей системе оценки блеска, введенные из визуальных наблюдений в [15, 16].

Поляризация в излучении Z UMa в рассматриваемый период была обычно мала, как правило меньше 0.5%, причем в цвете В несколько больше, чем в V и явно переменна. Изменения поляризации носили в основном характер „всплесков“ не вполне одинаковых, гораздо меньших, чем у V CVn, но повторявшихся так же, как у нее, периодически, примерно через каждые 200 дней. Во время них поляризация доходила до 2.5% в цвете В и 1.5% в цвете V. Положение плоскости преимущественных колебаний испытывало большие, в пределах приблизительно $160-60^\circ$, плавно протекающие изменения, одинаковые в цветах В и V, без видимой регулярности и связи с изменениям в степени поляризации. Измерения поляризации в цветах U и R были немногочисленны,

но они согласуются с представлением об увеличении степени поляризации с уменьшением длины волны и о независимости от нее положения плоскости колебаний.

В колебаниях блеска Z UMa в излучаемый период можно четко проследить главные минимумы, которые происходили с опережением эфемериды по элементам ОКПЗ примерно на 20 дней. Параллельно менялся показатель цвета $B-V$ от 1^m3 в максимуме блеска до 1^m75 в моменты, немного предшествующие минимумам. Сопоставление кривых изменения поляризации и блеска показывает, что все вспышки поляризации Z UMa в 1966—1968 гг. падали на минимум блеска.

Столь же различное поведение поляризации было найдено и у других изучавшихся в АО ЛГУ красных переменных звезд высокой светимости. На основании наблюдений АО ЛГУ и опубликованных наблюдений других авторов у одних звезд были установлены большие изменения в степени поляризации при относительно малых изменениях в положении плоскости поляризации, так что картина напоминала найденную выше для V CVn. Например, у AK Peg наблюдалась поляризация, доходящая в цвете В почти до 6%, при изменениях положения плоскости преимущественных колебаний в пределах меньших 20°. У R Gem была найдена поляризация с p_B в пределах от значений близких к нулю до, примерно, 5.5%, в то время как θ менялось в пределах меньших 40°. У других звезд, наоборот, были отмечены значительные изменения в положении плоскости преимущественных колебаний при относительно небольших изменениях в величине поляризации, так что картина напоминала наблюдаемую у Z UMa. Например, у S UMa были зарегистрированы значения θ в пределах от 30 до 170°, в то время как p_B никогда не превышало 2%. Кажется, что наиболее значительные изменения положения плоскости преимущественных колебаний имеют место тогда, когда сама поляризация невелика и наоборот. Однако у U Her обнаружены значительные колебания величины поляризации— p_B найдено меняющимся в пределах от 0.2—0.3% до 4.5%, но и положение плоскости преимущественных колебаний от одного наблюдательного сезона к другому в 1966—1968 гг. менялось почти на 90°, хотя внутри сезонов изменения ее положения были невелики.

В ряде случаев, как по наблюдениям АО ЛГУ, так и по опубликованным наблюдениям других авторов, была обнаружена довольно четкая связь изменений поляризации с изменениями блеска звезды. Наиболее часто наблюдается увеличение поляризации при уменьшении

блеска. Однако это имеет место не всегда, например у U Her в 1967—1969 гг. максимумы поляризации приходились на эпохи, лишь немного предвещающие максимумы блеска. Кроме того, как уже отмечалось выше, поведение поляризации у всех звезд является настолько нестационарным, меняющимся от цикла к циклу изменений блеска, что и зависимость изменений поляризации от изменения блеска в разных циклах имеет сплошь и рядом совершенно различный характер. Примером этого, помимо случаев, которые можно найти в вышеприведенном наблюдательном материале, может служить S CrB—звезда типа Миры Кита с весьма регулярным характером изменений блеска, у которой в разных циклах этих изменений найдена весьма различная поляризация. Вместе с тем в отдельные интервалы времени у многих из этих звезд можно проследить очень четкую связь между изменениями поляризации и изменениями блеска. К сожалению, наблюдательный материал пока еще совершенно недостаточен для изучения всех этих особенностей в поведении поляризации.

Поляризация, одновременно измеренная в разных цветовых полосах, почти всегда была найдена тем большей, чем меньше эффективная длина волны цветовой полосы. Изменения поляризации со временем найдены почти во всех случаях происходящими синхронно в разных цветах, с амплитудой, обычно растущей с уменьшением длины волны и при наложении многих иррегулярностей, подчас значительно искажавших общую картину.

Положение плоскости преимущественных колебаний для всего ряда измерений какой-либо звезды в целом, как правило, оказывается независимым от цвета, хотя в отдельные эпохи зависимость ее положения от цвета проступает достаточно отчетливо. Однако есть звезды, у которых различие положения плоскости колебаний в разных цветах весьма значительно и, по-видимому, присутствует постоянно. Примером этого может служить VV CMa, позиционный угол плоскости преимущественных колебаний для которой, согласно наблюдениям АО ЛГУ, осенью 1966 года найден меняющимся, примерно, на 60° при переходе от полосы К к полосе U. К. Серковский [16] весной 1969 г. нашел значения: $\theta_V = 162^\circ$ и $\theta_U = 185^\circ$ и О. Шол [17] тоже весной 1969 г. нашел ряд значений θ от 125° для $\lambda_{eff} = 0.94 \mu$ до 185° для $\lambda_{eff} = 0.36 \mu$.

Сильная зависимость степени поляризации от длины волны является характерной особенностью собственной поляризации звездного излучения. Очевидно, выяснение характера этой зависимости представляет большой интерес. Наиболее обширные ее исследования выполнены А. Крушевским, Т. Герелсом и К. Серковским [12]. Они нашли из измерений поляризации в области от 0.33 до 0.95μ , что ее непре-

рывное уменьшение с увеличением длины волны, известное раньше для видимой области, простирается и на ИК-область. Однако зависимость поляризации от длины волны оказалась несколько различной у разных звезд и, в частности, у звезд спектральных классов М и С.

Пользуясь случаем отметить, что наложение на собственную поляризацию межзвездной должно приводить к искажению длинноволновой зависимости собственной поляризации. Это, например, имеет место у μ Сер. Вполне понятно, что такие звезды должны быть исключены из рассмотрения при изучении закономерностей длинноволновой зависимости собственной поляризации.

Наблюдения АО ЛГУ, поскольку они выполнялись в нескольких цветах, также могут быть использованы для изучения длинноволновой зависимости поляризации. Они подтверждают непрерывное уменьшение степени поляризации с увеличением длины волны в области до 1μ , найденное ранее. Вместе с тем, распространение этих наблюдений на более далекую ИК-область позволило проследить эту зависимость до цветовой полосы К. На рис. 4 представлены нормированные значения поляризации в функции $1/\lambda$ по наблюдениям в цветовых полосах U, B, V, R, I, K и других для X Her и VY CMa. Из рисунка видно, что зависимость p от λ в ИК-области продолжает зависимость, найденную для видимой области.

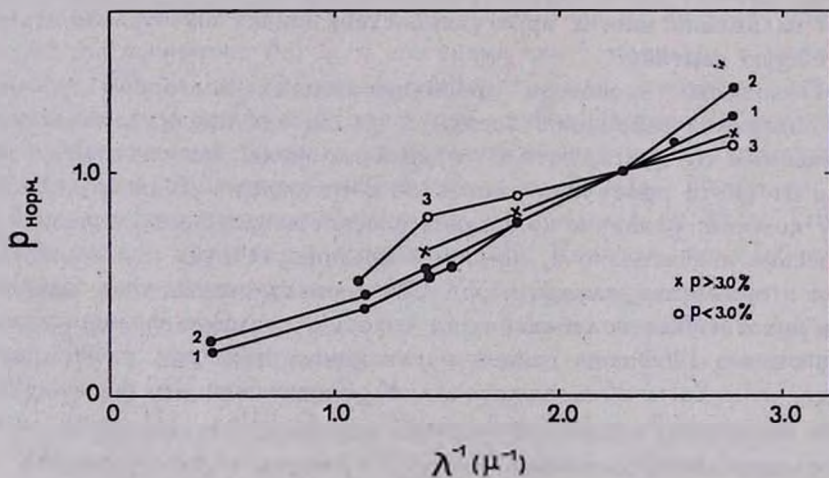


Рис. 4. Длинноволновая зависимость поляризации для VY CMa (1) X Her (2) и V CVn (3).

Наблюдения в АО ЛГУ, поскольку они продолжают уже длительное время позволяют рассмотреть изменение длинноволновой зависимости поляризации со временем. Еще в 1967 г. мы нашли [18], что у V CVn эта зависимость меняется с фазой, становясь более кру-

той в то время, когда звезда находится в минимуме блеска и когда ее поляризация становится максимальной. Новые дискутируемые здесь наблюдения V CVn подтверждают это заключение. На рис. 4 эта зависимость представлена по всем наблюдениям V CVn отдельно для $p > 3.0\%$ и $p < 3.0\%$. С таким же поведением длинноволновой зависимости поляризации мы встречаемся у АК Рег и, по-видимому, у некоторых других звезд. Нам представляется важным отметить, что изменение длинноволновой зависимости поляризации с величиной поляризации есть вместе с тем ее изменение с блеском и цветом звезды. Причем в отдельные эпохи корреляция с изменением цвета проступает наиболее отчетливо.

Программа спектрополяриметрических наблюдений красных переменных звезд высокой светимости, начатая, как указывалось выше, в АО ЛГУ недавно, еще не закончена. К настоящему времени выполнена обработка лишь первой серии наблюдений АК Рег. Предварительным результатом этих наблюдений является вывод об отсутствии сколько-нибудь значительного различия поляризации внутри молекулярных полос и в непрерывном спектре. На рис. 5 приведены профили молекулярной полосы TiO в области $\lambda 0.6-0.65 \mu$ для АК Рег при положениях поляроида $\theta = 53^\circ$ и $\theta = 143^\circ$. Хорошее их согласие между собой свидетельствует о том, что поляризация излучения АК Рег, составлявшая по электрополяриметрическим наблюдениям в цветовой полосе В в момент, когда делалась спектрополяриметрия, около 4% при $\theta = 53^\circ$ с точностью до нескольких процентов распространяется и на молекулярную полосу.

В заключение рассмотрим, хотя бы в самом общем виде, вопрос о возникновении поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости. При этом в основу рассмотрения положим соображения о возможности объяснения характера и поведения собственной поляризации, выявленных в результате приведенных выше наблюдательных данных. Мы будем также считать, что собственная поляризация в излучении красных переменных звезд высокой светимости, несмотря на ее подчас, видимо, весьма различное поведение у разных звезд, во всех случаях вызывается одним и тем же механизмом*.

По-видимому, необходимо сразу же отвергнуть возможность объяснения собственной поляризации в излучении красных звезд наложением на их обычное, тепловое излучение некоего дополнительного сильно поляризованного излучения особой, конкретнее, синхротронной природы. Наблюдения не дают никаких указаний на присутствие в из-

* Мы пока исключаем из рассмотрения VY CMa. Она будет рассмотрена отдельно после получения достаточного наблюдательного материала.

лучении красных звезд такого дополнительного излучения, а при поляризации, доходящей до 10—20%, его присутствие не могло бы остаться незамеченным. Далее, для объяснения наблюдаемой длинноволновой зависимости поляризации необходимо принять, что интенсивность этого дополнительного излучения должна очень сильно, во много десятков раз, возрасть при переходе от голубых к красным лучам, что для синхротронного излучения представляется крайне невероятным. Затем, общее поведение собственной поляризации, в частности изменения плоскости поляризации трудно примирить с этой гипотезой.

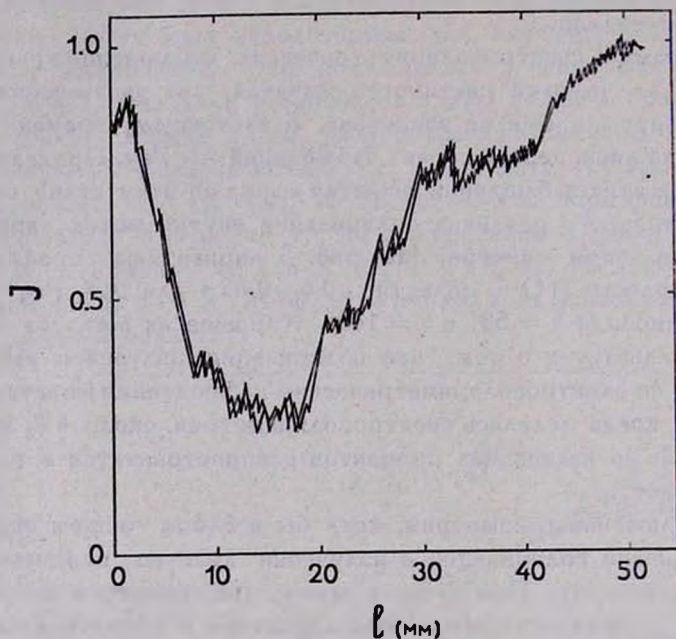


Рис. 5. Профиль молекулярной полосы Ti O (λ 0.6—0.65 μ) у АК Peg при двух взаимно перпендикулярных положениях поляроида $\theta = 53^\circ$ и 143° .

И, наконец, сейчас можно привести много случаев, когда весьма скромным изменениям собственной поляризации в излучении звезд сопутствуют изменения их блеска в тысячи раз, что, нам кажется, трудно понять, считая, что возникновение поляризации связано с наложением какого-то дополнительного, сильно поляризованного излучения и, наоборот, является вполне естественным при допущении действия некоего механизма, тем или иным образом поляризующего обычное излучение звезд.

Механизмом, поляризующим обычное и изначально неполяризованное излучение звезд, может быть, во-первых, механизм избирательного

ослабления этого излучения анизотропными ориентированными частицами вроде того, который вызывает межзвездную поляризацию. Подобное объяснение собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости было предложено В. Донном и др. [19] и продолжено К. Шмидтом [20]. Ими развита теория поляризации звездного излучения графитовыми зернами, вероятно имеющимися в верхних слоях атмосфер холодных звезд. Основное возражение против этого объяснения, как уже указывалось в литературе, связано с сомнениями в возможности образования достаточного числа графитовых частиц, чтобы вызвать наблюдаемую поляризацию. В этой связи уместно вспомнить, что поляризованным бывает излучение как красных звезд различных спектральных типов—М, С и S, так и их разных подразделений, что может рассматриваться как указание на независимость появления поляризующего свет агента как от химического состава, так и, в определенных пределах, температуры звездной атмосферы. Эта гипотеза может объяснять длинноволновую зависимость поляризации, но для объяснения всех особенностей ее поведения со временем необходимо допустить, что в звездной атмосфере происходят изменения как числа, так и размеров поляризующих свет зерен, а также напряженности и ориентировки выравнивающего их магнитного поля. При этом в разных случаях эти изменения оказываются совершенно различными при одном и том же физическом состоянии атмосферы. Все это создает значительные трудности для указанной гипотезы, и поэтому представляется необходимым рассмотреть и другую возможность внесения поляризации в звездное излучение — его поляризацию при рассеянии света. В этом случае длинноволновая зависимость поляризации должна отражать зависимость от длины волны коэффициента рассеяния. Кажется, что механизм рассеяния может представить более гибкие возможности для объяснения особенностей поведения собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости.

Гипотеза о возникновении собственной поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости при молекулярном рассеянии света в их атмосферах была выдвинута и разрабатывалась Н. М. Шаховским [21], А. Крушевским и др. [12] и Дж. Харрингтоном [22]. Однако объяснение всех наблюдаемых особенностей собственной поляризации в излучении красных переменных звезд через молекулярное рассеяние света в их атмосферах снова встречается со значительными трудностями. Наблюдаемая зависимость поляризации от длины волны не согласуется с релеевским законом молекулярного рассеяния. И хотя был указан путь преодоления этой трудности [22], ее отнюдь нельзя считать снятой. На основе этой гипотезы трудно также объяснить

большую поляризацию, найденную в коротковолновой области спектра некоторых звезд. И, наконец, возникновение поляризации в звездной атмосфере, в которой формируются и молекулярные полосы, не может не привести к различию поляризации в непрерывном спектре и в молекулярных полосах. А приведенные выше спектрополяриметрические наблюдения показывают, что такого различия, по-видимому, нет.

Некоторое время тому назад мы высказали предположение [23], что поляризация в излучении красных переменных звезд высокой светимости возникает при его рассеянии в околозвездной среде, например в облаках пылевой материи, окружающих звезду. Для того, чтобы наблюдаемое излучение оказалось заметно поляризованным, необходимо постулировать крайне асимметричное распределение этой материи, например, предположив концентрацию пылевых облаков к некоторой плоскости. (В этом, кстати говоря, нет ничего невероятного.) При этих предположениях становится понятным присутствие поляризации в излучении самых различных звезд. Более того, две звезды, неотличимые друг от друга спектрально, обе с пылевыми оболочками могут: одна иметь поляризованное, другая — неполяризованное излучение, так как появление поляризации в их излучении должно дополнительно определяться еще наличием асимметрии в видимом распределении этой пылевой, рассеивающей свет материи.

Это объяснение привлекательно возможностью просто объяснить длинноволновую зависимость собственной поляризации. Для этого достаточно принять, что околозвездные частицы подобны межзвездным пылевым частицам, ответственным за межзвездное ослабление света. Оно открывает также простую возможность понять различное поведение поляризации в разных случаях — значительные изменения p в одних и θ в других. Для этого достаточно рассмотреть различный наклон плоскости концентрации пылевых облаков к плоскости неба. При наклоне, близком к нормальному, видимая асимметрия в распределении пылевой материи в проекции на плоскость неба будет всегда велика. Соответственно всегда будет значительна и собственная поляризация. Позиционный же угол плоскости поляризации должен меняться мало и в среднем будет определяться позиционным углом плоскости концентрации пылевой материи. По-видимому, с таким положением вещей мы сталкиваемся в случае V CVn, AK Peg и некоторых других звезд.

Если же плоскость концентрации рассеивающей свет материи мало наклонена к плоскости неба, то видимая асимметрия в ее распределении по небу должна быть связана только со случайной асимметрией в расположении пылевых облаков. Поляризация в этом случае будет, как правило, малой. Позиционный же угол плоскости поляри-

зации может оказаться любым и сможет меняться в широких пределах. С таким положением вещей мы, вероятно встречаемся у Z UMa и S UMa.

Так как формирование и распределение пылевых облаков должны быть, естественно, подвержены многочисленным случайностям, то представляется вполне понятным появление многочисленных иррегулярностей в поведении поляризации. Однако количество диффузной материи в окрестностях звезд, вероятно, должно быть связано с их активностью, что, возможно, объясняет поведение поляризации у X Her. Также нетрудно представить себе такое положение, когда количество пыли будет расти при уменьшении звездной температуры, что открывает возможность к объяснению зависимости величины поляризации от блеска звезды.

Из-за того, что коэффициент рассеяния излучения является функцией длины волны, объемы, в которых возникает рассеянное излучение разных длин волн, будут, вообще говоря, существенно разные. И это при неравномерном пространственном распределении рассеивающей свет пылевой материи может объяснить несовпадение плоскостей поляризации при наблюдениях в разных цветах.

Можно попытаться оценить количество поляризованного излучения, которое сможет внести в излучение звезды отдельное пылевое облако. Пусть оно расположено около звезды в направлении, нормальном к направлению на наблюдателя. Примем, что оно на небе звезды кроет площадь, например, $60 \times 60^\circ$ и имеет оптическую толщину τ порядка, допустим, 0.7. Тогда количество поляризованного излучения, рассеянного им в направлении наблюдателя, вообще говоря, зависящее от индикатрисы рассеяния, конфигурации облака и т. д., в благоприятном случае легко может достичь 2% и даже более от излучения звезды. Два таких облака, расположенные по разные стороны от звезды, удвоят количество поляризованного света. Таким образом предлагаемый механизм вполне достаточен для объяснения обычно наблюдаемой поляризации в излучении красных переменных звезд высокой светимости порядка 2–3%. Это количество может быть еще большим, если принять, что облака имеют большую оптическую толщину или что, например, существует ряд облаков, окружающих звезду кольцом в плоскости, направленной на наблюдателя. Но оно явно недостаточно для объяснения высокой поляризации, найденной у некоторых звезд в коротковолновой области спектра, преимущественно при „всплесках“ поляризации, в исследованных случаях, сопутствующих падению их блеска. Однако, если предположить, что в эти периоды происходит экранирование прямого излучения звезды, допустим, одним из подобных пылевых облаков оптической толщиной τ , то поляризация наблюдаемо-

го излучения должна увеличиться в e^{τ} раз. При значении $\tau \approx 0.7$ это приведет к удвоению поляризации. Так как ослабление излучения звезды должно происходить селективно (τ зависит от λ), то из-за одного этого должно наблюдаться изменение длинноволновой зависимости поляризации при ее „всплесках“. По-видимому, именно с таким явлением мы и столкнулись при изучении V CVn, когда нашли увеличение крутизны длинноволновой зависимости поляризации ее излучения при увеличении поляризации, падении блеска и покраснении звезды. Подтверждением большой роли экранировки прямого излучения звезды в возрастании поляризации, а также в колебаниях ее блеска может служить случай с V CVn, когда у нее пропал „всплеск“ поляризации и соответствующий ему минимум блеска.

Развиваемые здесь представления о существовании вблизи красных холодных звезд пылевых оболочек не являются новыми. Такие оболочки неоднократно привлекались для объяснения переменности этих звезд и в последнее время избытков ИК-излучения.

Ленинградский государственный
университет

POLARIZATION OF LIGHT OF RED VARIABLE STARS OF HIGH LUMINOSITY

V. A. DOMBROVSKY

The results of multicolored polarimetric observations of red variable stars of high luminosity, made for some years in the Leningrad University Observatory, are discussed in the paper.

The radiation of many of these stars has intrinsic polarization which was in all the cases found to be variable; the degree of polarization and the range of variability increase with the decrease of the wavelength; the position angle of plane of vibrations for most of the stars proved to be independent of the wavelength, though at some moments its values were found to be strongly different in different colors.

The behaviour of polarization changes of stars is different, varying with time and having many irregularities. There is a correlation between the changes of polarization, brightness and colour in some stars.

The changes in polarization— p , θ —, brightness V and $B-V$ color index are plotted for V CVn, X Her, Z UMa in Fig. 1–3.

For some stars the wavelength dependence of polarization was followed up to $\lambda \approx 2.5 \mu$ (Fig. 4). AK Peg was additionally studied in a spectropolarimetric way (Fig. 5).

To explain intrinsic polarization of light in red variable stars of high luminosity various hypotheses are discussed.

It is very likely that the origin of polarization of light of these stars is due to the light scattering in clouds of circumstellar matter.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. А. Домбровский и др., Труды АО ЛГУ, 22, 83, 1965.
2. В. А. Домбровский, Вестник ЛГУ, № 19, 153, 1957.
3. О. С. Шулов, Труды АО ЛГУ, 24, 41, 1967.
4. В. А. Домбровский, Т. А. Полякова, В. А. Яковлева, Труды АО ЛГУ, 25, 32, 1968.
5. В. А. Домбровский, Т. А. Полякова, В. А. Яковлева, Труды АО ЛГУ, 27, 1970 (в печати).
6. Г. В. Хозов, Труды АО ЛГУ, 25, 69, 1968.
7. Г. В. Хозов, Н. А. Минаев, Труды АО ЛГУ, 26, 55, 1969.
8. R. R. Zappala, A. J., 148, L. 81, 1967.
9. Р. А. Варданян, Частное сообщение.
10. Н. М. Дуск, A. J., 73, 688, 1968.
11. K. Serkowski, Ap. J., 156, L. 139, 1969.
12. A. Kruszcwsky, T. Gehrels, K. Serkowski, A. J., 73, 677, 1968.
13. K. Serkowski, Ap. J., 144, 435, 1966.
14. K. Serkowski, IBVS, № 141, 1966.
15. Nederlandse Vereniging, Voor Weer — en Sterren Kude Observations of variable stars, Report N 13—16, 1967—69.
16. Association des Observateurs d'etoiles variables. Observations d'etoiles variables par l' AO FV. J. Observateurs, 50, 359, 1967.
17. S. J. Shawl, Ap. J., 157, L. 57, 1969.
18. В. А. Домбровский, Астрон. цирк., № 403, 1967.
19. B. Donn, T. P. Stecher, N. C. Wickramasinghe, D. A. Williams, A. J., 145, 949, 1966.
20. K.-H. Schmidt, Astr. Nachr., 290, 271, 1968.
21. Н. М. Шаховской, Астрон. ж., 40, 1055, 1963.
22. J. P. Harrington, Ap. Letters, 3, 165, 1969.
23. В. А. Домбровский, Астрон. цирк., № 498, 1967.