

О возможности построения моделей атмосфер звезд типа R Северной Короны

В.Е. Панчук

Дан краткий исторический обзор исследований, посвященных построению моделей атмосфер холодных звезд. На примере атмосфер К- и М-звезд обсуждаются трудности, которые встретятся при построении моделей атмосфер звезд типа R Северной Короны.

При построении таких моделей необходимо учитывать:

- 1) отклонения от состояния локального термодинамического равновесия,
- 2) образование силикатных и графитовых частиц,
- 3) молекулярную непрозрачность в турбулентной среде,
- 4) исправление температурного распределения с учетом отклонений от несерости вещества.

On the Possibility of the Building the Models of the R CrB-Type Atmospheres

V.E. Panchuk

The short historical review of the investigation of the models of the cool stars atmospheres is given in this paper. The difficulties in building of R CrB-atmospheres' models are discussed on the K- and M-type atmospheres taken as an example.

Building such models would be necessary to take into account:

- 1) the deviation from LTE,
- 2) the formation of the grains of the silicate and graphite,
- 3) molecular opacity in the turbulent medium,
- 4) the correction of the temperature distribution due to non-greyness of the matter.

Детальному изучению атмосфер переменных звезд должно предшествовать построение моделей атмосфер, находящихся в стационарном состоянии. Полученные при этом физические характеристики могут послужить основой для анализа состояния вещества и поля излучения в нестационарной атмосфере. В качестве основных параметров таких моделей (T_e — эффективной температуры, g — ускоре-

ния силы тяжести) могут быть выбраны величины, характеризующие некоторое среднее состояние атмосферы переменной звезды.

В настоящее время трудно однозначно описать процессы, происходящие в атмосферах звезд типа R Северной Короны. Нам известна лишь одна попытка построения моделей атмосфер звезд этого типа (Майерскоф, 1968). В то же время модели атмосфер звезд более низких светимостей, эффективных температур и концентраций свободного углерода — M, S, C-звезд — исследуются более организованно. Краткий обзор результатов построения моделей атмосфер звезд поздних спектральных типов помогает представить те трудности, которые могут встретиться при построении моделей атмосфер звезд типа R CrB.

Известно, что, начиная с атмосфер звезд спектрального класса G, поглощение на отрицательных ионах водорода преобладает над непрозрачностью, обусловленной фотоионизацией атомов нейтрального водорода. Поэтому построение моделей атмосфер K и M-звезд стало возможным после того, как были достаточно надежно вычислены сечения поглощения на отрицательном ионе водорода. В атмосферах звезд типа R CrB основными атомными источниками непрозрачности являются ионы C^- и He^- . Вероятности связанно-свободных и свободно-свободных переходов в поле этих ионов известны с меньшей точностью, чем соответствующие сечения для иона H^- .

Остерброк (1953) вычислил модель атмосферы звезды главной последовательности спектрального класса M, предположив, что непрозрачность оболочки определяется только связанно-свободными переходами на ионах H^- . В таком же предположении модели атмосфер звезд-гигантов были вычислены Дюмезиль-Кюрье (1954).

Атмосферы звезд спектрального подкласса M0 изучал Буславский (1964, 1966). Автор пришел к выводу, что роль связанно-свободных переходов на атомах металлов второстепенна, и поэтому как монохроматический, так и средний коэффициенты непрозрачности можно представить суммой коэффициента поглощения на ионах H^- и коэффициента поглощения на атомах одного из щелочных металлов. Кроме того, анализировался спектр поглощения на молекулах окиси титана и было показано, что учет поглощения в электронных системах TiO не влияет на структуру атмосферы звезды класса M0 главной последовательности (Буславский, 1965). Вычисленные монохроматические потоки согласуются с результатами Остерброка (1953).

Дальнейшее развитие теории атмосфер холодных звезд шло по пути конструирования "несерых" моделей, т.е. моделей, для которых распределение температуры с оптической глубиной не задано классическим образом, а определяется из сравнения эффективности процессов рассеяния и истинного поглощения излучения. Для интервала эффективных температур 2500–4500 °K Гингерич и Кумар (1964) и Гингерич (1967) рассчитали серию моделей атмосфер. Эти модели, не включающие молекулярных источников непрозрачности, указа-

ли окно прозрачности вблизи $\lambda = 1.65 \mu$, где роль связанно-свободных переходов на ионах H^- резко уменьшается, а свободно-свободные переходы в поле ионов H^- и H_2^- еще незначительны. Действительно, внеатмосферные наблюдения инфракрасных спектров К-звезд показывают пик интенсивности в этом диапазоне длин волн. Так как поглощение в области $\lambda = 1.6-1.8 \mu$ зависит также и от частоты свободно-свободных переходов в поле ионов молекулярного водорода, то величина указанного пика интенсивности чувствительна к плотности атмосферы и, следовательно, может оказаться удобным критерием светимости звезды. К сожалению, в спектрах звезд типа R CrB еще не обнаружены области, чувствительные к эффектам давления, что в равной мере может отражать как отсутствие таких областей, так и отсутствие сильных вариаций давления в атмосфере.

В работе Гингерич (1967) найдено, что для данной эффективной температуры T_e температурные градиенты и потоки излучения на границе фотосферы не зависят от принимаемой в расчетах силы тяжести на поверхности звезды. Аналогичный вывод получен и для случая модели атмосферы R CrB: Майерскоф (1968) приходит к выводу, что теоретические потоки в красной и близкой ИК-области для данной T_e не зависят от ускорения силы тяжести. Эта поразительная устойчивость результатов вычислений относительно одного из важнейших параметров звездной атмосферы может означать лишь одно — учитывается один тип непрозрачности. Действительно, увеличение или уменьшение газового давления изменяет концентрации электронов и ионов, изменяется и величина коэффициента поглощения, рассчитанного на грамм вещества. Но зависимость коэффициента поглощения от частоты остается неизменной, так как в случае атмосферы типа R CrB с изменением давления количество ионов различных сортов изменяется в одинаковой мере. Таким образом, значительные изменения давления, если они имеют место в атмосферах звезд типа R CrB, из наблюдений непрерывного спектра этих звезд обнаружить затруднительно. Но если будет строго показано, что в данном случае величины U, B, V, R, I свободны от эффектов давления, то изменение разностей цветов $B-V, V-R$ можно будет почти полностью приписывать влиянию пылевой оболочки (в значительно меньшей мере — влиянию температурных изменений).

Анализ наблюдений, полученных при осуществлении проекта "Стратоскоп-2", подчеркнул необходимость учета молекулярных источников непрозрачности в инфракрасной области спектров холодных звезд. Впервые такой учет был проведен в работах Гингерича и сотрудников (1966, 1967). Для имитации полностью насыщенной полосы спектра поглощения паров воды использовались полосы с бесконечной непрозрачностью. Кроме того, на всех частотах ИК-области вводился дополнительный источник непрозрачности, пропорциональ-

ный остаточной оптической глубине. Такой формальный подход, безусловно, не может дать представления о распределении энергии в длинноволновой области спектра, но является схемой, необходимой для понимания того, что можно считать предельным случаем молекулярного поглощения.

Использование быстродействующих ЭЦВМ с большим объемом оперативной памяти позволило провести расчеты монохроматических коэффициентов поглощения, основываясь на учете вкладов в непрозрачность, вносимых отдельными вращательными линиями. Первоначально эта работа была проведена для молекул H_2O (Оман, 1967) и CO (Кунде, 1968), спектр поглощения которых был обнаружен при внеатмосферных наблюдениях звезд. Некоторые авторы считают, что ИК-спектры М-звезд высокой светимости образуются, главным образом, вследствие поглощения в красной системе спектра молекулы циана (Винг и др. 1970; Панчук, 1973). Для этой молекулы также были выполнены вычисления по схеме "от линии к линии" (Джонсон и др., 1972).

Существование значительных турбулентных движений в атмосферах гигантов и высоких давлений в атмосферах карликов приводит к расширению отдельных вращательных линий. Поэтому наряду с трудоемкими методами, основанными на непосредственном учете поглощения, производимого сотнями тысяч линий, получили распространение методы, основанные на гипотезе частично перекрывающихся линий (Пеннер, 1963; Тэюи, 1966).

Определение коэффициента поглощения, рассчитанного на грамм звездного вещества, требует информации о количестве поглощающих частиц, получаемой в процессе решения уравнений состояния. Ранние исследования диссоциации молекул в звездных атмосферах (Буак, 1957; Ягер и др., 1957) были посвящены разработке основ спектральной классификации, заложенных в пионерских работах Рассела (1933, 1934). По мере уточнения сведений о молекулярных постоянных и распространенности химических элементов, центр тяжести в исследованиях уравнений состояния был перенесен на учет возможно большего числа видов молекул, что позволяет надежно вычислить объемный коэффициент поглощения. Так, в моделях, рассчитанных смитсоновской группой (Гингерич, 1967), было учтено образование 10-ти сортов молекул и ионизация 30-ти химических элементов. Цудзи (1964) рассчитал парциальные давления для смеси из 44-х видов молекул, причем вычисления проводились для 16-ти химических составов. При вычислении моделей с учетом поглощения водяным паром Оман (1969) решил систему уравнений диссоциации для 16-ти молекул. Вардья (1966) обратил внимание на роль отрицательных ионов молекул в атмосферах К-звезд. В рассчитанных им моделях рассматривалось образование ста видов молекул и ионов. Александер и Джонсон (1972) вычислили 9 моделей атмосфер с раз-

личной величиной отношения содержаний кислорода и углерода. При этом авторам необходимо было учесть диссоциацию 24-х видов молекул, главным образом углеводородов. Киппер (1971) рассмотрел задачу о содержании молекул в атмосфере звезды солнечного химсостава. Учтено образование 24-х молекул и радикалов.

Низкие плотности вещества в атмосферах звезд типа R CrB не требуют рассмотрения громоздких систем уравнений диссоциаций даже для наиболее холодных представителей звезд данного типа. В любом случае достаточно решать систему уравнений, записанную для двухатомных молекул. Но решение уравнений состояния в случае атмосфер звезд типа R CrB усложняется другим обстоятельством — необходимостью учитывать взаимодействие "газ—пыль" и отклонения от состояния локального термодинамического равновесия. Нами рассматривалась сетка моделей атмосфер звезд поздних спектральных типов. Решение уравнений детального баланса, проведенное для энергетических уровней атомов K и Na — основных поставщиков свободных электронов — показывает, что в атмосферах M-звезд третьего класса светимости частота ударных процессов на полтора-два порядка выше частоты радиативных переходов. В атмосферах G и K-сверхгигантов отклонения от состояния ЛТР более существенны. Анализ, проведенный для колебательно-вращательных уровней молекулы окиси углерода, свидетельствует о том, что в атмосферах сверхгигантов условие локального термодинамического равновесия не выполняется (Томпсон, 1973). Это создает известные трудности при определении химического состава атмосфер. Ошибки в определении содержания атомов Mg, Si, Al, Fe — основных поставщиков свободных электронов в случае атмосфер звезд типа R CrB — могут влиять на величину коэффициента поглощения на ионах C^+ и, следовательно, на структуру модели атмосферы.

Вычисления лучистых и адиабатических температурных градиентов свидетельствуют о наличии в фотосферах холодных звезд обширных конвективных зон. Как правило, определение структуры тех слоев атмосферы, где наряду с лучистым переносом энергии существуют конвективные потоки, проводится при помощи теории "длины пути перемешивания" (Бём-Витензе, 1958; Хоффмейстер и др., 1964). Учет конвективного переноса энергии проведен в моделях, рассчитанных Оманом, Александером и Джонсоном, Вардья, Т. Киппером (1973), Цудзи (1966). В работе Кандль (1967) сделан вывод, что конвекция почти не влияет на распределение энергии в непрерывном спектре. Этот факт легко объяснить, если вспомнить, что конвективный перенос энергии может оказаться существенным только в подфотосферных слоях, тогда как излучение в непрерывном спектре формируется несколько выше, в фотосфере. Следовательно, учет конвективного переноса энергии может немного изменить температуру глубоких слоев атмосферы, но в приближении теории "длины пути пе-

ремешивания" не скажется на структуре тех слоев, где происходит только лучистый перенос энергии.

Особое внимание исследователи уделяют проблеме рассеяния излучения в атмосферах холодных звезд. Атмосферы карликов и субкарликов поздних спектральных классов почти полностью состоят из молекулярного водорода. Ионы H_2^+ нестабильны и поэтому в таких атмосферах даже на $\lambda = 1\mu$ рэлеевское рассеяние на молекулах водорода остается преобладающим источником непрозрачности вплоть до оптической толщи $\tau_{\lambda=1\mu} = 1$. В видимой и фотографической областях спектра рассеяние еще более существенно. Поэтому понятен интерес к различным итерационным методам исправления начального температурного распределения в звездной атмосфере. Из-за большой величины отношения коэффициента рассеяния к коэффициенту истинного поглощения ни один из опробованных методов, по мнению авторов обзора (Сапар и др., 1969), не обладает хорошей сходимостью. Отметим также, что, хотя при помощи итерационных методов исправления температурного распределения можно достичь формальной точности по потоку в доли процента, нельзя утверждать, что температура в данной атмосфере известна с точностью до нескольких градусов. Гораздо большая неопределенность атмосферной структуры связана с проблемой монохроматических коэффициентов поглощения.

При построении моделей атмосфер с учетом молекулярного поглощения исследователи основное внимание уделяют инфракрасным спектрам молекул, мотивируя это тем, что видимая и фотографическая области спектра — энергетически второстепенный диапазон в атмосфере холодной звезды. Безусловно, это так. Но учет в видимой области спектра только поглощения на ионах H^- приводит к заниженным коэффициентам поглощения и, в итоге, к существенному избытку излучения в этой области спектра. В действительности же спектры углеродных звезд характеризуются дефицитом излучения в видимой и фотографической областях спектра. Учет поглощения излучения в электронно-колебательной системе молекулярных полос проводился либо после вычисления модели атмосферы — (Киппер, 1973), либо использованием модифицированной модели Эльзассера для оценки вклада молекулярного поглощения в расселенный коэффициент непрозрачности (Цудзи, 1971). Таким образом, при расчете модели атмосферы предполагалось, или доказывалось — (Буславский, 1965), что поглощение в электронных системах молекулярных полос не влияет на структуру звездной атмосферы. Наличие покровного эффекта в атмосферах холодных звезд ставит подобные утверждения под сомнение.

Выполненные нами расчеты моделей атмосфер холодных звезд свидетельствуют о том, что при постоянной эффективной температуре и постоянном значении ускорения силы тяжести только изменение отношения обилий углерода и кислорода $[C]/[O]$ приводит к существен-

ному изменению протяженности звездной атмосферы. Кроме того, с увеличением отношения $[C]/[O]$ снижается роль конвективного переноса энергии. Эти эффекты имеют одну причину: с увеличением отношения $[C]/[O]$ увеличивается средняя непрозрачность атмосферы. Таким образом, атмосферы углеродных звезд более протяженные, и в случае звезд типа R CrB существенны отклонения от плоской геометрии.

Литература:

- Александр и др., 1972—Alexander D.F., Johnson H.R., ApJ 176, 629.
- Буак, 1957—Boique R., Liège Mem 18, 346.
- Бём-Витенс, 1958—Böhm-Vitense E., ZsfAp 46, 108.
- Буславский В.Г., 1964, АЖ 41, 631.
- Буславский В.Г., 1965, Вестник ЛГУ № 7, 35.
- Буславский В.Г., 1966, в сб. "Теория звездных спектров", "Наука", М., стр. 208.
- Вардья, 1966—Vardya M.S., MN 134, 347.
- Винг и др., 1970—Wing R.F., Spinrad H., ApJ 159, 973.
- Гингерич, 1967—Gingerich O.J., SAO Spec. Rep. 240, 3.
- Гингерич и др., 1964—Gingerich O.J., Kumar S.S., AJ 69, 139.
- Гингерич и др., 1966—Gingerich O.J., Latham D.W., Linsky J.L., Kumar S.S., в "Colloquium on late-type stars", 291.
- Гингерич и др., 1967—Gingerich O.J., Latham D.W., Linsky J.L., Kumar S.S., SAO Spec. Rep. 240, 11.
- Джонсон и др., 1972, —Johnson H.R., Marenin I.R., Price S.D., Kitt Peak Obs. Contr. № 554.
- Дюмезиль-Кюрье, 1954—Dumézil-Curien P., Ann.d'Astroph. 17, 197.
- Кандль, 1967—Kandel R., Ann.d'Aph 30, 439.
- Киппер, 1971—Kipper T., Тарту Публ. 39, 321.
- Киппер, 1973—Kipper T., Тарту Публ. 41, 63.
- Кунде, 1968—Kunde V.G., ApJ 153, 435.
- Майерскоф, 1968—Myerscough V.P., ApJ 153, 421.
- Оман, 1967—Auman J.R., ApJ Suppl. 14, 171.
- Оман, 1969—Auman J.R., ApJ 157, 799.
- Остерброк, 1953—Osterbrock D., ApJ 118, 529.
- Панчук В.Е., 1973, АЦ № 799.
- Пеннер С.С., 1963, „Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов", Москва.
- Рассел, 1933—Russel H.N., ApJ 78, 239.
- Рассел, 1934—Russel H.N., ApJ 79, 317.
- Сапар А., Круусмаа А., 1969, Тарту публ. 38, 3.
- Томпсон, 1973—Thompson R.I., ApJ 181, 1039.
- Хоффмейстер и др., 1964—Hoffmeister E., Kippenhahn R., Wigert A., ZsfAp 59, 215.

Цудзи, 1964 — Tsuji T., Tokyo Ann. 9, 1.

Цудзи, 1966 — Tsuji T., PAS Japan 18, 127.

Цудзи, 1971 — Tsuji T., PAS Japan 23, 553.

Ягер и др., 1957 — Jager de C., Neven L., Liege Mem 18, 357.

Одесская астрономическая
обсерватория