

К ПРОБЛЕМЕ ДИСПЕРСИИ МЕТАЛЛИЧНОСТИ ДИСКА ГАЛАКТИКИ

В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, В. В. Цымбал

На основе каталога эквивалентных ширин линий металлов в спектрах А и F-звезд методом моделей атмосфер выполнен расчет металличности для 117 звезд. Реализован предложенный ранее в работе Клочковой и др. (1990 г.) подход к проблеме определения дисперсии металличности совокупности звезд по эквивалентным ширинам линий, сгруппированных по потенциалам возбуждения нижнего уровня χ_L . Обнаружена зависимость средней металличности звезд диска от χ_L линии, по которой вычислено это среднее. Дисперсия металличности также является функцией χ_L . Таким образом найдена одна из феноменологических причин обнаруженного ранее (Клочкова и др., 1989) увеличения дисперсии металличности с переходом к более горячим звездам.

Metallicity for 117 stars is calculated by the atmosphere model method using the catalogue of metallic line equivalent widths in spectra of A and F stars. The suggested earlier (Klochkova et al., 1990) approach to the problem of determining the metallicity dispersion of a set of stars according to their equivalent line widths classified by the excitation potential of the lower level χ_L is realised. A dependence of the mean metallicity of the disk stars upon the χ_L of the line, according to which this value is calculated, is detected. Dispersion of the metallicity is also the function of χ_L . Thus, one of phenomenological causes of the earlier detected (Klochkova et al., 1989) increase of metallicity dispersion while passing to hotter stars is found.

До тех пор, пока не решена задача описания звездного спектра с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР), нельзя с уверенностью утверждать, что кривая распространенности химических элементов, получаемая в результате анализа спектра методом моделей атмосфер, не отягощена систематическими ошибками. Традиционно в качестве основной или единственной причины таких ошибок принимались ошибки используемой системы сил осцилляторов. Ниже на примере задачи о дисперсии металличности диска Галактики укажем на определенную роль и других причин, которые могут исказить вид кривой распространенности. Для примера рассмотрим искусственный частный случай: пусть не-ЛТР-эффект проявляется только в отклонении от больцмановского распределения атомов и ионов по электронным уровням. Если вспомнить, что содержание элементов определяется по линиям с разными потенциалами возбуждения

нижнего уровня (причем для разных химических элементов распределения попадающих в исследуемый спектральный интервал линий по потенциалам возбуждения различаются), то приходим к выводу о неизбежности систематических ошибок на кривой распространенности химических элементов. Было показано (Гопка и др., 1989), что при смене сетки моделей атмосфер, на которой исследуется высокоточная спектрограмма, также появляются систематические различия в химическом составе. Разделить эффекты влияния ошибок сил осцилляторов, ошибок из-за неадекватности реальных атмосфер и их моделей, ошибок из-за неучета отклонений от ЛТР, ошибок измерений параметров спектральных линий и ошибок определения параметров моделей атмосфер, поможет подход к проблеме металличности, предложенный в работе Клочковой и др. (1990). Суть этого подхода состоит в перемене ролей систематических и случайных ошибок. Действительно, традиционно при определении средней металличности группы звезд вычисляется среднее из определений металличности для отдельных звезд, каждое из которых, в свою очередь, является средним из определений металличности, выполненных для каждой измеренной линии атома или иона железа. В этом случае ошибки измерения отдельных линий и ошибки определения сил осцилляторов являются случайными, а ошибка определения эффективной температуры систематически завышает или занижает металличность сразу для всех линий. Если же мы не суммируем для каждой звезды определения металличности, выполненные по отдельным линиям, и вычисляем среднюю металличность группы звезд, определенную с использованием только одной линии, затем с использованием только другой линии и т. д., то для каждой из таких средних величин ошибки определения эффективных температур играют уже роль случайных ошибок, а ошибки определения сил осцилляторов - роль систематических ошибок, приводящих к различию средних металличностей, определенных по каждой из линий. К числу систематических ошибок отнесем также ошибки измерения эквивалентных ширин, связанные с эффектами блендирования, в целом повторяющимися для данной линии от звезды к звезде. Ошибки, связанные с точностью измерений, определяемой качеством спектрограмм, сохраняются на этапе редукиции систем эквивалентных ширин в систему каталога (Клочкова и др., 1990), и при данном подходе остаются случайными. Если предположить, что существуют отклонения от бальмановского равновесия для атома железа и (или) для других атомов, то в первом случае влияние таких отклонений необнаружимо, так как для отдельной звезды эффект маскируется недостаточной точностью измерения отдельных линий. Во втором случае эффект выявляется за счет усреднения по группе звезд определений металличности "в данной линии". Центральным аргументом второго подхода является вывод о том, что в пределах, исследованных спектроскопическими методами, металличность диска Галактики в среднем одинакова и равна солнечной (Клочкова и др., 1989).

МЕТОД АНАЛИЗА

В работе Клочковой и др. (1990) в систему эквивалентных ширин, построенную для ОЗСП БТА одним из авторов (К.В.Г.) по спектроскопическим наблюдениям 186 звезд, сведены результаты спектрофотометрической обработки еще 103 звезд, там же приведен список использованных при этом публикаций. Из 289 звезд каталога 24 звезды отмечены как сверхгиганты, 20 - как звезды гало, 114 - пекулярные Ар

и Вр, 27 - "металлические" звезды. Звезд с нормальными спектрами А и F насчитывается 90. Из-за того, что в различных работах исследованы различающиеся диапазоны длин волн, а степень полноты обмера спектрограмм отражает специфику поставленных задач, число измерений одной и той же линии по спектрам звезд всех типов не превосходит 270, но число таких линий невелико (см. рис. 5 работы Ключковой и др., 1990). Здесь мы ограничились анализом спектра нейтральных и однократно ионизованных атомов железа у звезд спектральных классов А, F и Am. Для всей совокупности этих объектов параметры атмосфер определены единой методикой (подробности см. в литературе, цитированной в работе Ключковой и др. (1990)). Распределение числа исследуемых звезд от эффективной температуры дано на рис. 1.

Для каждой звезды с известными T_e и $\lg g$ по сетке моделей (Куруч, 1979) методом интерполяции были вычислены распределения температуры и давления с оптической глубиной. Затем по данным распределениям были рассчитаны распределения с глубиной всех переменных (число частиц данного сорта, статистические веса и т. д.), необходимых для работы методом моделей атмосфер по программе WIDTH-6 (Куруч, 1970). Эти распределения использовались затем столько раз, сколько измеренных линий в спектре данной звезды привлекалось для анализа металличности.

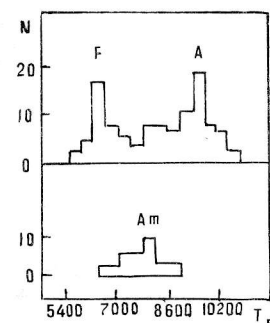
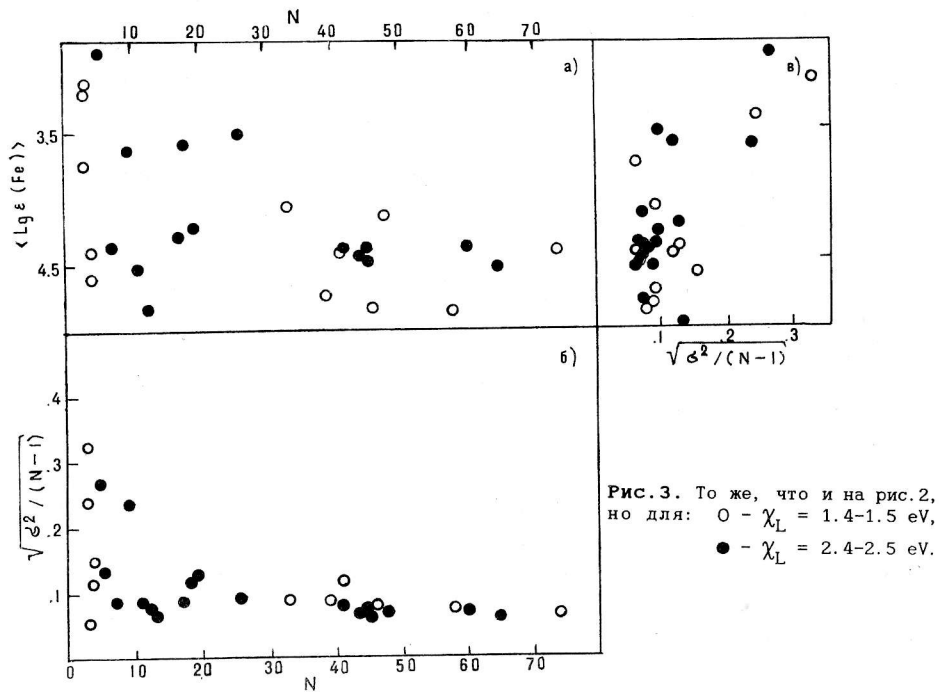
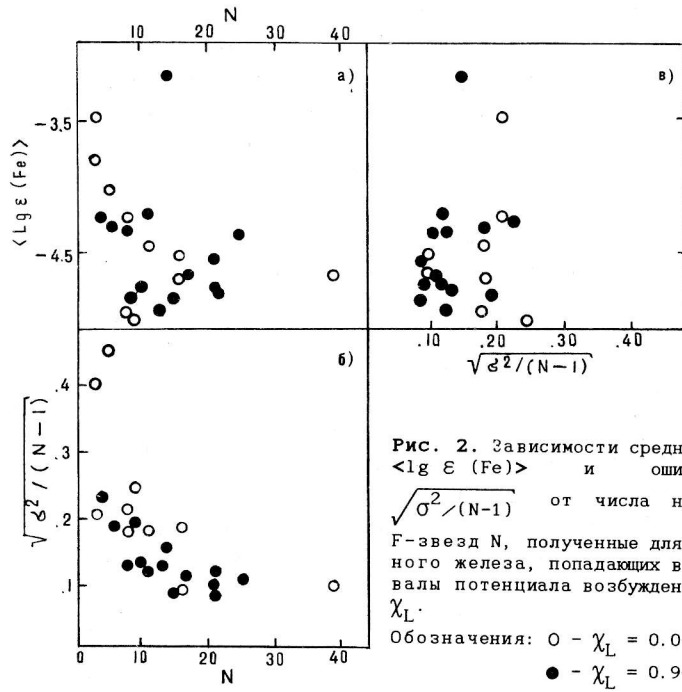
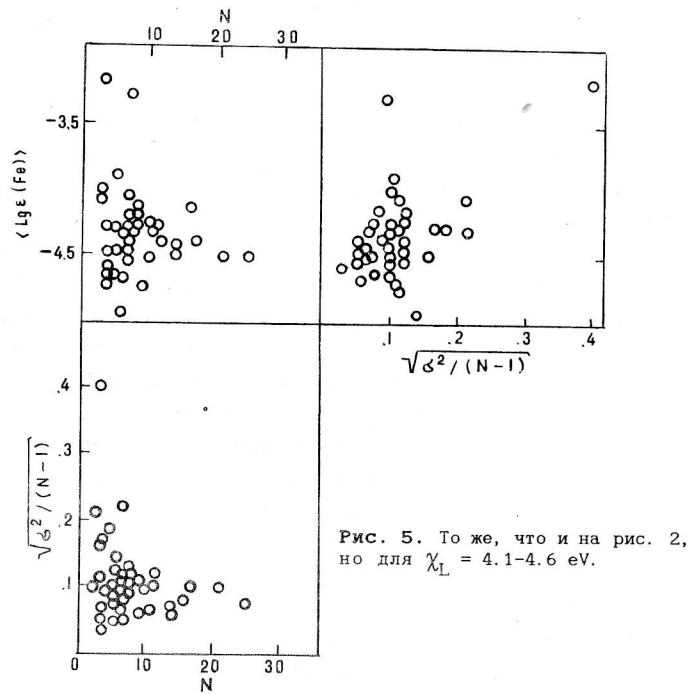
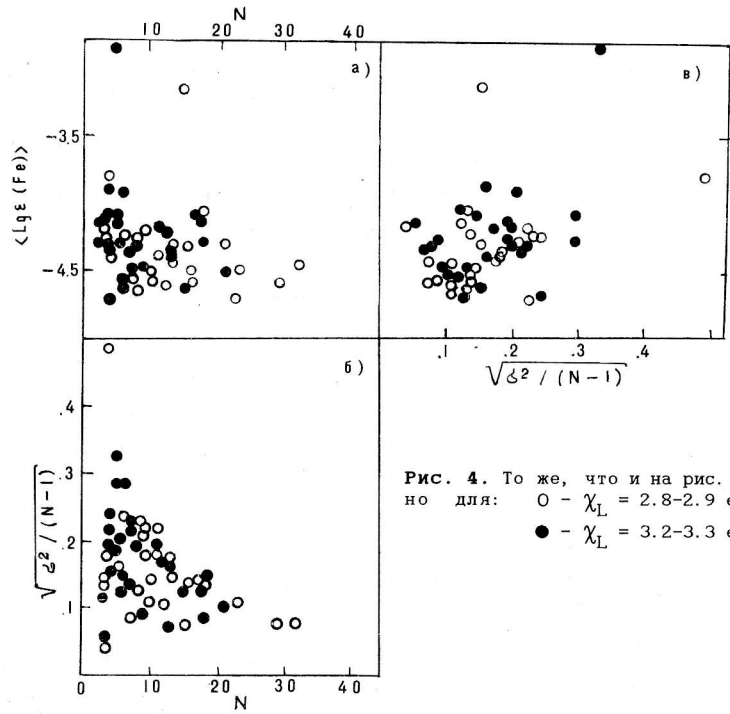


Рис. 1. Распределение числа исследуемых звезд по эффективной температуре T_e .

Для данной спектральной линии среднюю металличность группы звезд мы вычисляли как среднее арифметическое, среднюю металличность группы звезд, определяемую по набору линий с близкими потенциалами возбуждения нижнего уровня, вычисляли так же, придавая определениям по каждой линии одинаковый вес. В процессе расчетов были отбракованы линии, определения металличности по которым на 1.5-2 порядка отличались от металличности, средней по остальным линиям. Кроме того, были отбракованы линии, для которых наблюдался повышенный разброс определений металличности от звезды к звезде, т. е. ошибка определения средней металличности $\sqrt{\sigma^2/(N-1)}$ превышала 0.2 dex. Анализ отбракованных линий по спектрам с хорошим разрешением указывает на значительную степень блендирования большинства из них. Силы осцилляторов взяты из списка линий, составленного Куручем с целью расчета синтетических спектров и функций вероятности распределения непрозрачностей. В этот список были внесены изменения, учитывающие результаты работ Боярчука, Саванова (1985, 1986); Гуртовенко, Костык (1989). Как для звезд с нормальными спектрами, так и для Am-звезд, по каждой линии вычислены средняя металличность и дисперсия металличности группы звезд. Мы не использовали те линии, которые измерены в спектрах пяти и менее звезд из рассматриваемых подвыборок нормальных и "металлических" звезд. Критерии отбраковки линий ясны из рис. 2-5, где для различных диапазонов χ_L приведены зависимости средней металличности и ошибок определения средней металличности от числа N исследуемых нормальных А и F-звезд, а также

соотношения $\langle \lg \varepsilon(\text{Fe}) \rangle$ и $\sqrt{\sigma^2/(N-1)}$ (рис. 2в - 5в).





Анализируя рис. 2-5, приходим к выводу, что при $N > 10$ средние значения металличности стремятся к солнечной металличности ($\lg \varepsilon (\text{Fe}) = -4.5$), но при этом сохраняются значительные вариации средней металличности от линии к линии. Ошибка средней металличности диска, определяемой только по данной линии, может снижаться до 0.1 dex (рис. 2б-5б). Для некоторых интервалов потенциала возбуждения нижнего уровня χ_L ошибка средней металличности слабо коррелирует со средней металличностью, что, по-видимому, является следствием блендирования отдельных линий.

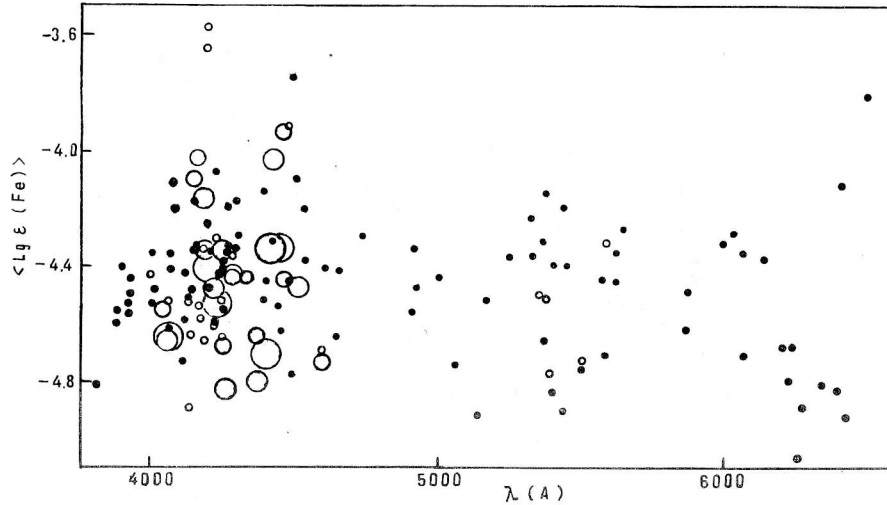


Рис. 6. Зависимость средней металличности, определяемой для нормальных А и F-звезд по данной линии нейтрального железа, от длины волны этой линии. Обозначения: \bigcirc - $N > 60$; \bigcirc - 40-60; \bigcirc - 30-39; \circ - 20-29; \bullet - 10-19.

На рис. 6 приведена средняя металличность группы из N звезд, определенная по данной линии, в зависимости от длины волны этой линии. Характер этой зависимости (отсутствие значимой корреляции) не изменяется, если привлечь также определения средней металличности, выполненные по малому числу звезд ($10 > N > 5$). Среднеквадратичное отклонение σ увеличивается в коротковолновой области спектра (рис. 7), следовательно, оценку дисперсии металличности диска необходимо выполнять по красной области спектра. Такое поведение дисперсии металличности связано с различной степенью блендирования используемых линий в синем и красном диапазоне спектра и с различной степенью блендирования линий синего диапазона спектра при переходе от звезды к звезде.

Анализируя спектры F-карликов, Клочкова и Панчук (1986) обратили внимание на трудности оценки температуры возбуждения из условия независимости металличности от потенциала χ_L линий нейтрального железа, используемых в анализе. Зависимость металличности от потенциала возбуждения нижнего уровня для отдельных звезд была нелинейна и плохо аппроксимировалась прямой, условие нулевого наклона которой на плоскости $\lg \varepsilon (\text{Fe})$, χ_L соответствовало бoльцмановскому распределению электронов по уровням, и через температуру возбуждения позволяло определить эффективную температуру T_e (рис. 8а). Так как

в спектре одной звезды линии с большими значениями χ_L всегда, в среднем, слабее линий, возникающих с низковозбужденных переходов, то указанный феномен трудно отделяется от влияния микротурбулентной скорости ξ_t на эквивалентную ширину W . Этот феномен угадывается и при переходе к спектрам звезд других типов (см. например, рис. 8б). В данной работе мы можем рассмотреть всю совокупность значений индивидуальных определений металличности от линии к линии для звезд каталога Клочковой и др. (1990) и, следовательно, повысить статистическую значимость указанного феномена.

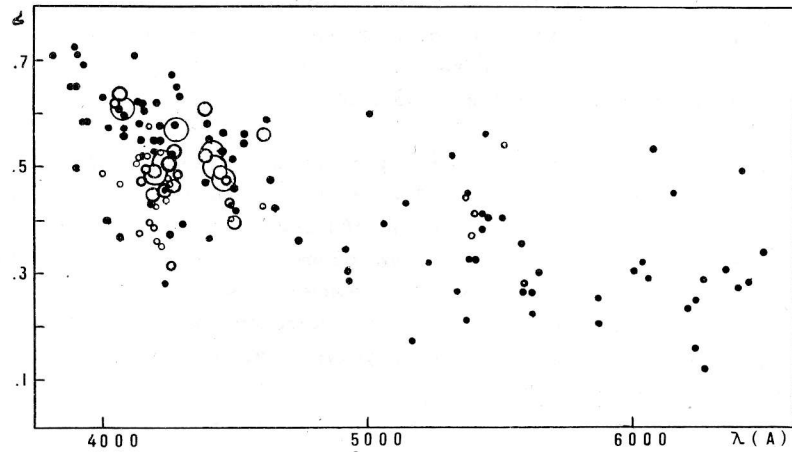


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичного уклонения металличности нормальных А и F-звезд диска от длины волны линий нейтрального железа, по которым вычислены средние значения металличности.

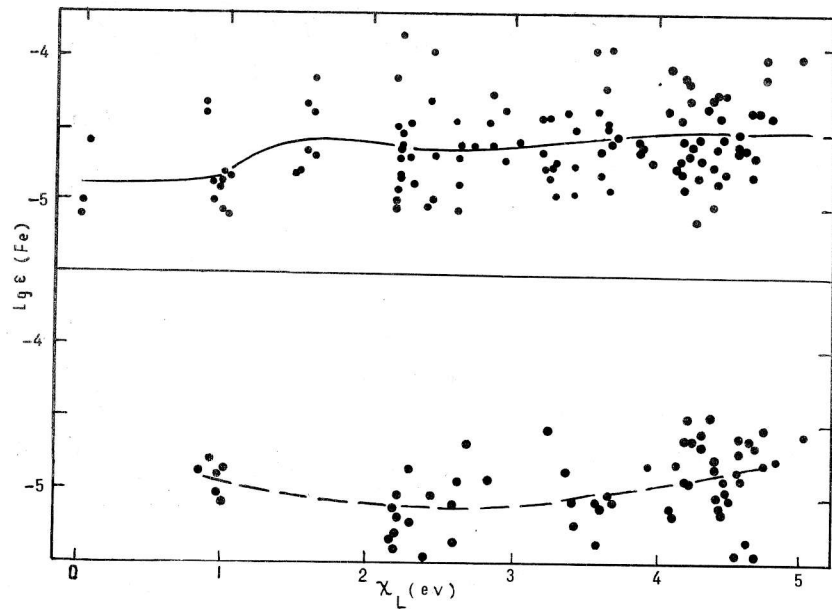


Рис. 8. Связь индивидуальных определений содержания железа $\lg \epsilon$ (Fe) и потенциала возбуждения нижнего уровня χ_L используемых линий нейтрального железа. а) - F-карлик Гиад, $T_e = 6500$ K, $\lg g = 4.1$, $\xi_t = 2.6$ км/с; б) - цефеида 1-го типа населения, $T_e = 5750$, $\lg g = 0.6$, $\xi_t = 3.4$ км/с.

На рис. 9 показана зависимость от χ_L средних величин металличности, определяемых по группам линий с практически совпадающими значениями χ_L (в каждой группе $\Delta \chi_L < 0.1$ eV). На рис. 9-11 число индивидуальных определений металличности в данном интервале n превышает число исследуемых звезд N за счет того, что в данный интервал $\Delta \chi_L$ попадает несколько линий, определение металличности по каждой из которых мы считаем независимым. Из-за ошибок определения сил осцилляторов в каждой группе линий ошибка средней металличности данной группы несколько завышена. Об этом свидетельствуют и рис. 2а-5а, построенные для групп линий с избранными χ_L . Анализ рис. 9 показал, что различия в средней металличности диска, определяемой по группам линий с $\chi_L < 2$ eV и с $\chi_L > 2$ eV, статистически значимые. Напомним, что при расчетах металличности методом моделей атмосфер мы использовали параметры моделей, определенные единообразно, т. е. с использованием условия ионизационного равновесия для атомов железа, условия независимости $lg \epsilon$ (Fe) от W_λ и с использованием профилей линий водорода и показателей цвета, для определения $lg g$, ξ_t и T_e соответственно. Таким образом, мы понизили уровень дисперсии металличности на долю, определяемую различиями в методах анализа атмосфер, выполненных разными авторами. В целом можно утверждать, что стандартный способ определения металличности методом моделей атмосфер закладывает в результат ошибку, иллюстрируемую рис. 9 и связанную с неадекватным описанием спектра нейтрального железа.

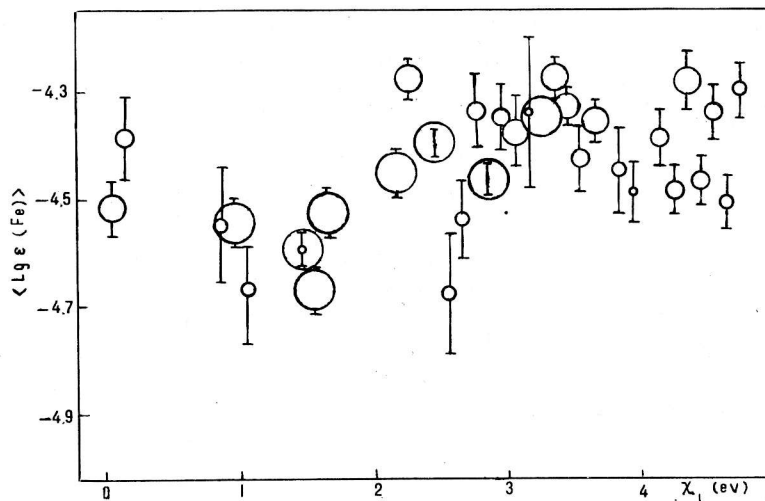


Рис. 9. Зависимость средней величины металличности диска от χ_L , полученная по линиям нейтрального железа в спектрах нормальных A и F-звезд. Указаны ошибки определения среднего, n - число всех индивидуальных определений металличности по линиям, попадающим в данный интервал $\Delta \chi_L$ шириной 0.1 eV. Обозначения: \bigcirc - $900 > n > 600$; \bigcirc - $600 - 200$; \bigcirc - $200-100$; \bigcirc - $100 - 50$; \bigcirc - $50-20$; \circ - $n < 20$.

Зависимость $\langle lg \epsilon (Fe) \rangle$ от χ_L ассоциируется с двумя феноменами - "металлическими" Am-звездами и эффектом аномального усиления линий средней интенсивности в спектрах F-карликов Гиад (Клочкова, Панчук, 1985, 1987). Ранее (Клочкова, Панчук, 1985) было показано, что если дополнительное усиление W линий в спектрах F-карликов Гиад попытаться компенсировать увеличением ξ_t , то

металличность, определяемая как по слабым линиям, так и по усиленным линиям, существенно понижается (приблизительно на 0.5 dex). Аналогичную ситуацию имеем в случае Am-звезд. Действительно, эти звезды как объекты с усиленными линиями металлов выделяются предварительно методами спектральной классификации, т.е. определено по факту усиления сильных линий и линий средней интенсивности. Анализ методом моделей атмосфер приводит к значениям ξ_t , в среднем более высоким, чем микротурбулентная скорость в атмосферах A-звезд с нормальными спектрами. Поэтому в результате анализа спектров Am-звезд следует ожидать относительно более низких значений металличности, определяемых по линиям с высокими χ_L . На рис. 10 даны результаты определения средней металличности диска в функции χ_L , расчет выполнен по группам линий нейтрального железа в спектрах Am-звезд. В интервале $\chi_L = 2.4 - 3.7$ eV различие рис. 9 и рис. 10 статистически значимое, металличность Am-звезд ниже металличности нормальных A-звезд на 0.1-0.15 dex. Мы придаем значение лишь факту такого различия с акцентом на его методическое происхождение, не интерпретируя абсолютные значения металличностей A и Am-звезд. Величина последних зависит от того, какие систематические ошибки мы вносим, полагая, что условие ионизационного равновесия для атомов железа выполняется.

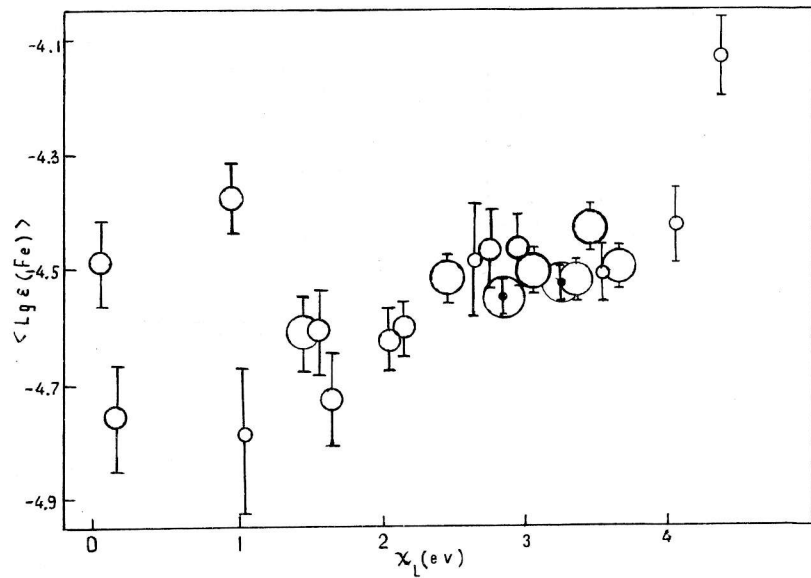


Рис. 10. То же, что и на рис. 9, но для звезд Am.

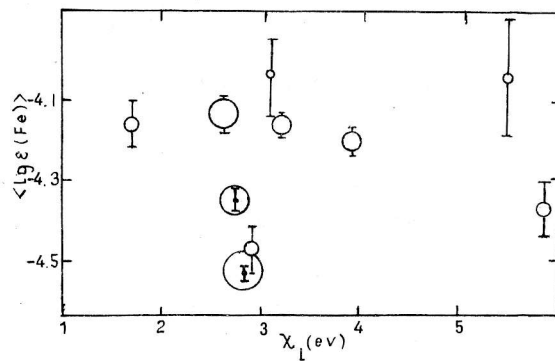


Рис. 11. Зависимость средней металличности диска от χ_L , полученная по линиям ионизованного железа в спектрах нормальных A и F-звезд. Связь диаметров кружков с ρ см. на рис. 9.

На рис. 11 приведена зависимость металличности диска от χ_L , определенная для различных групп линий ионизованного железа в спектрах нормальных A и F-звезд. Различие средних металличностей для групп линий из узкого интервала $\chi_L = 2.6 - 2.9$ eV устанавливается надежно. Аналогичный результат мы получили, используя для оценки средней металличности диска линии ионизованного железа в спектрах Am-звезд. Из рис. 12 следует, что в каталоге Клочковой и др. (1990) большинство линий Fe^+ сосредоточено вблизи $\chi_L = 2.8$ eV, откуда видна роль этих линий при моделировании условия ионизационного равновесия. Предположим, что уровни иона Fe^+ с $\chi_L = 2.8$ eV перезаселены относительно бoльцмановской населенности. Тогда для объяснения наблюдаемых W_λ потребуется меньшее значение $lg \epsilon(Fe)$. Это, в свою очередь, приведет к тому, что условие ионизационного равновесия будет выполняться при повышенном значении $lg g$ (см. например, рис. 4 в работе Клочковой и др., 1985). И наоборот, относительная недозаселенность указанных уровней приведет к завышению светимостей A и Am-звезд. Аналогичные рассуждения можно привести, рассматривая зависимость, приведенную на рис. 9.

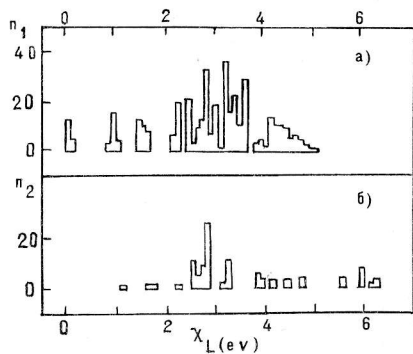


Рис. 12. Распределение числа линий, встречающихся в каталоге Клочковой и др. (1990) у нормальных A и F-звезд 10 и более раз, от потенциала возбуждения нижнего уровня. а) - атом Fe, б) - ион Fe^+ .

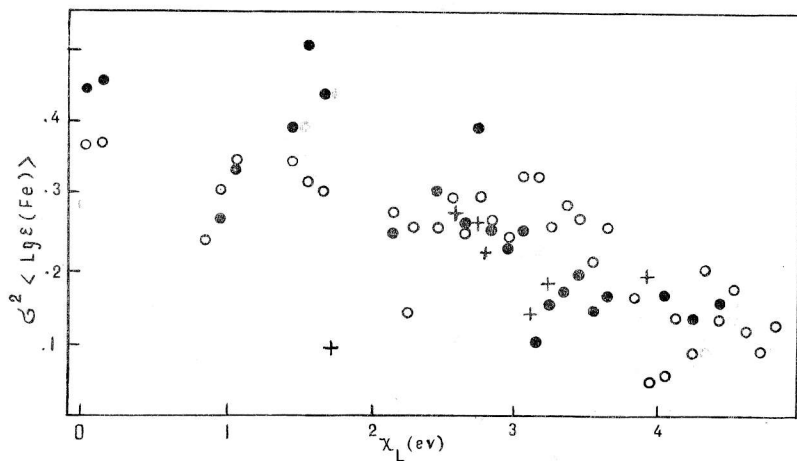


Рис. 13. Зависимость дисперсии металличности диска Галактики от потенциала χ_L . Обозначения: O - A и F-звезды главной последовательности, линии Fe I, ● - Am-звезды, линии Fe I, + - A и F-звезды, линии Fe II.

На рис. 13 дана зависимость дисперсии металличности диска Галактики,

вычисленной по линиям нейтрального и ионизованного железа в спектрах А и F-звезд, от потенциала возбуждения нижнего уровня. Видно, что для линий, возникающих с высоковозбужденных уровней и, следовательно, формирующихся в более глубоких атмосферных слоях, оценка дисперсии металличности приближается к оценке, полученной по спектрам К-гигантов (Клочкова и др., 1989).

ВЫВОДЫ

Мы не склонны однозначно интерпретировать обнаруженную зависимость средней металличности диска от χ_L линий, по которым она определяется, как факт, указывающий на отклонения от бoльцмановской населенности как атомов, так и ионов железа. Данный феномен может быть связан с формализацией процедуры определения микротурбулентной скорости ξ_t по значениям W_λ для сильных и слабых линий. Дополнительным аргументом является и то, что приведенная на рис. 9 зависимость установлена для достаточно широкого интервала эффективных температур ($12000 > T_e > 6000$), т.е. вклад от А и F-звезд приблизительно одинаков (см. рис. 1). Не-ЛТР-эффекты, связанные с характеристиками поля УФ-излучения, должны быть различными для звезд со столь различными эффективными температурами.

Критическими здесь являются наблюдения со спектральным разрешением, достаточным для анализа минимально уширенных вращением профилей линий Fe и Fe⁺ с целью прямого определения параметра уширения ξ_t . Эти наблюдения необходимо выполнить в широком спектральном диапазоне с тем, чтобы иметь большое число линий для определения ξ_t в функции χ_L . В сочетании с требованием регистрации линий с высоким отношением "сигнал/шум" естественно приходим к необходимости развивать схему светосильного эшелле-спектрометра с большим диаметром коллимированного пучка (Клочкова, Панчук, 1991).

Важно подчеркнуть, что обнаруженный эффект может послужить для объяснения повышенной дисперсии металличности диска Галактики, определяемой по спектрам А и F-звезд (Клочкова и др., 1989). Так как эффект наблюдается у А и F-звезд разных типов, мы не связываем его с характерными для отдельных типов звезд эффектами сепарации элементов или их перемешивания. Общим для этих звезд является способ модельного описания (Куруч, 1979) и используемая шкала сил осцилляторов. Следует предпринять поиск эффекта и у звезд, расположенных существенно выше главной последовательности, но для этих объектов эффект может быть существенно скомпенсирован предположением о функциональной зависимости микротурбулентной скорости от высоты в атмосфере, вводимой для устранения зависимости металличности от эквивалентной ширины (Вольф, 1971).

В заключение подчеркнем, что эффект может существовать и для других химических элементов. Исследуя химический состав звезд разных типов, мы встречали объекты, для которых микротурбулентная скорость, определяемая по линиям других элементов, отличалась от ξ_t , определенной по линиям нейтрального железа.

Если микротурбулентная скорость является физической характеристикой, а не параметром подгонки модели к спектру, то она должна быть одинаковой для линий разных химических элементов. Поэтому указанные отличия могут быть проявлением рассмотренного выше эффекта зависимости химсостава от χ_L . Так как спектры

других элементов представлены в видимом диапазоне значительно беднее, чем спектр атома железа, задача уточнения кривой распространенности, свободной от влияния рассмотренного феномена, может оказаться слабо зависящей от растущей точности методов регистрации спектральных линий.

ЛИТЕРАТУРА

- Боярчук А. А., Саванов И. С.: 1985, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 70, с. 57.
- Боярчук А. А., Саванов И. С.: 1986, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 74, с. 49.
- Вольф (Wolf В.): 1971, *Astron. and Astrophys.*, 10, p. 383.
- Гопка В. Ф., Панчук В. Е., Комаров Н. В.: 1989, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 27, с. 13.
- Гуртовенко Э. А., Костык Р. И.: 1989, *Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов*. Киев: Наукова думка, с. 200.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1985, *Письма в астрон. ж.*, 11, с. 692.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. В.: 1985, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 19, с. 22.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1986, *Письма в астрон. ж.*, 12, с. 446.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1987, *О соотношении фотометрических и спектроскопических методов исследования звездных скоплений*. В сб.: *Звездные скопления*, Свердловск: Изд-во Уральского ГУ, с. 5.
- Клочкова В. Г., Мишенина Т. В., Панчук В. Е.: 1989, *Письма в астрон. ж.*, 15, с. 315.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Федорова О. В.: 1990, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 29, с. 84.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1991, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 33, с. 3.
- Куруч (Kurucz R. L.): 1970, *SAO Special Report.*, No. 309, p. 1.
- Куруч (Kurucz R. L.): 1979, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 40, p. 1.

Поступила в редакцию
22 мая 1990 г.