ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОЦИОНА. ГРУБЫЙ АНАЛИЗ

И. А. Зенина, О. А. Зенина,* В. В. Леушин **

По спектрам с дисперсией 1.3 Å/мм в области λλ 3500—7000 Å проведено отождествление линий и измерение их эквивалентных ширин для Процион. Точность измерения W_λ порядка ±0.005 Å. Проанализированы известные значения сил осцилляторов и даны поправки для некоторых списков. Методом кривой роста получен химический состав атмосферы. Определено содержание 70 элементов с точностью ±0.2 в логарифме числа атомов. Особое внимание уделялось определению содержания тяжелых атомов. Обсуждается возможность определения содержания остальных элементов. Сравнение с химическим составом Солнца показывает дефицит Fe, Na, Mg и Ga на 0.75 и V, Co на 0.50 в логарифме числа атомов. Найдены средние значения физических характеристик атмосферы (V_t=2.2÷3.1 км/сек.; $T_{\rm ion}$=5300÷6150° K; $T_{\rm exc}$=5400÷5900° K; lg P_e=1.1÷1.4).

Lines are identified and their equivalent widths are measured for Procyon from the spectra vith a dispersion of 1.3 Å/mm in the region λλ 3500—7000 Å. The accuracy of W_λ measurement is of the order of ±0.005 Å. The known values for oscillator strenths are analysed and corrections for some lists are presented. The chemical composition of the atmosphere is defined by the curve—of—growth method. The abundance of 70 elements is determined with an accuracy of ±0.2 in logarithm of the number of atoms. Special consideration has been given to determining the heavy atom abundance. A possibility to define the abundance of the rest of the elements is discussed. A comparison with the chemical composition of the Sun shows a 0.75 deficiency of Fe, Na, Mg and Ga, and a 0.50 deficiency of V, Co in logarithm of the number of atoms. Mean values for physical charateristics of the atmosphere are obtained (v_t=2.2÷3.1 km/s; $T_{\rm ion}$=5300÷6150° K; $T_{\rm exc}$=5400÷5900° K; lg P_e=1.1÷1.4).

1. Введение

Важная и интересная проблема происхождения химических элементов становится особенно волнующей в приложении к пекулярным звездам, обладающим целым рядом аномалий в химическом составе. Задача объяснения аномалий неразрывно связана со всем комплексом вопросов химической эволюции звезд. Однако прежде чем говорить о химической эволюции и возникновении аномалий в содержании каких-либо элементов, нужно иметь уверенные данные о составе атмосфер как нормальных, так и пекулярных звезд.

Химический анализ атмосфер звезд дает наибольшую информацию о количестве элементов разного вида во Вселенной. Такой анализ очень трудоемок, и хотя он проделан для большого числа звезд многими авторами, эти определения не дают однородной сводки химического состава, так как почти всегда отягощены случайными ошибками, и, кроме того, как от звезды к звезде, так и между результатами различных авторов для одной звезды может существовать систематическое различие. Справедливость этого утверждения можно проиллюстрировать следующими данными для звезды π Boo:

Элемент	Mg	Si	Ca	Sc	Cr	Mn	Ga	Y
Δ[lg N]	−0.1	+0.9	+2.5	+0.7	−1.7	+0.7	−0.8	+2.0

* Сотрудник кафедры астрофизики Ростовского государственного университета.

(здесь Δ [lg N] — разность логарифмов чисел атомов по определениям [1, 2]).

Необходимо отметить, что величина Δ[lg N] зависит гораздо больше от различий в методике работы со спектрограммами (качество спектрограмм, способ проведения непрерывного спектра и измерения эквивалентных ширин, подход к отождествлению линий и т. д.), чем от метода анализа (кривая роста или модель атмосферы). Результаты, полученные одним автором (или одной школой), по кривой роста и моделям, как правило, сходятся лучше, чем результаты разных авторов по одному из этих методов [3]. Поэтому каждое новое определение химического состава звездной атмосферы является важным для повышения точности данных о содержании элементов в звезде. Особенно это относится к нормальным (стандартным) звездам, при сравнении с которыми и выявляются аномалии.

Звезды спектрального класса А наиболее благоприятны для выявления аномалий в содержании тяжелых элементов, поскольку в более ранних звездах их линии не видны, а в более поздних слабо зависят от изменения числа атомов.

Однако в классе А мало ярких звезд, пригодных в качестве стандартов химического состава. Вега имеет бедный линейчатый спектр, а Сириус сам обладает аномалиями. Поэтому Процион, хотя и имеет спектральный класс F2, вероятно, больше всего подходит как стандарт (однако и здесь могут возникнуть некоторые сложности, связанные с его двойственностью).

Настоящая работа посвящена анализу атмосферы Проциона с целью детального определения химического состава.

2. Эквивалентные ширины линий

Для анализа использованы регистрограммы в прямых интенсивностях эшельных спектрограмм Проциона с дисперсией от 1.1 до 2.2 Å/мм [4]. По двум спектрограммам № 83 и 50 было измерено около 2300 линий различных элементов, причем определение их эквивалентных ширин проводилось по центральным глубинам линий R_c с помощью графиков $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6 = f(R)$, построенных по неблендированным линиям, что позволило уверенно определять W_λ и для бленд. Как отмечалось в работе [5], глубины линий на разных спектрограммах систематически различаются. В отличие от предположения, сделанного в [5], мы считали, что искажениям подвергнуты линии на обеих регистрограммах, причем величина искажения зависит от интенсивности линий. Пластинка № 50 в большей части области длин волн передержана, поэтому «загрубление» чувствительности микрофотометра при регистрации привело к уменьшению глубин малых линий, лежащих в области передержки на характеристической кривой. В то же время на пластинке № 83 из-за недодержки для глубоких линий влияние эффекта Эберхарда увеличивало глубину интенсивных линий (для некоторых наиболее сильных линий остаточная интенсивность меньше нуля), что привело к увеличению W_λ.

Таким образом, систематическое различие в эквивалентных ширинах между двумя пластинками можно объяснить увеличением глубин линий на одной (№ 83) и уменьшением на другой (№ 50), причем из-за зависимости искажений от интенсивности линий более верные значения получаются для сильных линий по пластинке № 50, а для слабых — по пластинке № 83. Эти соображения были учтены при получении средних значений эквивалентных ширин.

То обстоятельство, что на эшельных спектрограммах разные концы соседних полосок спектра перекрывают одну и ту же область длин волн, позволяет, сравнивая эквивалентные ширины одних и тех же линий на соседних полосках, оценить внутреннюю точность наших измерений. Абсолютная величина ошибки измерения W_λ не превышает ± 0.005 Å, а вероятная относительная ошибка редко бывает больше 5% (см. рис. 1).

Сопоставление полученных значений $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$ с данными работ [4, 6, 7] позволяет заключить, что наша система эквивалентных ширин совпадает с системой Гриффина [6] (дисперсия 1÷1.5 Å/мм) и так же, как последняя, сдвинута относительно систем Богудлова [4] и Эдмондса (4.9÷÷9.6 Å/мм) [7].

3. Силы осцилляторов

Систематические различия в значениях сил осцилляторов, определенных разными авторами, являются наряду с разными системами эквивалентных ширин также одним из источников ошибок при определении химического состава атмосферы. Поэтому тщательный анализ данных по силам осцилляторов является необходимым условием точности работы, посвященной анализу атмосферы звезды.

Здесь для большинства элементов использованы силы осцилляторов из [8], поскольку это наиболее полный источник абсолютных значений $\lg gf$; все остальные данные сводились в эту систему. Для FeI мы базировались на данные работы [9], содержащей сводку значений $\lg gf\lambda$ для FeI, полученную на основании критического рассмотрения результатов 18 работ. Для FeII использовались данные [5] и [10]. Хотя между ними имеются различия (разброс ~ 0.25), систематических отклонений нет, и за основу принималась система [10].

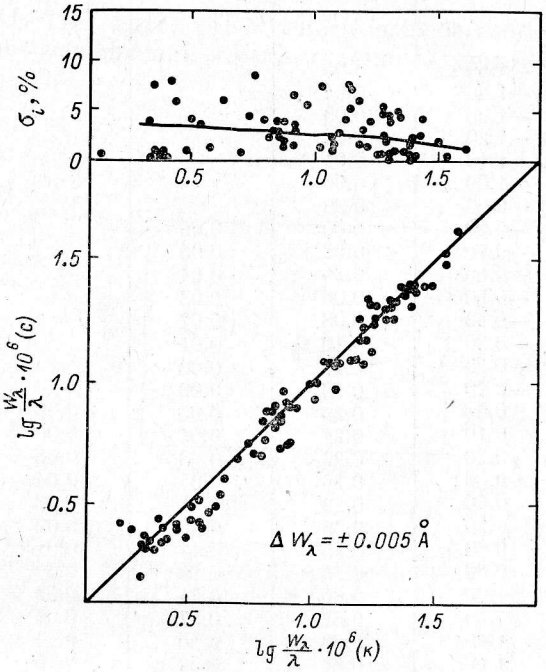

Рис. 1. Зависимость вероятной относительной ошибки σ_i от среднего значения $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$ и сопоставление значений $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$ для одной и той же линии, полученных на синем (с) и красном (к) концах спектрограммы.

В связи с тем, что нами проделано переопределение эквивалентных ширин, используемых в [4] и [5] для нахождения сил осцилляторов, мы получили поправки к значениям $\lg gf\lambda$, приведенные в табл. 1, которые зависят от ε_i (потенциала возбуждения нижнего уровня линии) и от $\lg gf\lambda$ из [4] и [5]. Поправки определялись по разности между W_λ с помощью кривых роста.

4. Кривые роста

Для получения основных средних характеристик атмосферы был использован метод кривой роста. Наблюдаемые кривые роста строились по линиям FeI, FeII, TiII, CrII, VII. Измеренные эквивалентные ширины линий других элементов использовались в основном для определения их относительного содержания в атмосфере. Наиболее хорошая и надежная кривая роста получена для FeI, так как для этого элемента данные о силах осцилляторов наиболее полные и точные. Кроме того, для FeI измерено наибольшее число линий (800). Ошибка в измерениях $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$ не превышает ± 0.2 (в среднем ± 0.1), что влечет за собой ошибку в определении величины $\lg N$ не более ± 0.2. В дальнейшем кривая роста для FeI использовалась для определения

ТАБЛИЦА 1

lg $qf\lambda$	ε_i, эв					
	0	1	2	3	4	5
—1.60	0.05					
—1.40	0.04					
—1.30	0.03					
—1.20	0.02					
—1.10	0.01					
—1.00	0.00					
—0.90	0.00					
—0.80	0.00	0.06				
—0.70	0.02	0.05				
—0.60	0.05	0.04				
—0.50	0.06	0.03				
—0.40	0.08	0.02				
—0.30	0.10	0.01				
—0.20	0.13	0.00				
—0.10	0.16	0.00				
0.00	0.20	0.00	0.06			
0.10	0.21	0.01	0.06			
0.20	0.22	0.03	0.05			
0.30	0.26	0.05	0.04			
0.40	0.28	0.07	0.03			
0.50	0.36	0.09	0.02			
0.60	0.45	0.12	0.01			
0.80	0.55	0.18	0.00	0.06		
1.00	0.60	0.21	0.02	0.05		
1.20	0.62	0.27	0.06	0.03		
1.40	0.63	0.40	0.10	0.01		
1.60	0.68	0.52	0.16	0.00	0.06	
1.80	0.76	0.58	0.21	0.01	0.06	
2.00	0.84	0.62	0.26	0.05	0.04	
2.20	0.88	0.63	0.36	0.09	0.02	
2.40	0.90	0.67	0.50	0.16	0.00	0.06
2.60	0.92	0.74	0.57	0.19	0.01	0.06
2.80	0.94	0.82	0.61	0.24	0.04	0.04
3.00	0.95	0.87	0.63	0.34	0.08	0.02
3.20	0.78	0.89	0.66	0.46	0.13	0.00
3.40	0.63	0.92	0.72	0.55	0.18	0.01
3.60	0.50	0.94	0.80	0.60	0.23	0.03
3.80	0.47	0.95	0.86	0.63	0.31	0.07
4.00	0.36	0.80	0.89	0.65	0.43	0.13
4.20	0.40	0.67	0.91	0.70	0.54	0.18
4.40	0.42	0.53	0.93	0.78	0.59	0.22
4.60		0.48	0.95	0.84	0.62	0.29
4.80		0.38	0.82	0.88	0.65	0.40
5.00		0.39	0.70	0.90	0.69	0.51
5.20		0.42	0.56	0.93	0.76	0.57
5.40			0.46	0.95	0.83	0.61
5.60			0.41	0.88	0.88	0.64
5.80			0.38	0.73	0.90	0.67
6.00			0.41	0.60	0.92	0.74
6.20				0.50	0.94	0.81
6.40				0.43	0.88	0.86
6.60				0.39	0.76	0.89
6.80				0.41	0.69	0.92
7.00					0.51	0.94
7.20					0.44	0.92
7.40					0.40	0.80

обилия других элементов по отношению к железу. В качестве теоретической кривой роста использованы расчеты Врубеля для моделей Милна—Эдингтона [11]. Параметр $B^0/B^1=0.33$.

5. Физические условия в атмосфере Проциона

Анализируя данные, полученные из кривых роста, и привлекая модели, рассчитанные в [12], можно сделать некоторые выводы о физических условиях в атмосфере звезды.

По кривым роста для FeI, FeII, TiII, CrII, VII обычным способом получены средние турбулентные скорости движения атомов и температуры возбуждения (см. табл. 2).

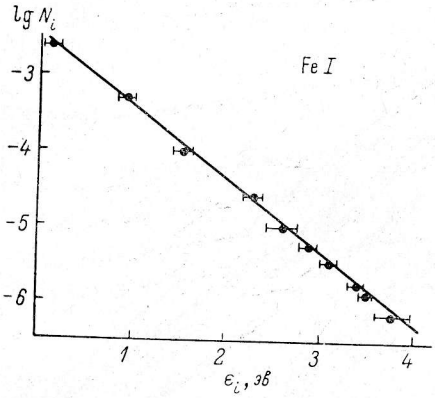

Рис. 2. Зависимость $\lg N_i$ от потенциала возбуждения (ε_i) для определения температуры возбуждения (T_{exc}).

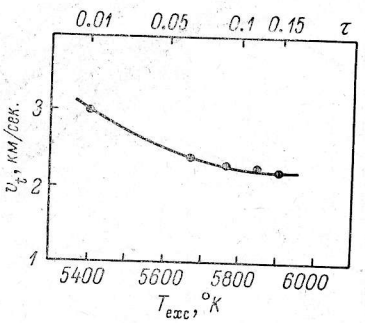

Рис. 3. Зависимость турбулентной скорости (v_t) от оптической глубины (τ).

Линейная зависимость $\lg N_i$ (N_i — число атомов элемента на данном уровне) от потенциала возбуждения (рис. 2) показывает, что в атмосфере Проциона с достаточной точностью выполняются условия ЛТР, и, следовательно, распределение N_i описывается формулой Больцмана. Изменение с глубиной микротурбулентной скорости представлено на рис. 3. Здесь по нижней шкале отложено значение T_{exc}, полученное для того слоя атмосферы, для которого определено v_t, а по верхней — значение оптической глубины τ, взятое по моделям из [12] и соответствующее данной температуре. Эту зависимость можно описать формулой: $v_t = v_0/(1+k\tau)$, где $v_0 = 3.10$ км/сек. и $k = 2.76$ вычислено по данным табл. 2 методом наименьших квадратов.

ТАБЛИЦА 2

Ион	T_{exc}, °K	v_t, км/сек.
FeI	5400	3.0
TiII	5670	2.4
VII	5760	2.3
CrII	5850	2.3
FeII	5900	2.2

Для определения ионизационной температуры и электронного давления использовались кривые, построенные по уравнению Саха (зависимость $\lg P_e - \theta_{ion}$ при известной величине $\lg (N_I/N_{II})$) и уравнению $\lg P_e = f(\theta_{ion}, \varkappa_\lambda = \text{const})$. Последние строились по таблицам Боде [13] (рис. 4). На график также нанесены теоретические зависимости $\lg P_e - \theta$, построенные на основании моделей, рассчитанных в [12]. Поскольку спектральный класс Проциона F2—F5, то согласно [14] его $\theta_{eff} = 0.78$, и атмосфера должна описываться моделями с $\theta_{eff} = 0.79$. Однако модели для $\theta_{eff} = 0.75$ по соотношению между $\lg P_e$ и θ расположены ближе к нашим кривым, построенным по уравнению Саха. Поэтому вопрос о том, какие из этих двух групп моделей более применимы к данной звезде, требует более детального рассмотрения.

Учитывая, что линии образуются в основном на глубине $\tau \sim 0.1 \div 0.15$ и то, что по кривым роста получено $0.85 < \theta_{exc} < 0.93$ для различных элементов, можно сделать вывод, что в той области атмосферы, где образуется

большинство линий, электронное давление $\lg P_e$ меняется от 0.6 до 1.6, а температура ионизации θ_{ion} — от 0.83 до 0.91 ($T_{ion}=6050\div5050°$ K). Коэффициент непрерывного поглощения в расчете на один атом $\lg(\varkappa_\lambda/N)$ изме-

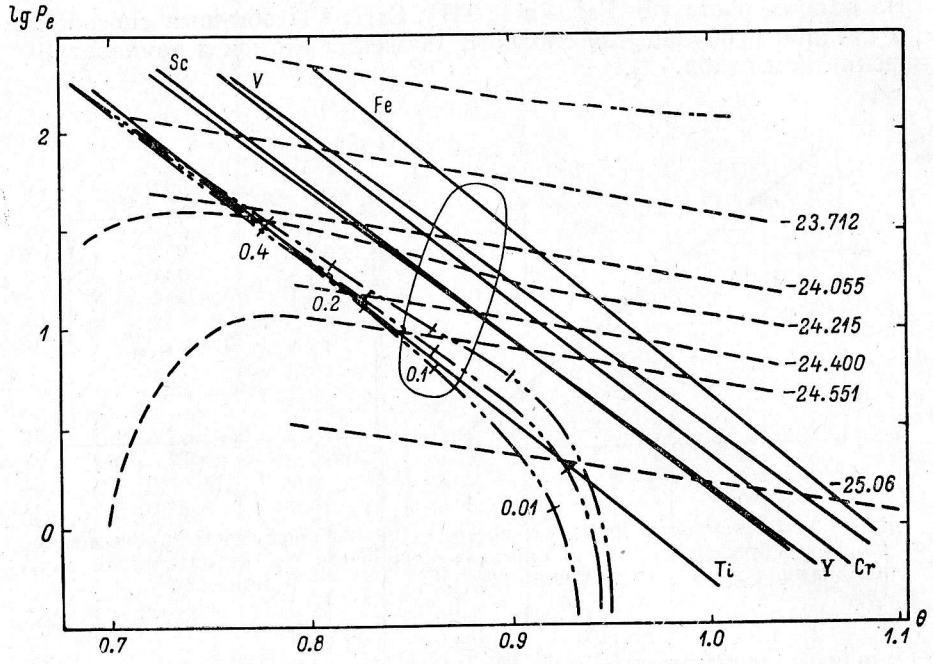

Рис. 4. Зависимость между электронным давлением ($\lg P_e$) и температурой ($\theta=5040/T$) для атмосферы Проциона.

Сплошная линия — по нашим определениям из уравнения Саха; *штриховая линия* — по соотношению $\lg P_e=f(\theta, \varkappa_\lambda=\text{const})$ из [13]; *штрихпунктирная линия* — по моделям атмосфер [12]. Числа у штриховых линий дают значения $\lg \varkappa_\lambda$; у штрихпунктирных — значения оптической глубины в атмосфере с данными P_e и θ. Область параметров слоя, в котором образуются линии, обведена тонкой линией.

няется от —24.055 до —25.065. Кроме того, следует заметить, что так как по линиям FeI получено $\theta_{exc}=0.93$, а по линиям FeII — $\theta_{exc}=0.85$, то на основании рис. 4 слой, в котором образуются линии железа, расположен на оптической глубине $\tau=0.2$, электронное давление в нем $\lg P_e=1.6$; $\lg(\varkappa_\lambda/N)=-23.900$ и $\theta_{ion}=0.88$. Аналогично для слоя, где образуются линии Ti, параметры следующие: $\tau=0.1$; $\lg P_e=0.7$; $\theta_{ion}=0.85$; $\lg(\varkappa_\lambda/N)=-24.75$.

Для других элементов (V, Cr, Sc и Y) область образования линий имеет параметры: $\tau=0.15$; $\lg P_e=1.1\div1.4$; $\theta_{ion}=0.86\div0.90$; $\lg(\varkappa_\lambda/N)=-24.400\div-24.055$.

6. Изучение химического состава

Как уже упоминалось ранее, определение химического состава проводилось по кривым роста, причем для FeI, FeII, CrII, TiII, VII были построены свои кривые роста. Количество атомов элементов определялось по отношению к железу.

Элементы в атмосфере Проциона можно грубо разбить на три группы по трудоемкости определения их обилия, это разбиение можно проделать по атомным весам.

Первая группа — легкие элементы от водорода до калия (H—K), вторая — «группа железа» от кальция до циркония (Ca—Zr) и третья — тяжелые элементы от ниобия до урана (Nb—U). Элементы первой группы (исключая

ТАБЛИЦА 3

Относительное обилие элементов первой группы и параметры линий, по которым проводилось его определение

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	Источник	lg $\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
Li						—4.5
I	6707.74	0.00	3.73	[8]	0.001	—5.2
	6707.89					
Be						
I	4572.671	5.25	3.89	[8]	0.09	—3.22
C						2.53
I	4775.87	7.49	1.56	[10]	0.32	2.30
	4817.33	7.48	1.01		0.33	2.85
	5052.122	7.68	2.08		1.07	3.02
	5380.242	7.68	1.92		0.93	2.91
N						2.61
I	4151.46	10.34	1.88	[15]	—0.04	2.61
	4223.04	10.34	2.54		0.14	2.58
	4254.70	10.33	1.99		0.09	2.65
O						3.41
I	3447.301	9.14	1.66	[10]	0.29	3.41
	4368.30	9.52	1.85		0.46	3.76
Na						—0.23
I	4668.56	2.09	2.39	[10]	0.68	—2.07
	4978.54	2.10	2.49		0.59	—3.22
	4982.813	2.09	2.79		1.01	—2.86
	5153.402	2.09	2.89		0.24	—3.08
	6154.225	2.09	2.99		0.42	—3.14
Al						—0.56
I	3944.009	0.00	2.98	[10]	1.62	—2.34
	3961.53	0.014	3.09		1.61	—2.50
	6695.97	3.14	2.49		0.54	—2.16
S						1.13
I	4694.13	6.50	2.88	[16]	0.66	1.09
	4695.45	6.50	2.13		0.56	1.11
	4696.25	6.50	1.91		0.40	1.14
K						—0.91
I	4044.145	0.00	2.98	[8]	0.25	—4.58
	4047.20	0.00	2.68		0.315	—4.36

ТАБЛИЦА 4

Относительное обилие элементов второй группы и вероятная ошибка его определения

Элемент	lg (N/N_{Fe})	Δ lg (N/N_{Fe})	Элемент	lg (N/N_{Fe})	Δ lg (N/N_{Fe})
Mg	0.93	0.18	Mn	—1.32	0.03
Si	1.47	0.13	Fe	0.00	0.01
Ca	0.62	0.04	Co	—1.65	0.04
Sc	—2.75	0.04	Ni	—0.77	0.07
Ti	—1.10	0.01	Y	—3.39	0.04
V	—2.42	0.01	Zr	—3.49	0.11
Cr	—1.32	0.04			

ТАБЛИЦА 5

Относительное обилие элементов третьей группы и параметры линий *, по которым производилось его определение

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	lg $\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
Cu					—2.20
I	4651.12	5.06	3.94	0.10 **	—2.66
	5105.541	1.38	2.01	0.87	—3.17
	5153.24	3.77	3.98	0.77	—3.06
	5218.20	3.80	4.10	0.65	—3.32
	5782.132	1.64	2.19	0.63	—3.45
Zn					—2.67
I	4722.159	4.01	4.36	1.15	—3.01
	4810.53	4.06	4.54	1.16	—3.14
	6362.44	5.77	4.24	0.08 **	—2.84
Ga					—4.10
I	4172.048	0.10	3.35	0.42	—5.89
Sr					—2.84
I	4607.33	0.00	3.09	0.86	—5.52
II	4161.796	2.93	3.34	1.12	—2.66
	4215.524	0.00	2.63	1.15	—2.94
	4305.45	3.03	3.62	0.88	—3.30
Nb					—3.70
I	3739.80	0.09	3.18	0.59	—4.81
	3791.209	0.13	3.32	0.32	—5.24
	4152.575	0.09	3.26	0.08	—5.50
II	3651.182	0.93	3.21	0.82	—3.82
	3818.862	1.58	3.46	0.11	—4.40
	3898.292	1.69	3.23	0.15	—4.03
Mo					—3.67
I	3864.115	0.00	3.47	0.19	—6.04
	5506.51	1.33	3.70	0.05	—5.23
II	3692.645	3.04	4.39	0.46	—3.69
Ru					—4.07
I	3728.03	0.00	3.55	0.61	—5.18
	3742.28	0.33	3.38	0.10	—5.32
	4199.902	0.81	4.04	0.19	—5.43
	4554.51	0.81	3.81	0.08	—5.32
Rh					—4.13
I	3543.948	0.70	3.91	0.19	—5.48
	3612.470	0.43	3.31	0.18	—5.15
	3700.909	0.19	3.43	0.35	—5.28
	3822.262	0.96	3.83	0.40	—4.92
	3833.889	0.96	3.55	0.44	—4.71
	3958.865	0.96	3.78	0.14	—5.17
Pd					—3.77
I	3609.56	0.96	3.81	0.86	—4.49
	3958.66	1.45	3.02	0.32	—3.94
	4212.95	1.45	3.17	0.16	—4.29
Ag					—4.2
I	4210.94	3.77	3.45	0.17 **	—3.45
	4668.48	3.77	3.33	0.03 **	—3.49
	5465.49	3.77	4.59	0.13	—4.53
Cd					—4.41
I	4799.918	3.78	4.37	0.29	—4.70
	5085.824	3.93	4.78	0.10	—5.22
In					—4.30
I	4511.310	0.27	3.47	0.06	—6.26

ТАБЛИЦА 5 (*продолжение*)

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	lg $\frac{W\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
Sn					—3.62
I	3655.78	2.12	3.47	0.27 **	—4.24
	3801.022	1.06	3.21	0.23	—5.02
Sb					—3.35
I	3637.83	2.28	2.90	0.45	—3.60
	3722.79	2.02	2.30	0.45	—3.30
	4033.55	2.28	2.35	0.42 **	—3.16
Cs					—2.63
I	3611.46	0.00	0.83	0.05 **	—5.30
	4555.28	0.00	2.07	0.38	—6.18
	4593.17	0.00	1.44	0.03	—6.26
Ba					—3.58
II	4130.635	2.60	4.28	1.03	—3.83
	4166.003	2.60	3.38	0.94	—3.10
	4524.998	2.50	2.93	0.77	—2.99
	4554.033	0.00	3.11	1.56	—3.09
	5853.675	0.60	2.18	1.12	—3.39
	6141.72	0.70	3.12	1.36 **	—3.54
	6496.896	0.60	2.78	1.35	—3.34
La					—3.82
I	4187.31	0.00	3.02	0.26	—5.35
II	3794.78	0.24	3.28	0.86	—4.30
	3921.54	0.23	2.59	0.76	—3.75
	3988.51	0.40	3.34	0.95	—4.07
	3995.74	0.17	3.02	0.84	—4.13
	4031.68	0.32	3.05	1.06 **	—3.63
	4042.91	0.93	3.68	0.66	—4.34
	4077.35	0.23	2.95	1.04	—4.41
	4086.72	0.00	3.01	0.92	—4.16
	4196.55	0.32	2.73	1.0	—3.43
	4238.38	0.40	2.83	0.86	—3.70
	4263.59	1.95	3.66	0.53	—3.53
	4269.50	1.78	3.66	0.62	—3.59
	4322.51	0.17	2.02	0.31	—3.81
	4333.76	0.17	3.04	0.71	—4.34
	4429.90	0.23	2.71	0.60	—4.10
	4558.46	0.32	2.07	0.05	—4.02
	4574.87	0.17	1.92	0.22	—3.81
	4619.87	1.75	3.43	0.40	—3.64
	4655.49	1.94	3.74	0.23	—3.99
	4662.51	0.00	1.63	0.15	—3.78
	4743.08	1.78	3.41	0.62	—3.34
	4748.73	0.93	2.48	0.32	—3.56
	4920.98	0.13	2.11	0.23	—4.04
	4921.80	0.20	2.23	0.35	—3.95
	4934.83	1.25	2.36	0.17	—3.33
	4986.82	0.17	1.69	0.39 **	—3.38
	5122.99	0.32	1.93	0.30	—3.59
Ce					—3.78
II	3660.641	0.12	3.24	0.92	—3.60
	3709.333	0.12	3.65	0.90	—3.74
	3781.620	0.53	3.40	1.01	—3.54
	3848.597	0.52	3.50	0.67	—3.55
	3853.16	0.00	2.99	0.75 **	—3.41
	3908.54	0.46	3.02	0.64	—3.44
	3940.338	0.32	3.16	0.37	—3.66
	3942.15	0.00	3.26	0.60	—3.88
	3942.746	0.86	4.24	0.57	—4.10
	3960.91	0.32	3.17	0.29	—3.86
	3993.822	0.43	3.81	0.60	—4.03
	4014.899	0.53	3.42	0.60	—3.55
	4042.58	0.49	3.39	0.28	—3.93

ТАБЛИЦА 5 (*продолжение*)

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	lg $\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
	4062.223	0.88	3.73	0.33	—3.86
	4068.836	0.70	3.25	0.30	—3.58
	4073.477	0.00	3.66	0.52	—4.38
	4075.714	0.70	3.80	0.57	—3.80
	4083.233	0.70	3.57	0.61	—3.53
	4115.374	0.44	3.44	0.60	—3.65
	4117.01	0.87	3.65	0.37	—3.74
	4118.144	0.22	3.49	0.68 **	—3.81
	4120.829	0.32	2.88	0.40	—3.45
	4123.488	0.48	3.56	0.80	—3.46
	4127.367	0.20	3.58	0.54	—4.08
	4133.80	0.04	4.19	1.22	—3.67
	4135.44	0.56	2.89	0.08	—3.61
	4137.63	0.04	3.71	0.71	—4.12
	4144.492	0.00	2.97	0.26	—4.00
	4165.656	0.43	3.90	0.98	—3.57
	4186.599	0.38	4.29	0.65	—4.50
	4202.944	0.45	3.29	0.28	—3.87
	4209.409	0.20	2.98	0.25	—3.83
	4214.040	0.61	3.04	0.25	—3.51
	4270.72	0.48	3.41	0.54	—3.65
	4460.213	0.00	3.67	1.01 **	—3.68
	4471.24	0.22	3.65	0.86	—3.71
	4483.90	0.38	3.51	0.24	—4.21
	4486.909	0.30	3.03	0.35	—3.68
	4527.35	0.32	3.05	0.29	—3.74
	4560.28	0.43	3.51	0.20	—4.21
	4562.360	0.00	3.59	0.52	—4.31
	4628.160	0.04	3.53	0.73	—3.94
	4725.09	0.04	2.42	0.24	—3.43
	4737.28	0.61	3.44	0.42	—3.71
	4757.842	0.47	2.86	0.25	—3.46
	5075.304	0.41	3.16	0.37	—3.68
	5512.085	0.53	3.25	0.22	—3.82
Pr II					—4.34
	3964.82	0.06	2.96	0.35	—4.39
	4033.86	0.37	3.03	0.36 **	—4.17
	4056.54	0.63	3.65	0.86 **	—3.90
	4044.82	0.00	2.81	0.30	—4.35
	4062.817	0.42	3.62	0.40	—4.66
	4222.98	0.05	3.27	0.16	—4.94
	4333.913	0.20	2.93	0.49	—4.07
	4408.84	0.00	2.80	0.11	—4.52
	4429.24	0.00	3.04	0.13	—4.61
	4449.87	0.20	2.64	0.13	—4.21
	4468.712	0.22	2.76	0.37	—4.02
	4496.429	0.05	2.64	0.11	—4.23
Nd II					—3.76
	3894.627	0.06	2.52	0.57	—3.49
	3952.195	0.00	2.44	0.20	—3.90
	3990.103	0.47	3.14	0.44	—3.88
	4038.424	0.18	2.12	0.24	—4.36
	4040.796	0.18	3.17	1.03 **	—3.33
	4051.145	0.38	2.80	0.53	—3.52
	4061.085	0.47	3.64	1.07	—3.44
	4069.27	0.06	2.60	0.33	—3.85
	4109.455	0.32	3.20	0.71	—3.74
	4133.36	0.33	2.47	0.08	—3.77
	4156.083	0.18	3.13	0.47	—4.10
	4177.321	0.06	2.90	0.57	—3.87
	4179.585	0.18	2.45	0.19	—3.76
	4211.286	0.20	2.32	0.15	—3.65
	4303.573	0.00	3.16	0.73	—3.98
	4314.511	0.00	2.09	0.23	—3.52

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	lg $\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
	4338.697	0.74	2.89	0.52 **	—3.28
	4385.663	0.20	2.46	0.42	—3.17
	4446.387	0.20	2.36	0.15	—3.07
	4462.98	0.56	2.81	0.60	—3.27
	4501.858	0.20	2.19	0.03	—3.65
	4811.343	0.06	1.91	0.13	—3.40
	5092.80	0.38	2.48	0.22	—3.57
	5130.596	1.30	3.66	0.33	—3.76
	5234.195	0.55	2.73	0.17	—3.73
	5249.58	0.97	3.35	0.39	—3.69
	5361.47	0.68	2.65	0.25	—3.42
Sm					—3.96
II	3731.258	0.11	2.97	0.97	—3.65
	3735.980	0.28	3.01	0.83	—3.75
	3875.54	0.18	2.41	0.40	—3.80
	3922.397	0.38	3.19	0.36	—4.45
	3946.51	0.19	2.30	0.38	—3.69
	3990.008	0.00	2.56	0.62	—3.85
	4064.576	0.33	2.85	0.33	—4.18
	4169.478	0.25	2.50	0.53	—3.67
	4188.128	0.54	2.88	0.22	—4.14
	4203.05	0.43	2.81	0.22	—4.17
	4220.66	0.54	2.74	0.17	—4.07
	4236.745	0.66	3.05	0.44	—3.95
	4262.68	0.38	2.79	0.62	—3.73
	4329.02	0.18	2.73	0.24	—4.30
	4334.153	0.28	2.70	0.20	—4.23
	4420.53	0.33	2.78	0.59	—3.79
	4424.34	0.49	3.23	0.29	—4.45
	4434.32	0.38	2.90	0.33	—4.19
	4467.34	0.66	3.26	0.55	—4.02
	4519.63	0.55	2.74	0.11	—4.13
	4566.206	0.33	2.25	0.11	—3.84
	4577.69	0.25	2.26	0.21	—3.81
	4642.235	0.38	2.55	0.28	—3.89
	4669.65	0.28	2.29	0.12	—3.92
	4674.60	0.18	2.61	0.21	—4.22
	4704.40	0.00	2.12	0.47	—3.59
	4815.81	0.81	2.19	0.33	—3.66
Eu					—5.02
I	4594.03	0.00	3.99	0.33	—6.41
	4627.22	0.00	3.92	0.26	—6.42
	4661.88	0.00	3.84	0.28	—6.31
II	3819.71	0.00	3.60	0.88	—5.14
	3907.10	0.21	3.62	0.59	—5.38
	3930.50	0.21	3.68	0.48	—5.57
	4129.73	0.00	3.31	0.98	—4.69
	4205.05	0.00	3.54	0.89	—5.07
Gd					—4.44
I	4313.845	0.03	3.69	0.26	—5.40
II	3512.219	0.43	3.26	1.03 **	—3.42
	3545.797	0.14	3.70	0.88	—4.36
	3580.618	0.135	3.40	0.67	—4.38
	3697.73	0.03	3.18	1.06	—3.61
	3764.60	1.25	3.26	0.75 **	—3.19
	3768.39	0.08	3.83	0.60	—5.01
	3894.696	0.00	2.91	0.44	—4.29
	3902.40	0.42	3.03	0.45	—4.02
	3957.68	0.60	3.38	0.29	—4.41
	4037.34	0.66	3.49	0.12	—4.64
	4085.564	0.73	3.57	0.23	—4.54
	4141.017	1.57	2.85	0.15	—3.24
	4212.00	0.42	3.16	0.15	—4.53

ТАБЛИЦА 5 (*продолжение*)

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	lg $\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
	4215.023	0.43	3.04	0.29	—4.22
	4217.195	0.66	3.09	0.40	—3.95
	4223.020	2.34	3.59	0.19	—3.27
	4227.14	0.60	2.56	0.36	—3.53
	4251.733	0.38	3.24	0.13	—4.64
	4253.37	0.56	3.11	0.15	—4.33
	4280.50	0.35	2.93	0.91	—3.37
	4316.06	0.66	2.97	0.16	—4.09
	4419.04	0.49	2.61	0.21	—3.84
	4498.276	0.43	2.22	0.11	—3.62
	5140.839	1.57	2.95	0.23	—3.23
Tb					—5.10
I	4318.85	0.00	3.79	0.55	—4.84
	4326.47	0.00	3.95	0.20	—5.42
	4338.45	0.00	3.70	0.28	—5.08
Dy					—4.60
II	3872.10	0.00	3.43	0.97	—4.32
	3914.86	0.54	2.81	0.16	—4.31
	3944.69	0.00	3.56	0.49	—5.12
	3983.67	0.54	3.26	0.35	—4.52
	4103.31	0.10	3.18	0.42	—4.82
Er					—4.60
II	3580.49	0.05	2.95	0.58	—4.47
	3633.56	0.00	2.87	0.45	—4.70
	3684.27	0.63	3.00	0.14	—4.55
Tu					—5.35
I	3717.92	0.00	3.80	0.41	—6.31
	3744.07	0.00	3.60	0.48	—6.02
	3883.13	0.00	3.63	0.33	—6.23
	3887.347	0.00	3.53	0.12	—6.37
	4094.19	0.00	3.73	0.03	—6.67
	4105.84	0.00	3.69	0.16	—6.49
II	3700.256	0.03	2.80	0.30	—5.00
	3795.759	0.03	2.94	0.07	—5.40
	3848.023	0.00	2.99	0.09	—5.46
	4242.153	0.03	2.36	0.19 **	—4.68
Yb					—3.68
I	3987.98	0.00	3.18	0.28	—6.61
	3990.89	2.44	4.05	—0.06	—5.67
	5556.48	0.00	1.76	0.14	—5.35
II	4726.08	3.31	3.26	0.18	—3.61
	4820.25	3.55	3.68	0.16	—3.84
	5335.15	3.78	3.55	0.10	—3.58
Lu					—4.77
I	4658.02	0.00	1.85	0.04	—4.68
	5001.14	0.51	2.15	0.12	—4.38
	5135.09	0.25	2.40	0.09	—4.92
	5402.57	0.00	1.39	0.11	—4.14
Hf					—4.50
II	3505.23	1.03	3.50	0.21	—5.00
	3644.36	0.79	2.99	0.95 **	—3.76
	3793.37	0.38	2.38	0.74 **	—3.84
	4093.16	0.45	2.22	0.15	—4.34
Ta					—3.47
I	5037.33	1.65	2.67	0.10	—3.47
	5212.75	0.00	0.77	0.14	—3.05
	5419.19	0.75	1.53	0.13	—3.12
	5402.51	0.00	0.99	—	—3.40
	5776.76	0.75	1.50	0.08	—3.15
	5811.10	0.49	1.24	0.13	—3.03

ТАБЛИЦА 5 (*продолжение*)

Элемент / Стадия ионизации	λ, Å	ε, эв	lg $gf\lambda$	lg $\frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$	lg (N/N_{Fe})
W					—4.38
I	4074.374	0.36	2.98	0.21	—4.65
	4102.713	0.77	2.67	0.23	—3.93
	4294.623	0.36	2.83	0.15	—4.57
	4302.123	0.36	2.56	0.03	—4.43
	4680.539	0.60	2.14	0.14 **	—3.66
	4843.829	0.41	2.02	0.09 **	—3.78
Os					—4.83
I	3977.231	0.64	2.53	0.08	—4.33
	4420.468	0.00	2.59	0.08	—4.99
Ir					—4.66
I	3800.122	0.00	2.68	0.40	—4.66
	4268.096	0.88	2.34	0.06	—3.96
	4311.50	1.22	2.60	0.03	—3.96
Pt					—3.89
I	3818.69	1.25	2.29	—0.03	—3.91
	3966.36	1.25	2.33	0.04	—3.47
Au					—3.38
I	4040.94	2.65	2.40	0.08	—3.59
	6278.30	2.65	2.25	0.19	—3.31
Hg					—4.40
I	4046.557	4.65	4.55	0.21	—4.32
	5460.743	5.44	5.32	0.09	—4.43
Tl					—4.40
I	3519.24	0.96	4.20		—6.43
	5350.527	0.96	3.69	0.16	—5.92
Pbl					—4.10
I	3683.469	0.97	3.36	0.08	—5.42
	3739.940	2.65	4.29	0.30 **	—4.54
	4057.812	0.97	3.96	0.57	—5.44
Bi					—4.31
I	4121.53	2.68	3.22	0.02	—4.14
	4722.333				
	4722.652	1.41	2.45	0.09	—4.31
U					—5.27
I	3644.24	0.08	3.19	0.34 **	—4.88
	3659.16	0.08	3.54	0.23	—5.36
	3713.56	0.00	3.12	0.62 **	—4.54
	3871.04	0.00	3.69	0.40	—5.38
	3943.82	0.00	3.56	0.66 **	—4.93
	4042.76	0.08	3.54	0.25	—5.33

* Для всех элементов (кроме Cs) отождествление и параметры линии взяты из [8]; для Cs — из [10].
** Эквивалентная ширина линии увеличена блендой.

литий, бериллий и бор) наиболее обильны в звездах, однако большая часть имеет относительно слабые линии в спектральном классе F, и поэтому определение содержания для них неуверенное (если оно вообще возможно).

Для второй группы положение самое наилучшее, эти элементы имеют многочисленные и сильные линии, позволяющие определить обилие с большой точностью. Нахождение обилия элементов третьей группы также связано со значительными трудностями, вызванными как малым содержанием этих элементов в атмосфере, а следовательно, слабостью линий, так и отсутствием достаточно точных отождествлений и известных физических параметров линий.

Ниже приводятся результаты определения содержания элементов по группам. Причем для первой и третьей групп (табл. 3 и 5) кроме полного содержания элемента приведено содержание иона, определенное по данной линии,

ее параметры и эквивалентные ширины, измеренные нами в спектре Проциона (в таблицах приведены ссылки по отождествлению и параметрам линий). Для элементов второй группы (табл. 4) мы даем только значения содержаний элементов и величину ошибки, поскольку для этих элементов имеются многочисленные списки линий с их параметрами в литературе [4, 5, 8—10].

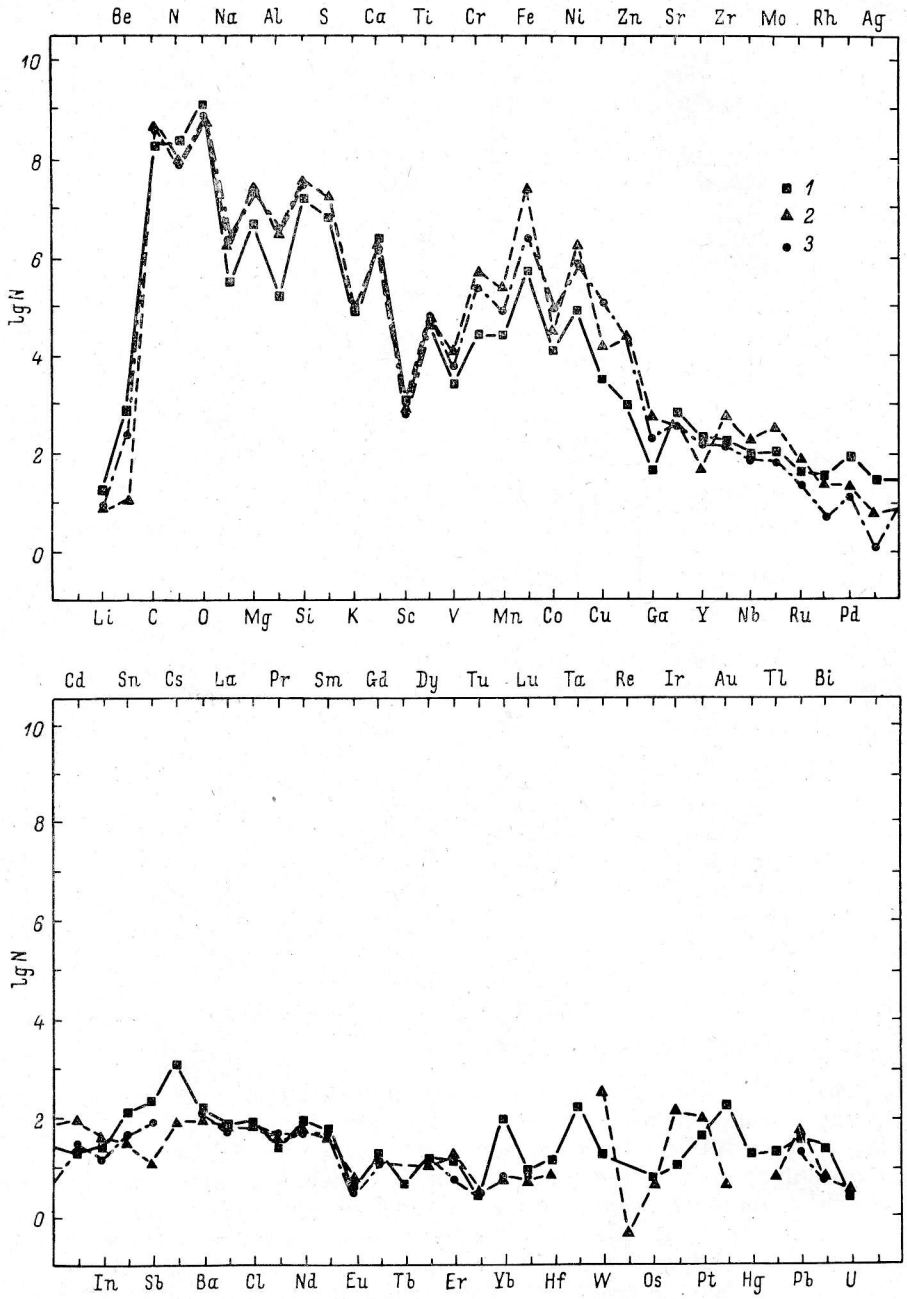

Рис. 5. Сравнение химического состава Проциона (*1*) с химическим составом Солнца: *2* — из [18] и *3* — из [17].

Нужно заметить, что некоторые элементы отнесены нами в группы не по атомным весам, а по частоте встречаемости в литературе. Так, из первой

во вторую перенесены кремний и магний, а из второй в третью — медь, цинк и галлий.

Найти содержание элементов, не вошедших в табл. 3—5, не представляется возможным. Для He, F, Ne, P, Ar, Kr и Te оптические переходы (3500—7000 Å) этих атомов в возбужденные состояния имеют очень большие потенциалы возбуждения от 8 до 21 эв при величинах сил осцилляторов не более $\lg gf\lambda \sim 4.0$. Для получения разумных значений числа атомов необходима точность измерения (разрешающая способность для очень слабых линий) эквивалентных ширин $\Delta W \sim 5 \div 1 \cdot 10^{-4}$ A, т. е. на порядок выше нашей. Линии GeI (4226, 4685) полностью блендированы линиями FeI и FeII, а RbI (4201, 4215) — FeI и SrII, поэтому их обилие также не удается определить.

Содержание Cl, As, Se, Br, Tc, J, Xe и Pm не определялось из-за отсутствия данных о силах осцилляторов.

На рис. 5 представлено сопоставление химического состава Проциона (наши результаты) с химическим составом Солнца. Для Солнца на график нанесены зависимости из [17] и из [18]. Между этими двумя определениями солнечного химического состава имеются различия в обилии железа на 0.96 в логарифме числа атомов, а также других элементов (Mn, Co—Cu, Ga—In) в среднем на 0.5 в логарифме числа атомов.

Поскольку нами определен только относительный (по отношению к Fe) химический состав Проциона, то положение нашей кривой на рис. 5 не определяется однозначно. Если совместить ее с солнечными кривыми до наилучшего согласия для большинства элементов, то в дефиците окажутся все элементы «группы железа» V—Ga (в среднем $\Delta \lg N \simeq 0.75$), а также Na, Mg ($\Delta \lg N \simeq 0.75$) и Al ($\Delta \lg N \simeq 1.25$). При этом обилие всех тяжелых элементов ($z > 38$) хорошо совпадает с солнечным. Если же предположить, что содержание Fe в Процион аналогично солнечному [17], то, напротив, элементы «группы железа» показывают хорошее согласие с солнечными данными, в то время как значения для легких элементов ($z < 22$), исключая Na и Mg, и тяжелых ($z > 38$) лежат систематически выше ($\Delta \lg N \simeq 0.75$).

7. Заключение

Таким образом, нами получены довольно подробные сведения об относительном химическом составе атмосферы Проциона. Однако вопрос калибровки кривой химического состава здесь остается открытым. Если железа в Процион меньше, чем в Солнце, то в дефиците находятся все элементы «группы железа», а также медь, цинк и галлий. Если железа столько же, сколько и в Солнце, то примерно на порядок больше всех тяжелых элементов, начиная со стронция. Не решается методом кривой роста вопрос о содержании гелия в атмосфере Проциона. Ответы на эти вопросы, вероятно, можно будет получить, используя модели атмосферы и теоретические расчеты спектральных линий для атмосфер с разным содержанием водорода, гелия и металлов.

Авторы благодарят И. М. Копылова за возможность использовать эшельные спектрограммы, А. М. Богудлова за получение регистрограмм и полезные дискуссии.

Литература

1. Хохлова В. Л., Алиев С., Руденко В. М. Исследование спектров пекулярных А-звезд марганцевой группы. — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1969, **40**, с. 65—81.
2. Strom K. M. Detailed analyses of the Peculiar A Stars. I. The Manganese Stars. — Astron. & Astrophys., 1969, **2**, No. 2, p. 182—194.
3. Adelman S. J. A study of 21 sharp—lined cool peculiar A stars. — Astrophys. J., 1973, **183**, No. 1, p. 95—120.
4. Богудлов А. М. Определение сил осцилляторов Fe II по спектру Проциона. — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1967, **37**, с. 267—272.
5. Богудлов А. М. Оценка сил осцилляторов однократно ионизованных металлов

по спектру звезды Процион. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1970, **2**, с. 50—66.
6. Griffin R. Curve—of—growth analysis of the spectrum of Rrocyon. — Mon. Not. R. astron. Soc., 1971, **155**, No. 2, p. 139—152.
7. Edmonds F. N. A Spectrophotometric analysis of Procyon. I. Equivalent width's and line profiles. — Astrophys. J., 1965, **142**, No. 1, p. 278—298.
8. Корлисс Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. [Пер. с англ.] М., «Мир», 1968, 562 с.
9. Прокофьев В. К. и др. Силы осцилляторов для спектра FeI. — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1964, **31**, с. 281—323.
10. Касабов Г. А., Елисеев В. В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. М., Атомиздат, 1973, 160 с.
11. Wrubel M. H. Exact curves of growth of the formation of absorption lines according to the Milne — Eddington model. I. Total flux. — Astrophys. J., 1949, **109**, No. 1, p. 66—75.
12. Edmonds F. N. A set of non—gray model atmospheres for Procyon. — Astrophys. J., 1964, **140**, No. 3, p. 902—920.
13. Bode G. Die Kontinuierliche Absorption von Sternatmosphären. Kiev, 1965.
14. Копылов И. М. О шкале эффективных температур звезд. — Изв. Крымск. астрофиз. обс., 1963, **30**, с. 69—89.
15. Wiese W. L., Smith M. W., Glennon B. M. Atomic Transition Probabilities. I. Washington, Nat. Bureau Stand., 1966, 153 p.
16. Kobayshi E., Katahira Y. The atmosphere of Delta Cephei. II. — Sci. Rep. of the Tohoku Univ., Ser. I, 1973, **56**, p. 17—35.
17. Goldberg L., Müller E. A., Aller L. H. The Abundances of the Elements in the Solar Atmosphere. — Astrophys. J. Suppl. ser., 1960, **5**, No. 45, p. 1—138.
18. Engvold O., Hauge O. Elemental abundances, isotope ratios and molecular compounds in the solar atmosphere. — Repr. Inst. Theoret. Astrophys. Oslo, 1974, No. 39, 25 p.

Ноябрь 1974 г.