

УДК 523.9—355

Д. М. Кули-Заде

Контуры бальмеровских линий водорода в разрешенном и неразрешенном спектре Солнца

Изучаются контуры первых четырех линий бальмеровской серии водорода H_α , H_β , H_γ и H_δ в разрешенном и неразрешенном спектре Солнца. Используются (в цифровой форме) новейшие атласы высокого разрешения, полученные с помощью быстро сканирующих двойных монохроматоров и фурье-спектрометров для центра диска и полного потока от всего диска Солнца. С большой точностью определены эквивалентные ширины W , полуширины $\Delta\lambda_{1/2}$, четвертьширины $\Delta\lambda_{1/4}$ и центральные интенсивности r_0 . Исследуется изменение этих величин с номером линий. Проводится сравнение контуров бальмеровских линий в спектрах центра диска и полного потока от всего диска Солнца. По фотоэлектрическим наблюдениям «центр — край» [6] рассчитаны интегрированные по диску Солнца контуры исследуемых линий с учетом потемнения по диску и закона вращения Солнца. Результаты расчетов хорошо согласуются с наблюдаемыми контурами линий в спектре полного потока от всего диска Солнца. Представленные в работе наблюдательные данные можно использовать для исследования механизмов образования водородных линий в атмосфере Солнца.

HYDROGEN BALMER LINE PROFILES IN RESOLVED AND UNRESOLVED SPECTRUM OF THE SUN, by Kuli-Zade D. M.—The profiles of the first four lines of hydrogen Balmer series H_α , H_β , H_γ and H_δ are studied in the resolved and unresolved solar spectrum. Digital forms of the latest high-resolution atlases obtained by modern scanning double monochromators and Fourier spectrometers for the disk centre and for total flux from the whole solar disk are used. Equivalent widths W , half-widths $\Delta\lambda_{1/2}$, quarter-widths $\Delta\lambda_{1/4}$ and central intensities r_0 are determined with great accuracy. Variation of these values with line number is examined. The Balmer lines obtained in the spectrum of the disk centre are compared with those in the spectrum of the total flux from the whole solar disk. Using photoelectric center-to-limb observation by David line profiles integrated over the solar disk were computed with allowance for limb darkening and the law of solar rotation. The results of calculations are in good agreement with observed line profiles in the spectrum of total flux from the whole solar disk. The observational data presented are useful for the study of mechanisms of hydrogen line formation in the solar atmosphere.

Введение. Фраунгоферовы линии несут ценную информацию о физическом состоянии и химическом составе звездных атмосфер. Водородные линии представляют особый интерес, так как они образуются в большом диапазоне оптических глубин атмосферы Солнца. Они интересны и тем, что механизм их уширения существенно отличается от механизма уширения линий других химических элементов.

В видимой области спектра Солнца хорошо представлены первые четыре линии бальмеровской серии водорода H_α (λ 656.2808 нм), H_β (λ 486.1342 нм), H_γ (λ 434.0476 нм) и H_δ (λ 410.1743 нм). Высшие члены этой серии сильно блендированы, и получить их контуры с точностью, отвечающей современным требованиям, практически невозможно.

В последнее время особо актуальным становится исследование контуров фраунгоферовых линий в неразрешенном спектре Солнца, т. е. в спектре Солнца как звезды. Поскольку строение солнечной фотосферы в настоящее время изучено довольно детально, исследование Солнца как звезды может играть большую роль при диагностике звездных фотосфер. Это в первую очередь относится к звездам, спектральный класс и класс светимости которых близки к солнечным.

Мы рассмотрим контуры первых четырех сильных линий бальмеровской серии водорода в разрешенном и неразрешенном спектре Солнца на основе современных цифровых атласов с высоким спектральным разрешением.

Контуры линий бальмеровской серии водорода в разрешенном спектре Солнца, т. е. в спектре разных точек диска, измерялись неоднократно [2, 4, 6, 8, 11, 14—17]. В неразрешенном спектре Солнца они изучаются впервые.

Построение контуров и результаты. Широкие возможности для исследования контуров фраунгоферовых линий открыл Льежский атлас

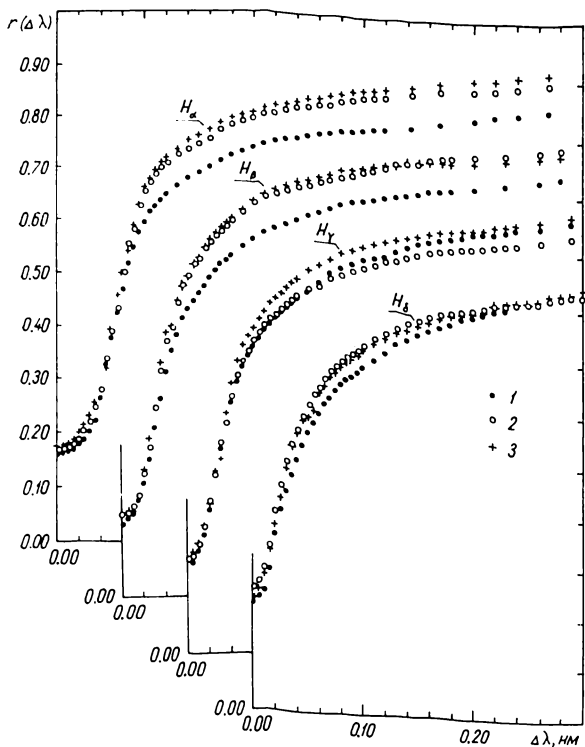
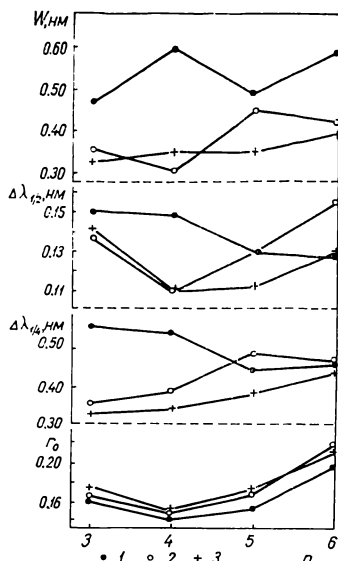


Рис. 1. Контуры бальмеровских линий водорода в спектре Солнца: 1 — центр диска Солнца; 2 — поток I; 3 — поток II

Рис. 2. Изменения основных характеристик водородных линий с номером линий: 1 — центр диска Солнца; 2 — поток I; 3 — поток II



[7], полученный с помощью быстросканирующего двойного монохроматора большой разрешающей силы и охватывающий спектральную область $\lambda\lambda$ 300—1000 нм. В цифровой форме атлас остаточная интенсивность дается с шагом 0.0002 нм, что позволяет построить контуры фраунгоферовых линий достаточно уверенно. Очень ценны также атласы спектра Солнца как звезды [5, 9]. Атлас [5] составлен с помощью быстросканирующего двойного монохроматора, охватывает спектральную область $\lambda\lambda$ 380—790 нм. В цифровой форме атлас остаточные интенсивности даются через 0.001 нм. Атлас [9] составлен совсем недавно с помощью фурье-спектрометра и охватывает спектральную область $\lambda\lambda$ 296—1300 нм.

Контуры линий построены нами на основе отмеченных атласов с линейной дисперсией 500—1000 мм/нм. Они тщательно освобождались от многочисленных бленд обычным методом. Очень сильно блендрованные участки контура восстанавливались по другому, не деформированному, крылу.

Авторы работ [12, 13] показали, что в атласе [7] уровень локального континуума значительно занижен. По их данным мы построили зависимость поправки к континууму от длины волны по всему спектру и каждый раз исправляли уровень локального континуума. Так мы получили точные контуры линий H_α , H_β , H_γ и H_δ в спектрах

центра диска и полного потока от всего диска Солнца. Контуры линий, усредненные по трем измерениям, представлены на рис. 1 (центр диска — по атласу [7], поток I — по атласу [5], поток II — по атласу [9]).

По контурам линий определены эквивалентные ширины W , полуширины $\Delta\lambda_{1/2}$, четвертьширины $\Delta\lambda_{1/4}$ и центральные интенсивности r_0 линий. Эквивалентные ширины линий найдены численным интегрированием на ЭВМ ЕС-1033 методом Симпсона. Результаты приведены в табл. 1. Мы не случайно определяем четвертьширины линий. Для сильных и широких линий они более характерны, чем полуширины. Именно на уровне четвертьширины резко проявляется закономерность изменения глубины контура с расстоянием от центра линии. Внутренняя точность определения остаточных интенсивностей (в том числе центральных) в свободных от бленд участках контура составляла 0,2 %, а полуширин и четвертьширин — 2 %. Из-за очень большой протяженности крыльев водородных линий эквивалентные ширины определялись менее уверенно, чем другие характеристики. Внутренняя точность определения эквивалентных ширин по нашим оценкам составила 6—8 %.

Таблица 1. Основные характеристики водородных линий в спектрах центра и потока от всего диска Солнца

Спектральная линия	Характеристика	Центр	Поток I	Поток II	Спектральная линия	Характеристика	Центр	Поток I	Поток II
H_{α}	W , нм	0.476	0.360	0.331	H_{γ}	W , нм	0.487	0.456	0.354
	$\Delta\lambda_{1/2}$, нм	0.150	0.137	0.140		$\Delta\lambda_{1/2}$, нм	0.131	0.130	0.112
	$\Delta\lambda_{1/4}$, нм	0.560	0.352	0.332		$\Delta\lambda_{1/4}$, нм	0.446	0.490	0.382
	r_0	0.158	0.165	0.175		r_0	0.151	0.167	0.172
H_{β}	W , нм	0.594	0.311	0.356	H_{δ}	W , нм	0.578	0.433	0.395
	$\Delta\lambda_{1/2}$, нм	0.149	0.110	0.110		$\Delta\lambda_{1/2}$, нм	0.156	0.127	0.132
	$\Delta\lambda_{1/4}$, нм	0.540	0.394	0.343		$\Delta\lambda_{1/4}$, нм	0.466	0.470	0.440
	r_0	0.139	0.148	0.150		r_0	0.196	0.219	0.212

Анализ полученных данных. Ядра линий. Согласно фотоэлектрическим наблюдениям [11], в спектре центра диска Солнца ядро линии H_{α} является асимметричным, минимум интенсивности приходится на $\Delta\lambda = -0.0037$ нм. На краю диска асимметрия исчезает. Несколько позже эта асимметрия была отмечена также в [4]. Мы очень внимательно проверили ядро линии H_{α} . Как в спектре центра, так и в спектре потока от всего диска Солнца отмеченная в [11] асимметрия не подтвердилась. Ядро линии H_{α} , а также ядра других бальмеровских линий оказались симметричными.

На расстоянии $\Delta\lambda = -0.0066$ нм от центра линии H_{δ} наблюдается линия Fe I λ 410.1682 нм с эквивалентной шириной $W = 0.0018$ нм. В прежних наблюдениях она не разрешалась. Причем эта линия на 3 % глубже линии H_{δ} . Поэтому линии H_{δ} приписывалась меньшая центральная остаточная интенсивность по сравнению с действительной.

Как видно из табл. 1, головная линия H_{α} является менее глубокой, чем линия H_{β} . Кроме того, по сравнению с другими линиями, ядро линии H_{α} обладает более плоским насыщенным дном. Это связано с тем, что оптическая толщина в центре линии H_{α} гораздо больше, чем в центре H_{β} и других линий серии.

Сравнение контуров линий в центре диска и в полном потоке. Из рис. 1 видно, что линии H_{α} и H_{β} в центре диска имеют более глубокие и более широкие контуры, чем в потоке. Различие усиливается с удалением от центра линий. Контур линии H_{γ} в центре диска Солнца и в потоке мало отличаются. Для линии H_{δ} различие наблюдается при глубине $R \leq 0.80$. При $R = 0.80$ различие исчезает. В самых далеких крыльях различие снова проявляется.

Как следует из табл. 1, эквивалентные ширины всех четырех линий в спектре центра диска Солнца систематически больше, чем в спектре полного потока. Для линий H_{α} и H_{β} полуширины и четвертьширины в центре диска больше, чем в потоке, в случае линий H_{γ} и H_{δ} они мало отличаются. Для четвертьширины это выражено сильнее, чем для полуширины.

Центральные остаточные интенсивности всех четырех линий в спектре центра диска Солнца немного больше, чем в спектре полного потока.

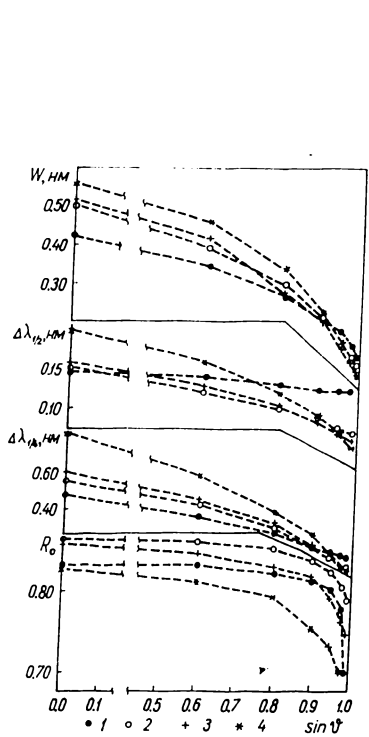


Рис. 3. Изменения основных характеристик водородных линий по диску Солнца. Линия: 1 — H_{α} ; 2 — H_{β} ; 3 — H_{γ} ; 4 — H_{δ}

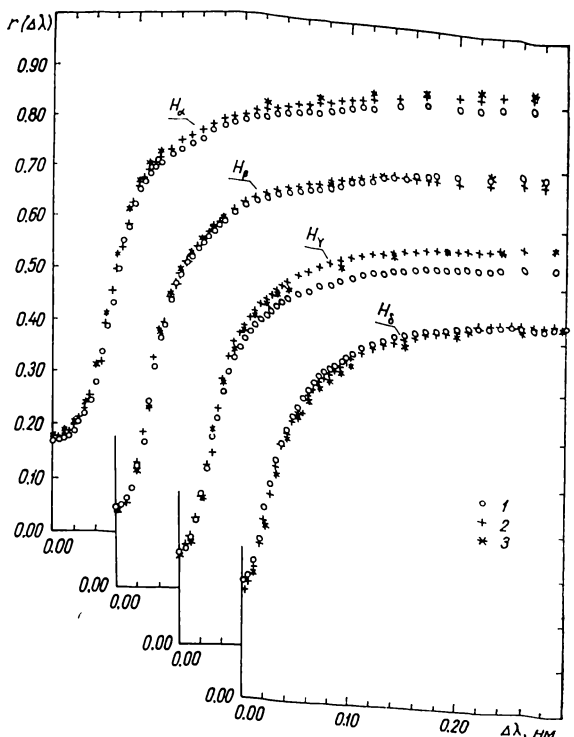


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых контуров бальмеровских линий водорода (1 — поток I, 2 — поток II) с контурами, усредненными по диску Солнца (3)

Изменение основных характеристик контуров с номером линий.

Согласно ранним фотографическим наблюдениям эквивалентные ширины бальмеровских линий уменьшаются с номером линий. Однако более поздние фотоэлектрические [6] и фотографические [2] наблюдения показали иное. На рис. 2 показана зависимость W , $\Delta\lambda_{1/2}$, $\Delta\lambda_{1/4}$ и r_0 от номера линий. Как видно, эквивалентные ширины в среднем увеличиваются с номером линий как в спектре центра диска Солнца (точки), так и в спектре потока (кружки и крестики). Такое поведение эквивалентных ширин линий связано с тем, что с увеличением номера уровня влияние эффектов давления усиливается. Из этого же рисунка видно, что в спектре центра диска Солнца полуширины и четвертьширины заметно уменьшаются с номером линий, а в спектре полного потока от всего диска полуширины линий сначала уменьшаются от H_{α} до H_{β} , затем они начинают увеличиваться. Величины $\Delta\lambda_{1/4}$ увеличиваются с номером линий. Характерно изменение центральных интенсивностей линий с номером линий. Как в центре диска Солнца, так и в полном потоке от всего диска Солнца центральные интенсивности сначала уменьшаются от H_{α} до H_{β} , а затем увеличиваются.

Изменения водородных линий от центра к краю. Как показано в [2], при переходе от центра к краю диска Солнца бальмеровские линии водорода испытывают сильные изменения: эквивалентные ширины, полуширины и четвертьширины значительно уменьшаются, а протяженные крылья линий сильно сокращаются.

Изменения водородных линий от центра к краю исследовались в [6, 8, 15]. Были измерены [8] контуры водородных линий в 20 точках на диске Солнца фотографическим методом. Однако точность этих определений не соответствует современному уровню спектрофотометрических исследований. В [16] исследовано изменение центр — край только в центральных участках бальмеровских линий. Установлено, что на одном и том же уровне фотосферы температура возбуждения и функция источника для центров линий H_{α} , H_{β} , H_{γ} и H_{δ} значительно различаются. Это свидетельствует об отклонении от локального термодинамического равновесия в слоях атмосферы, где образуются ядра водородных линий.

Наиболее обстоятельные фотоэлектрические данные приведены в [6]. Потому для исследования особенностей изменения контуров бальмеровских линий при переходе от центра к краю диска Солнца мы использовали именно эти фотоэлектрические наблюдения, проведенные в семи точках на диске Солнца. По ним мы определили основные характеристики контуров линий H_{α} , H_{β} , H_{γ} и H_{δ} для $\sin \phi$, равного 0,0, 0,6, 0,8, 0,9, 0,98, 0,99.

На рис. 3 показаны изменения W , $\Delta\lambda_{1/2}$, $\Delta\lambda_{1/4}$ и R_0 исследуемых линий по диску Солнца. Как видно, эквивалентные ширины W , полуширины $\Delta\lambda_{1/2}$, четвертьширины $\Delta\lambda_{1/4}$ и центральные глубины линий R_0 значительно уменьшаются при переходе от центра к краю диска Солнца. С увеличением номера линий изменение происходит быстрее.

В табл. 2 представлены основные характеристики бальмеровских линий водорода в спектре Солнца, определенные разными авторами. Приведены только наиболее поздние и полные исследования.

Интегральные контуры линий. Очевидно, что если интегрировать контуры линий, полученных на разных расстояниях от центра диска, то

Таблица 2. Основные характеристики водородных линий по данным разных авторов

H_{α}			H_{β}			H_{γ}			H_{δ}			Литературный источник
W	$\Delta\lambda_{1/2}$	r_0	W	$\Delta\lambda_{1/2}$	r_0	W	$\Delta\lambda_{1/2}$	r_0	W	$\Delta\lambda_{1/2}$	r_0	
Центр диска Солнца												
—	0.166	0.172	—	0.136	0.176	—	0.170	0.185	—	0.160	0.226	[8]
—	—	0.189	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[11]
—	—	0.185	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[4]
—	—	0.169	—	—	0.133	—	—	0.141	—	—	0.174	[6]
—	—	0.154	—	—	0.142	—	—	0.142	—	—	—	[15]
0.425	0.136	0.170	0.548	0.142	0.132	0.562	0.160	0.176	0.567	0.162	0.181	[2]
0.402	—	—	0.368	—	—	0.286	—	—	0.313	—	—	[10]
—	—	0.160	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[14]
0.476	0.150	0.158	0.599	0.149	0.139	0.552	0.131	0.151	0.662	0.156	0.195	Автор, по [7]
Край диска Солнца ($\sin \phi = 0.98$)												
—	0.132	0.224	—	0.092	0.212	—	0.073	0.224	—	0.075	0.345	[8]
—	—	0.306	—	—	0.215	—	—	0.255	—	—	0.352	[6]
0.099	0.106	0.321	0.097	0.083	0.231	0.068	0.057	0.297	0.061	0.043	0.327	[2]
Поток от всего диска Солнца												
0.360	0.137	0.165	0.311	0.110	0.148	0.454	0.130	0.167	0.433	0.127	0.219	Автор, по [5]
0.331	0.140	0.175	0.355	0.110	0.150	0.354	0.112	0.172	0.393	0.132	0.212	Автор, по [9]

интегральный контур должен совпадать с контуром для полного потока от всего диска. Такое интегрирование позволяет: найти контур в спектре от всего диска Солнца по данным наблюдений «центр — край»; судить о достоверности результатов наблюдений «центр — край» и наблюдений спектра потока путем сравнения рассчитанных и наблюдаемых интегральных контуров. Для вычисления интегрированных или усредненных по диску Солнца контуров водородных линий мы использовали наблюдения [6]. При этом считали, что солнечный диск обладает сферической симметрией и контуры линий являются функцией только расстояния от центра диска Солнца.

Зависимость скорости вращения Солнца от широты задавалась эмпирической формулой из [1], а коэффициент потемнения по диску Солнца брался из [3]. Вычисление интегральных контуров линий проводилось на ЭВМ ЕС-1033. Как видно из рис. 4, для всех четырех линий интегральные контуры хорошо согласуются с наблюдаемыми контурами в потоке от всего диска Солнца, что свидетельствует о достоверности наблюдательных данных в разных точках диска Солнца, а также и данных наблюдений спектра от всего диска.

Заключение. Результаты настоящей работы представляют собой наиболее полные и обобщенные экспериментальные характеристики бальмеровских линий водорода H_{α} — H_{δ} в спектре центра диска Солнца и в спектре Солнца как звезды, выведенные на основе последних высокоточных наблюдений. Эти данные можно использовать для расчета модельных теоретических контуров водородных линий, исследования механизмов их образования и изучения строения солнечной атмосферы. Они могут применяться как солнечный стандарт водородных линий.

1. Гадун А. С., Костык Р. И., Шеминова В. А. Вращение солнечной фотосферы по данным наблюдений центральных глубин фраунгоферовых линий // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 6.—С. 53—56.
2. Кули-Заде Д. М. О контурах сильных фраунгоферовых линий спектра Солнца. I. Водородные линии // Астрон. журн.—1964.—41, вып. 5.—С. 920—929.
3. Макарова Е. А., Харитонова А. В. Потемнение диска спокойного Солнца к краю (усредненные данные) // Там же.—1976.—53, вып. 6.—С. 1234—1243.
4. Северный А. Б. Причины расширения водородных линий в спектре Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1956.—16.—С. 54—66.
5. Beckers J. M., Bridges C. A., Gilliam L. B. A high resolution spectral atlas of the solar irradiance from 380 to 700 nanometers.—Sacramento Peak Observ., 1976.
6. David K. H. Die Mitte-Rand-Variation der Balmer-Linien H_{α} — H_{δ} auf der Sonnenscheibe // Z. Astrophys.—1961.—53, N 1.—S. 37—67.
7. Delbouille L., Neven L., Roland G. Photometric atlas of the solar spectrum from λ 3000 to λ 10000 Å.—Liege: Univ. press, 1973.
8. Jager C. D. The hydrogen spectrum of the Sun // Rech. Astron. observ. Utrecht.—1952.—13, part 1.—P. 1—93.
9. Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L. Solar flux atlas from 296 to 1300 nm.—New Mexico: Nat. solar Observ., 1985.
10. Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J. The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å.—Washington, 1966.—345 p.
11. Pierce A. K. Photoelectric observations of the profile of H_{α} in Sun's spectrum // Astrophys. J.—1954.—120, N 2.—P. 233—236.
12. Rutten R. J., van der Zalm E. B. J. Revision of solar equivalent widths, Fe I oscillator strengths and the solar iron abundance // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1984.—55, N 1.—P. 143—161.
13. Rutten R. J., van der Zalm E. B. J. Clean lines in the solar flux spectrum // Ibid.—55, N 2.—P. 171—177.
14. Ulrich G. D., von Uexkull M. Spectroscopic investigation of the chromosphere. III. // Solar Phys.—1973.—30, N 1.—P. 71—74.
15. White O. R. Limb-darkening observations of H_{α} , H_{β} , H_{γ} // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1962.—7, N 70.—P. 333—345.
16. White O. R. Analysis of center-to-limb variations in H_{α} , H_{β} and H_{γ} // Astrophys. J.—1963.—137, N 4.—P. 1217—1231.
17. White O. R. Photometric observation of the mean solar H_{α} line profile // Ibid.—1964.—139, N 4.—P. 1340—1341.