УДК 535.375.36

АНАЛИЗ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ СРЕДСТВ ЭВМ

Псарев В.И.

Основной механизм переноса энергии электромагнитного излучения из центра Солнца наружу – поглощение (фотоионизация внутренних оболочек атомов [1, 2]) и переизлучение его с постепенным увеличением длины волны атомов по мере понижения температуры и удаления от центральных слоев к наружным. Прохождение света через фотосферу наружу также сопровождается изменением его интенсивности вследствие поглощения многократного переизлучения и рассеяния. Поглощение уменьшает интенсивность первичного пучка излучения, а переизлучение увеличивает ее.

Настоящая работа посвящена аналитическому описанию прослеживаемого непрерывного солнечного спектра, простирающегося от длинных инфракрасных волн до короткого ультрафиолетового излучения.

Для состояния локального термодинамического равновесия градиент излучения равен нулю и интенсивность, представляемая формулой Планка, должна зависеть только от температуры [2]. В этом случае функция источника излучения

$$S_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1\right]^{-1}, \qquad (1)$$

где h – постоянная Планка; λ – длина волны излучения; c – скорость света; k постоянная Больцмана; T – температура по шкале Кельвина.

В формуле (1) перейдем к относительной энергии фотона $\varepsilon = \frac{h\nu}{kT}$, где $\nu = \frac{c}{\lambda}$. Получим

$$I_1(\varepsilon) = f_o\varepsilon^3[\exp(\varepsilon)-1]^{-1}, \qquad (2)$$

где $f_0 = \frac{2\pi k^4T^4}{c^2h^3}$.

С учетом поглощения и рассеяния спектральная мощность каждого излучающего элемента фотосферы, лежащего на луче зрения, можно представить в виде (ср. [2], 135)

$$I_2(\varepsilon) = f_1[1-\exp(-b\varepsilon)], \qquad (3)$$

где b – постоянная.

С другой стороны, учитывая, что непрерывное поглощение света в фотосфере, в основном, определяется фотоионизацией отрицательных ионов водорода [1], можно записать

$$I_3(\varepsilon) = f_2[\exp(\varepsilon-\varepsilon_0)+1]^{-1}, \qquad (4)$$

где ε_0 – так называемая энергия прозрачности.

Следовательно, учитывая (2)-(4), обобщенное выражение для плотности распределения мощности излучения в солнечном спектре запишется в таком виде

$$I(\varepsilon) = c\cdot\varepsilon^a[1-\exp(-b\varepsilon)]\cdot[\exp(\varepsilon)-1]^{-1}\cdot[\exp(\varepsilon-\varepsilon_0)+1]^{-1}, \qquad (5)$$

где a, b и ε_0 определяются из данных опыта.

Возможности и правомерность описания непрерывного солнечного спектра функцией (5) оценим с помощью соотношения между ее моментами (см. также [3]).

<u>Соотношение между моментами</u>. Для целей последующего сопоставления с экспериментальными данными функцию (5) представим в таком виде $I_n(\varepsilon) = \varepsilon^n I(\varepsilon)$, где n может принимать целочисленные и дробные значения больше нуля. Прологарифмируем это выражение, а затем продифференцируем. Получим $\varepsilon dI_n(\varepsilon) = nI_n(\varepsilon)d\varepsilon + \varepsilon^{n+1}dI(\varepsilon)$.

Проинтегрируем слева и справа в пределах от 0 и до ∞ с учетом того, что $\left.\varepsilon I_n(\varepsilon)\right|_0^\infty = 0$, и соотношение между моментами примет такой вид

$$(n+a+1)M_n + bM_{n+1-\gamma_1} = M_{n+1-\gamma_2} + M_{n+1-\gamma_3}\,, \qquad (6)$$

где значения моментов относительно $\varepsilon = 0 : M_n = \int\limits_0^\infty \varepsilon^n I(\varepsilon)d\varepsilon$;

$$M_{n+1-\gamma_1} = \int\limits_0^\infty \varepsilon^{n+1} I(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\gamma_1(\varepsilon)}, \quad \gamma_1(\varepsilon) = \exp(b\varepsilon) - 1;$$

$$M_{n+1-\gamma_2} = \int\limits_0^\infty \varepsilon^{n+1} I(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\gamma_2(\varepsilon)}, \quad \gamma_2(\varepsilon) = 1 - \exp(-\varepsilon);$$

$$M_{n+1-\gamma_3} = \int\limits_0^\infty \varepsilon^{n+1} I(\varepsilon)\frac{d\varepsilon}{\gamma_3(\varepsilon)}, \quad \gamma_3(\varepsilon) = 1 + \exp(\varepsilon_0 - \varepsilon);$$

Если моменты распределения мощности излучения от какого-либо источника удовлетворяют соотношению (6), то это распределение должно описываться функцией (5), естественно, с какой-то определенной точностью.

Сопоставление с экспериментом. Оценим с помощью (5) и соотношения между моментами (6) качество отображения ими распределения мощности излучения в солнечном спектре [4]. Экспериментальные значения интенсивности света $I(\varepsilon)$ для каждой длины волны приведены в таблице. Распределение $I(\varepsilon)$ нормировано на единицу и характеризуется моментами m_i ($i = 1$, 2, 3 и 4) относительно среднего значения m_s, имеет отрицательный коэффициент асимметрии S_k с четко выраженным максимумом (ex = - 0,335). Его сопоставление с функцией (5) позволило определить численные значения величин a = 4,0, b = 4,2 и ε_0 = 8,7. Следовательно, анализу подлежит численная формула

$$I'(\varepsilon) = 1.054\cdot 10^{-2}\cdot \varepsilon^4(1-e^{-4.2\cdot\varepsilon})\cdot(e^{\varepsilon}-1)^{-1}\cdot(e^{\varepsilon-\varepsilon_0}+1)^{-1}, \qquad (7)$$

с помощью которой рассчитаны значения $I'(\varepsilon)$, приведенные в той же таблице. Она также определяет спектральное распределение интенсивности и должна удовлетворять соотношение (6) между моментами.

Обозначим через $l_n = (n+5)M_n + 4{,}2M_{n+1-\gamma_1}$ и величину $r_n = M_{n+1-\gamma_2} + M_{n+1-\gamma_3}$ – так называемые пакеты моментов [3]. Их численные значения для экспериментального распределения интенсивности, соответствующие отдельным n, не сильно отличаются друг от друга. Этот факт указывает на правомерность описания с помощью (7) распределения интенсивности в реальном солнечном спектре. Но это также означает, что спектральный состав света, излучаемого Солнцем (после учета влияния поглощения в земной атмосфере и присутствия линий Фраунгофера) в визуальной области, не соответствует планковскому ни при какой температуре (в формуле (7) величина a = 4, что больше 3). Далее, максимумы экспериментального распределения и рассчитанного с помощью (7) практически совпадают, хотя их коэффициенты асимметрии незначительно отличаются друг от друга. Коротковолновая часть спектра описывается с помощью (7) хуже, чем длинноволновая. Однако численное значение $\varepsilon_0 = 8.7$ отражает известный экспериментальный факт о резком ослаблении непрерывного спектра Солнца в интервале коротких длин волн (см., например, [1]).

Таблица - Данные анализа спектра в центре солнечного диска (T = 6050°K)

λ,мкм	ε_0	$I(\varepsilon)\cdot 10^2$	$I'(\varepsilon)\cdot 10^2$	Значения моментов и их пакетов
5,0	0,476	0,08	0,0768	m_S = 4,396
4,0	0,595	0,15	0,1493	m_2 = 2,758
3,0	0,794	0,33	0,3328	m_3 = -0,131
2,5	0,952	0,54	0,5346	m_4 = 20,266
2,0	1,190	0,98	0,9177	s_K = -2,861
1,8	1,323	1,30	1,1673	ex = -0,335

1,6	1,488	1,73	1,5037	$n = 0$; $M_0 = 22{,}143$
1,4	1,701	2,12	1,9672	$l_0 = 11{,}076$
1,2	1,984	2,61	2,6010	$r_0 = 10{,}969$
1,0	2,381	3,26	3,4459	$n = 0{,}5$; $M_{0.5} = 45{,}778$
0,8	2,976	4,22	4,4296	$l_{0.5} = 251{,}83$
0,7	3,405	4,71	4,8410	$r_{0.5} = 248{,}79$
0,6	3,968	5,22	5,1088	$n = 1$; $M_1 = 98{,}854$
0,5	4,762	4,77	4,5348	$l_1 = 593{,}17$
0,48	4,960	4,63	4,3149	$r_1 = 584{,}75$
0,46	5,176	4,55	4,0527	$n = 2$; $M_2 = 512{,}82$
0,44	5,411	3,95	3,7482	$l_2 = 3589{,}78$
0,42	5,669	3,50	3,3997	$r_2 = 3529{,}20$
0,40	5,952	2,77	3,0102	$n = 3$; $M_3 = 2982{,}40$
0,38	6,265	1,87	2,5825	$l_3 = 2359{,}30$
0,36	6,613	1,77	2,1247	$r_3 = 23448{,}50$
0,34	7,003	1,53	1,6499	
0,32	7,440	1,19	1,1846	
0,30	7,936	0,77	0,760	
0,28	8,503	0,33	0,417	
0,26	9,157	0,17	0,186	
0,24	9,920	0,07	0,064	
0,22	10,822	0,05	0,016	
0,20	11,904	0,01	0,0028	

Примечание: $I(\varepsilon) = \lambda \cdot I_\lambda(O)$ – экспериментальное значение интенсивности; $I_\lambda(O)$ – интенсивность излучения центра диска Солнца для спектра со сглаженными неоднородностями [4]. О других обозначениях смотрите в тексте.

В заключение заметим, задача о распределении излучения в фотосфере Солнца, при наличии поглощения, переизлучения и рассеяния света, чрезвычайно трудна и недоступна. В простейшем, модельном случае обычно определяется поле излучения, которое характеризуется определенной интенсивностью, зависящей от частоты, координат и направления луча, но только не от времени. Такой подход лежит в основе стационарной теории переноса излучения. Гораздо более сложной является задача о нестационарном переносе излучения и, тем более, в неравновесной динамичной среде, какой является солнечная фотосфера. В этой связи, значительный интерес представляет качественный анализ реального солнечного спектра с привлечением средств ЭВМ при введении обобщенных функций на основе плотности распределения Планка с последующим их сопоставлением с экспериментальным непрерывным спектром. При этом важную роль играет необходимость использования соотношения между собственными моментами испытываемой функции распределения.

Подобный метод анализа спектрального излучения проиллюстрирован в настоящей работе. Он позволяет получать ценную информацию о процессах, протекающих в фотосфере Солнца по наблюдениям его непрерывного спектра (на поверхности Земли, за пределами земной атмосферы, с помощью спутников и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. ФЭС – физический энциклопедический словарь. Т.4. – М.: Советская энциклопедия, 1965. – 592с.
2. Гибсон Э. Спокойное Солнце. – М.: Мир, 1977. – 408с.
3. Псарев В.И. Проблема моментов распределений в статистической физике //Известия вузов. Физика. – 1997. - №4. – С.92-97.
4. Аллен К.У. Астрофизические величины (справочник). – М.: Мир, 1977. – 446с.