

Э. Я. ГОЛЬЦ, И. А. ЖИТНИК, Э. Я. КОНОНОВ,
С. Л. МАНДЕЛЬШТАМ, Ю. В. СИДЕЛЬНИКОВ

ЛАБОРАТОРНОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СПЕКТРА РЕНТГЕНОВСКОЙ ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ

(Представлено академиком А. Б. Северным 24 VI 1974)

Первое лабораторное воспроизведение спектров солнечных вспышек было выполнено А. Б. Северным для оптических вспышек в области линии водорода H_{α} $\lambda=6563 \text{ \AA}$ с помощью мощного электрического разряда — «линейный пинч» (1). В настоящем сообщении приводятся результаты воспроизведения участка спектра рентгеновской вспышки на Солнце в области линий FeXXV $\lambda=1,85-1,87 \text{ \AA}$.

Спектр нескольких рентгеновских вспышек на Солнце был получен с помощью брегговских кристаллических спектрометров, установленных на борту спутников «Интеркосмос-4» и «Интеркосмос-7» со спектральным разрешением около $4 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ (2, 3). Спектры вспышек в этой области длин волн были получены ранее Нейпертом и Шварцем (4), однако со значительно меньшим спектральным разрешением.

Основной целью лабораторного воспроизведения спектра вспышки было более точное измерение длин волн линий, чем было достигнуто в спектрах, полученных на спутниках, необходимое для интерпретации спектральных линий в спектрах, и путем сравнения обоех спектров получение информации о физических условиях возбуждения спектров соответствующих ионов. В качестве источника нами была использована высоковольтная вакуумная искра типа «плазменная точка» (5-8). Схема установки изображена на рис. 1, разряд осуществлялся между электродами из чистого железа от контура с параметрами $V=20 \text{ кВ}$,

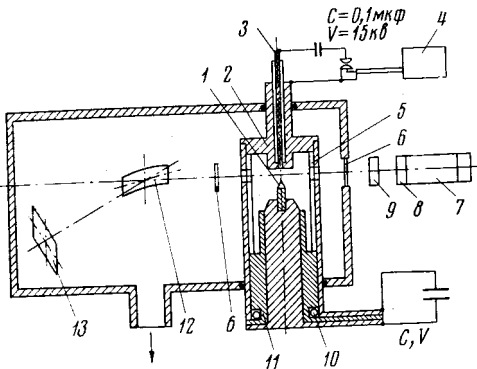


Рис. 1. Схема установки типа «плазменная точка»: 1 — анод, 2 — катод, 3 — триггерный поджиг, 4 — генератор поджига, 5 — керамический изолятор, 6 — фильтр Be, 7 — ФЭУ, 8 — сцинтиллятор, 9 — фильтр Al; 10 — пояс Роговского, 11 — изолятор, 12 — кристалл кварца, 13 — рентгеновская пленка

$C=10 \text{ мкФ}$, $L=80 \text{ нГн}$, для поджига использовался вспомогательный разряд. Спектр получался с помощью рентгеновского спектрографа по схеме Иоганна с вогнутым кристаллом кварца, со спектральным разрешением $\approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$, и фотографировался на пленку УФШ-Р. Подробное описание установки будет дано в другом месте. Следует заметить, что спектр высокоионизованных атомов железа в этой области был получен ранее Коеном и др. (3), Ли и Элтоном (6) и Швобом и Френкелем (7, 8), однако детальной идентификации линий из-за худшего качества спектра не было сделано.

На рис. 2 (см. вкл. к стр. 587) приведена полученная нами спектрограмма и отнесение линий к ионам железа различной степени ионизации.

Линии $Fe K_{\alpha_1}$ и $Fe K_{\alpha_2}$, по-видимому, возникают при бомбардировке анода электронами в начальной стадии разряда, до возникновения плотной плазмы.

На рис. 3а приведен участок спектра рентгеновской вспышки на Солнце, зарегистрированный фотоэлектрически на борту спутника «Интеркосмос-4» во время оптической вспышки класса 2В 16 XI 1970 г. в 01^h01^m UT⁽²⁾. На рис. 3б для удобства сравнения, в том же масштабе длин волн, изображена денситограмма того же участка лабораторного спектра рис. 2.

Сопоставление обоих спектров показывает в целом хорошее согласие солнечного и лабораторного спектров, что свидетельствует о близости условий ионизации и возбуждения атомов в области солнечной вспышки и лабораторного источника. Электронная температура области вспышки на Солнце по измерениям, выполненным в (2), со-

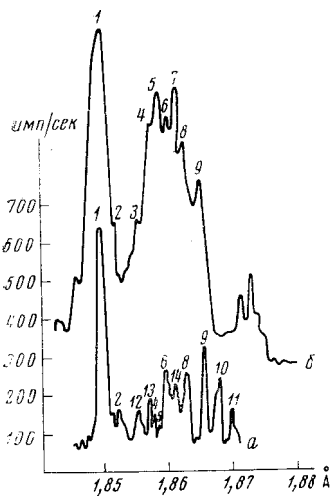


Рис. 3

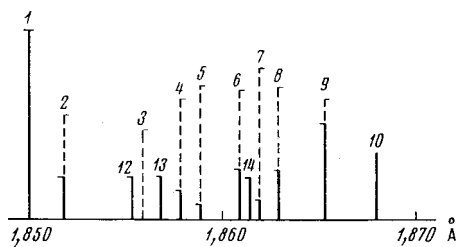


Рис. 4

Рис. 3. а — Спектр рентгеновской вспышки на Солнце; б — денситограмма лабораторного спектра (контрастировано). Масштаб по оси ординат относится только к спектру а). Здесь и на рис. 4 номера спектральных линий соответствуют табл. 1

Рис. 4. Сравнение интенсивностей линий в спектре солнечной вспышки (сплошные линии) и в лабораторном спектре (штриховые линии). Интенсивность линии 1,850 Å в обоих спектрах принята одинаковой

ставляет $T_e \approx 25 \cdot 10^6$ °K *, электронная плотность $N_e \approx 10^{12}$ см⁻³ (9); соответствующие значения для лабораторного источника $T_e = 40 \cdot 10^6$ °K и $N_e = 10^{20}$ см⁻³ (8). Как показывают оценки, для плазмы лабораторного источника в предположении квазистационарности плазмы осуществляется так называемая «корональная модель» ионизации и возбуждения атомов, как и для плазмы солнечной рентгеновской вспышки.

Вместе с тем в обоих спектрах имеются различия. Так, в спектре лабораторного источника отсутствуют линии $\lambda = 1,855$; $1,857$; $1,861$ и $1,868$ Å, имеющиеся в спектре вспышки. Наблюдаются расхождения в относительной интенсивности линий (следует иметь в виду, что на рис. 3 в солнечном спектре масштаб по оси ординат линейный, а в лабораторном спектре, учитывая контрастирование, сильно отличается от линейного).

Рассмотрим результаты сопоставления измеренных значений длин волн линий в обоих спектрах. Измерения в лабораторном спектре выполнены с использованием в качестве репера резонансной линии $FeXXV 1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P^0_1$, для длины волны которой принято вычисленное в (10) значение $\lambda = 1,850$ Å, и линии $Fe K_{\alpha_1}$ ($\lambda = 1,936$ Å); интерполяция между этими линиями произведена по линейному закону, точность определения длин волн составляет $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ Å. В табл. 1 представлены значения длин волн, измеренные в спектре вспышки, в лабораторном спектре и расчи-

* В (9) приведено значение $T_e = 17 \cdot 10^6$ °K, пересчет с помощью уточненных значений сечений дает приведенное в тексте значение.

Сравнение длин волн линий (\AA) в спектре вспышки на Солнце, лабораторном источнике и рассчитанных теоретически

	Спектр вспышки	Лабораторный спектр	Теоретический спектр	Идентификация линии	
1	1,8500	1,8500	1,8499	FeXXV	$1s^2 1S_0 - 1s2p 1P_1$
2	1,8525	1,8520	1,8520	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{1/2} - 1s2p^2 2S_{1/2}$
12	1,8555	—	1,8549	FeXXV	$1s^2 1S_0 - 1s2p^3 P_2$
3	—	1,8560	1,8563	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{3/2} - 1s2p^2 2S_{1/2}$
13	1,857	—	1,8568	FeXXIV	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 2s2p[1P]1s^2 P_{1/2}$
4	1,858	1,8579	1,8574	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{1/2} - 1s2p^2 2P_{3/2}$
5	1,8585	1,8589	1,8589	FeXXV	$1s^2 1S_0 - 1s2p^3 P_1$
6	1,860	1,8609	1,8606	FeXXIV	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 2s2p[3P]1s^2 P_{3/2}$
14	1,8615	—	—	—	—
7	—	1,8620	1,8618	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{3/2} - 1s2p^2 2P_{3/2}$
			1,8624	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{1/2} - 1s2p^2 2P_{1/2}$
8	1,863	1,8631	1,8627	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{1/2} - 1s2p^2 2D_{3/2}$
			1,8631	FeXXIV	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 2s2p[3P]1s^2 P_{1/2}$
9	1,866	1,8655	1,8655	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{3/2} - 1s2p^2 2D_{5/2}$
10	1,868	—	1,8678	FeXXV	$1s^2 1S_0 - 1s2s^3 S_1$
			1,8671	FeXXIV	$1s^2 2p^2 P_{3/2} - 1s2p^2 2D_{3/2}$
11	1,870	—	1,870	FeXXIII	$1s^2 2s^2 1S_0 - 1s2s^2 2p 1P_1$

танные теоретически, исходя из приведенной в этой таблице идентификации линий (¹⁰). Согласие всех трех значений лежит в пределах экспериментальных ошибок и свидетельствует о правильности идентификации линий и высокой точности теоретических расчетов.

Перейдем теперь к сравнению относительных интенсивностей линий в обоих спектрах. Для удобства сравнения на рис. 4 изображены интенсивности линий для обоих спектров в максимуме соответствующих линий с поправкой на переналагающиеся крылья соседних линий (для лабораторного спектра переход от почернений к интенсивностям выполнен с помощью соответствующих марок почернений). В обоих спектрах интенсивность резонансной линии FeXXV $\lambda=1,850 \text{\AA}$ принята одинаковой.

Учитывая сказанное выше о близости значений электронной температуры во вспышке и в лабораторном источнике и значительно большую электронную концентрацию в последнем, находим естественное объяснение отсутствию линий $\lambda=1,855$ и $1,868 \text{\AA}$ в лабораторном спектре. Обе линии, согласно табл. 1, соответствуют запрещенным переходам в спектре FeXXV, первая линия — магнито-квадрупольному переходу $2^3P_2 \rightarrow 4^1S_0$, вторая — магнито-дипольному переходу $2^3S_1 \rightarrow 4^1S_0$, вероятности радиационных переходов для этих линий на 4—5 порядков меньше вероятностей радиационных переходов разрешенных линий. Вследствие этого в плазме лабораторного источника, благодаря большой плотности электронов, как показывают оценки, значительно более часты безрадиационные переходы за счет соударений с электронами $2^3P_2 \rightarrow 2^3P_1$, и $2^3S_1 \rightarrow 2^3P_1$, чем приведенные выше радиационные переходы. Обратное заселение этих уровней за счет безрадиационных переходов с уровня 2^3P_1 не происходит, так как из-за большой вероятности радиационного перехода $2^3P_1 \rightarrow 4^1S_0$ его заселенность значительно меньше, чем заселенность метастабильных уровней 2^3P_2 и 2^3S_1 . В плазме солнечной вспышки безрадиационных переходов с этих уровней практически нет и, таким образом, они высвечиваются.

Отсутствие в спектре лабораторного источника линий $\lambda=1,857$ и $1,861 \text{ \AA}$ требует дополнительного изучения; последняя линия еще не идентифицирована.

Рассмотрим также интенсивность так называемых спутных линий по отношению к резонансной линии FeXXV в обоих спектрах. Спутные линии принадлежат ионам FeXXIV, их верхние уровни являются автоионизационными и заселяются преимущественно в процессе диэлектронной рекомбинации FeXXV ($1s^2$) + e \rightarrow FeXXIV ($1s2pnl$). Отношение интенсивностей спутных линий к резонансной линии FeXXV дается выражением

$$\frac{I_{\text{сат}}}{I_{\text{рез}}} \sim \frac{\delta E}{\theta} e^{\delta E/\theta} \frac{A_{\gamma_0} \Gamma_{\gamma}}{A_{\gamma} + \Gamma_{\gamma}},$$

где δE — энергия связи рекомбинирующего электрона, $\theta = kT_e$, в ридбергах, Γ_{γ} — вероятность автоионизации и A_{γ} — вероятность радиационного перехода с уровня γ , A_{γ_0} — радиационная вероятность резонансного перехода (⁹).

Рис. 4 показывает, что интенсивность спутных линий (по отношению к резонансной линии) выше в спектре лабораторного источника, чем в спектре Солнца. Это, казалось бы, свидетельствует о более низкой температуре лабораторного источника, что противоречит приведенным в начале статьи данным о температуре вспышки и лабораторного источника. Следует, однако, отметить, что электронная температура в спектре вспышки определялась по отношению интенсивности спутной линии FeXXIV $\lambda=1,865 \text{ \AA}$ и резонансной линии FeXXV $\lambda=1,850 \text{ \AA}$ (⁹), в спектре «плазменной точки» — по отношению резонансных линий FeXXV и FeXXVI (⁸). По-видимому, вопрос об относительной интенсивности линии в обоих спектрах требует дополнительного изучения.

В заключение авторы выражают свою искреннюю благодарность А. М. Андрианову за предоставление малоиндуктивного конденсатора, Е. В. Аглицкому за содействие в создании спектрографа, К. Н. Кошелеву за помощь в интерпретации спектрограмм, Л. А. Вайнштейну за полезные обсуждения.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР
Академгородок Московской обл.

Поступило
17 VI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Б. Северный, Изв. Крымск. Астрофизич. обсерватории, т. 20, 22 (1958).
² Б. Н. Васильев, Ю. И. Гринева и др., Краткие сообщения по физике, № 3, 29 (1972).
³ Y. I. Grineva, V. I. Karev et al., Preprint № 80. Lebedev Phys. Institute, 1973. ⁴ W. M. Neupert, M. Swartz, Astrophys. J., v. 160, 189 (1970). ⁵ L. Cohen, L. Feldman et al., J. Opt. Soc. Am., v. 58, 843 (1968). ⁶ T. N. Lie, R. C. Elton, Phys. Rev., v. A3, 865 (1971).
⁷ B. S. Fraenkel, J. L. Schwob, Phys. Lett., v. 40A, 83 (1972); v. 40A, 81 (1972). ⁸ J. L. Schwob, B. S. Fraenkel, Space Sci. Rev., v. 13, 589 (1972). ⁹ Л. А. Вайнштейн, И. А. Житник и др., Краткие сообщения по физике, № 3, 35 (1972). ¹⁰ Л. А. Вайнштейн, У. И. Сафронова, Там же, стр. 40.