

Глава 1

НАБЛЮДЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКИХ СДВИГОВ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПОЛУЧЕННЫХ СПЕКТРОМЕТРОМ ДИОГЕНЕСС

З.Кордылевски, Я.Сильвестер, Б.Сильвестер, М.Сярковски,
С.Плоцняк, А.Кемпа, М.Ковалински, В.Тшебински, Ф.Фарник

Идея измерения доплеровских сдвигов рентгеновских линий в спектрах Солнца, использована в спектрометре ДИОГЕНЕСС, была разработана раньше и проверена в ракетном эксперименте с рентгеновским доплерометром РДР (ракета Вертикаль 11 - 1981 год) [1]. На основании полученных тогда результатов изготовлено два рентгеновские спектрометра ДИОГЕНЕСС, первый из которых работал на борту объекта КОРОНАС-И (запуск в 1994 году) [2], а второй, идентичный экземпляр, на борту КОРОНАС-Ф. Общий вид прибора представлен на рис. 1.1.

В приборе, для измерения доплеровских сдвигов использовано спектрометры с плоскими, качающимися кристаллами. Согласно закону Брэгга, рентгеновское излучение, падающее на поверхность кристалла под углом Θ , “отражается” от кристалла под таким же углом с одновременной монохроматизацией, так как кристалл, за счет интерференции, поглощает все излучение кроме того с длиной волны λ , определенной функциональной зависимостью:

$$k\lambda = 2d \sin \Theta,$$

где d - постоянная решетки кристалла, k - порядок отражения. Меняя угол Θ , например вследствие поворота кристалла, можно получать спектр

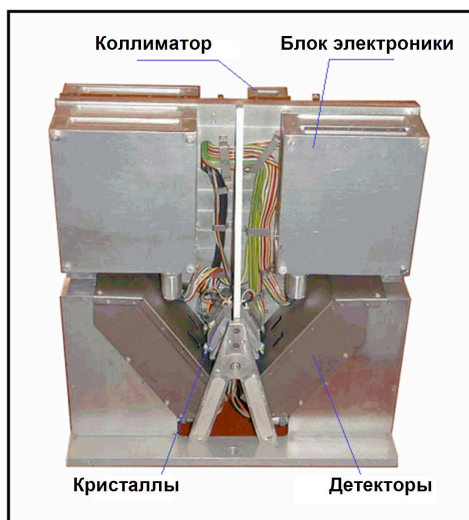


Рис. 1.1. Рентгеновский спектрометр ДИОГЕНЕСС, предназначен для работы в системе доплерометра.

рентгеновского источника излучения с диапазона длин волн соответствующего крайним углом сканирования.

Существо спектрометра предназначенного для работы в системе доплерометра заключается в применении двух, идентичных кристаллов, наклоненных друг к другу под углом α , и жестко прикрепленных к совместному вращающемуся столику. Во время оборота столика кристаллы сканируют спектр в двух противоположных направлениях - один в направлении возрастающих длин волн, второй в сторону уменьшающихся. Когда угол падения достигает величины $\Theta = \alpha/2$, в обоих спектрах измеряется та же длина волны. На рис. 1.2 представлена принципиальная схема измерений доплерометра.

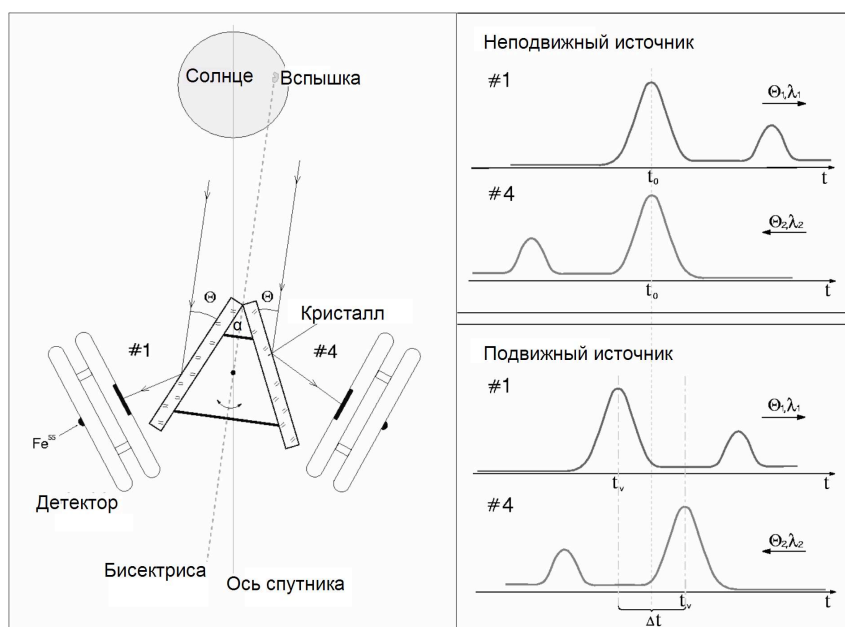


Рис. 1.2. В левой части рисунка представлена схема рентгеновского доплерометра. Одновременное сканирование спектров Солнца в противоположных направлениях дисперсии осуществляется поворотом столика с двумя идентичными кристаллами. В правой части рисунка приведены схематические спектры, полученные от неподвижного (верх рисунка) и движущегося (низ рисунка) источника. При подвижном источнике интервал времени между регистрацией центра линии в обоих спектрах является мерой скорости источника.

Угол α между кристаллами надо подобрать таким образом, чтобы от источника излучения неподвижного относительно

доплерометру в обоих детекторах одновременно регистрировалась произвольная интенсивная спектральная линия. В случае присутствия составляющей движения источника излучения вдоль линии доплерометр-источник вступает в силу эффект Доплера вызывающий изменение длин волн. Спектральная линия тогда не будет наблюдаться одновременно в обоих спектрах. Угол оборота столика между обнаружениями линии в обоих спектрах будет мерой доплеровского сдвига, и тем самым доплеровской скорости источника.

В блоке спектрометра ДИОГЕНЕСС использовано четыре кристаллы (2 x кварц, берилл и ADP), которых параметры были подобраны таким образом, чтобы при обороте столика на угол 140 минут дуги получался полный спектр в окрестности гелиоподобных линий триплета Ca XIX (3.18 Å), S XV (5.04 Å) и Si XIII (6.65 Å). Два кристалла кварца, вырезанные из одного блока монокристалла, работали в системе доплерометра, выстированного точно на резонансную линию гелиоподобного иона Ca XIX ($\lambda = 3.17 \text{ \AA}$). Подробности параметров спектрометра указаны в Таблице 1.1.

Таблица 1.1

Параметры спектрометра ДИОГЕНЕСС.

Канал	1	2	3	4
Кристалл	Кварц	ADP	Берилл	Кварц
Плоскость	10 $\bar{1}$ 1	101	10 $\bar{1}$ 0	10 $\bar{1}$ 1
2d [Å]	6.6855	10.5657	15.9585	6.6875
λ [Å]	3.1781	5.0374	6.6488	3.1781
Линия	Ca XIX	S XV	Si XIII	Ca XIX
$\lambda_{\text{минимум}}$ [Å]	3.1436	4.9807	6.1126	2.9601
$\lambda_{\text{максимум}}$ [Å]	3.3915	5.3721	6.7335	3.2123
Коэффициент отражения [μgd]	91	91	15	90
Полуширина кривой отражения (FWHM) [секунды дуги]	24.1	68.1	94.1	25.6

Спектры от всех кристаллов регистрировались двойными пропорциональными счетчиками с входными бериллиевыми окнами толщиной 145 μ , наполненными аргоном под давлением около

0.5 атм. Механическое соединение двух камер детектора (рабочей и контрольной) обеспечивало идентичность параметров газа во всем счетчике. Окно контрольной камеры детектора было покрыто радиоактивным веществом Fe^{55} , обеспечивающим постоянную интенсивность контрольного освещения детектора. Сигнал этой камеры был использован для регулирования высоковольтного питания анод счетчика. Именно такое решение гарантировало постоянную чувствительность прибора.

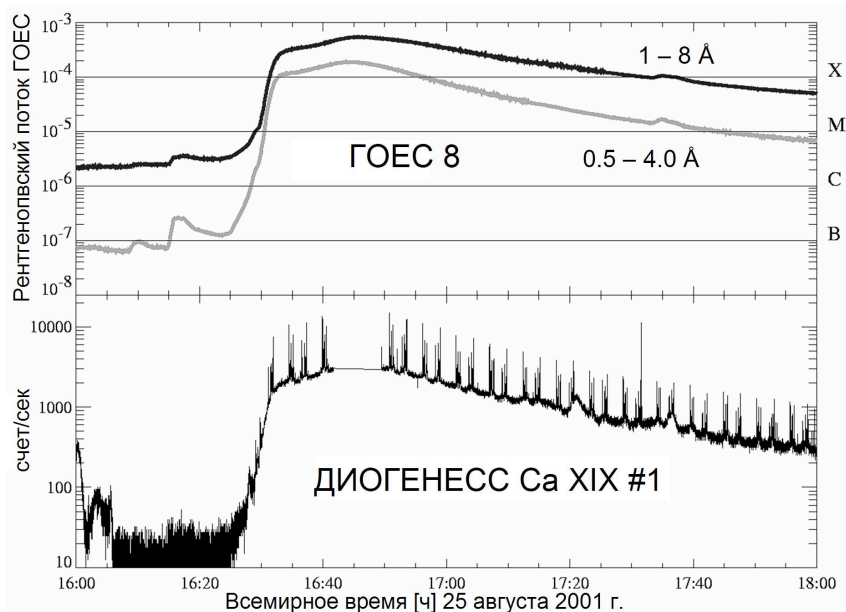


Рис. 1.3. Наблюдения вспышки рентгеновского класса X5.3 (балла 3В Na) с 25 августа 2001 года. Приведены рентгеновские потоки, измеряемые детекторами ИСЗ ГОЕС (две верхние кривые) и в первом канале спектрометра ДИОГЕНЕСС (нижняя кривая). В этой записи на фоне уровня, соответствующего временным изменениям континуума в окрестности $\lambda = 3.1 \text{ \AA} - 3.2 \text{ \AA}$, видны пики, связанные со сканированием групп линий гелиоподобного иона Ca XIX.

К качающемуся столику с кристаллами был прикреплен многощелевый коллиматор, которого узкое ($\text{FWHM} = 10^\circ$), продольное поле зрения сканировало диск Солнца в направлении дисперсии спектрометра. За коллиматором излучение было зарегистрировано в двух диапазонах длин волн (2 кэВ - 4 кэВ и 4 кэВ - 8 кэВ) вышеописанным пропорциональным счетчиком. Ожидалось, что сканы дадут локализацию источника излучения на Солнце, но к сожалению тот детектор не сработал правильно в полете.

Качание комплекса “столлик-коллиматор” с угловой скоростью около 1 минуты дуги/секунду осуществлялось шаговым двигателем, вращающим туда и обратно диск в форме архимедова спирали, к которому пружина прижимала плечо с коллиматором. Полный скан в одном направлении требовал 40000 шагов двигателя.

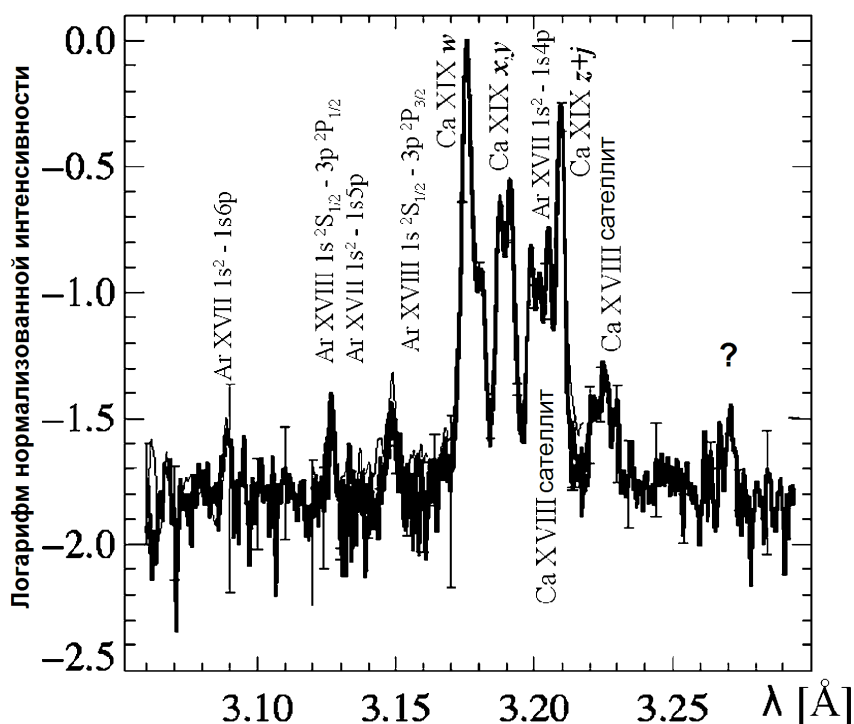


Рис. 1.4. Усредненный спектр излучения вспышки 25 августа 2001 года, полученный спектрометром ДИОГЕНЕСС в каналах №1 и №4. На рисунке приведено два, очень точно совпадающих спектра (толстая и тонкая линии), усредненные отдельно для сканов в противоположных направлениях дисперсии. Приведена идентификация линий. С целью выделения слабых линий, спектры приводятся в логарифмической шкале.

До половины сентября 2001, когда прибор прекратил работу вероятно по механическому повреждению привода спектрометра, собрано сотни спектров излучения солнечных вспышек класса выше M1 по рентгеновской шкале ГОЕС. Особенно ценным является наблюдательный материал получен 25 августа 2001 года (30 спектров), когда на Солнце произошла мощная вспышка оптического балла 3В. По рентгену интенсивность излучения достигла класса X5.3. Рис. 1.3 иллюстрирует временные изменения рентгеновского потока этой вспышки. Для сравнения, на рисунке показано

тоже рентгеновские измерения в двух стандартных диапазонах, полученные детекторами спутника ГОЕС. На графической записи, полученной спектрометром ДИОГЕНЕСС, отмечается похоже по времени изменение континуума, на фоне которого выделяются в форме узких выступов группы интенсивных рентгеновских эмиссионных линий, регистрируемых поочередно в двух направлениях относительно дисперсии.

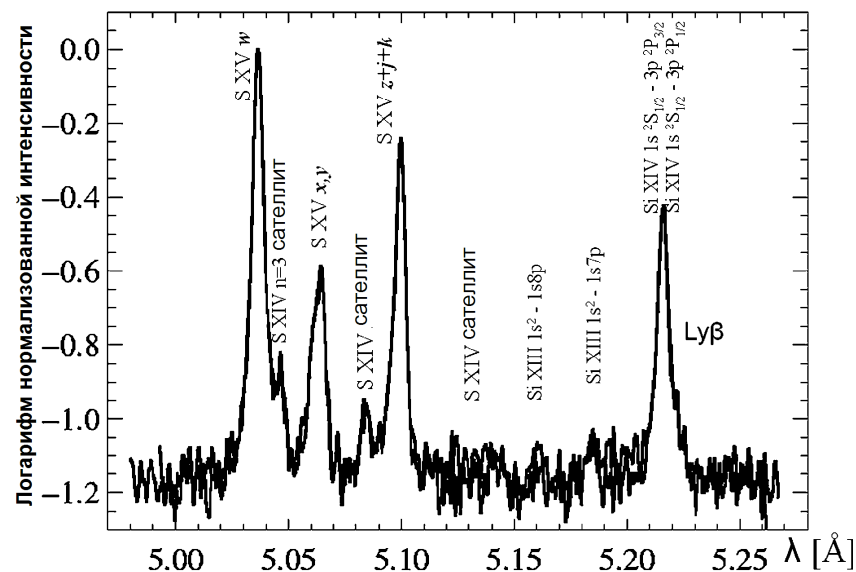


Рис. 1.5. Усредненный спектр излучения вспышки 25 августа 2001 года, полученный спектрометром ДИОГЕНЕСС в диапазоне длин волн 4.98 - 5.26 Å. На самом деле представлены два спектра, усредненные отдельно из сканов проведенных в двух направлениях дисперсии. Спектры очень хорошо совпадают. Спектр захватывает линии, соответствующие указанным переходам.

Так как прибор ДИОГЕНЕСС обладал очень узким инструментальным размытием (лучше чем в предыдущих спектрометрах), наблюдаемые ширины спектральных линий отражают истинные ширины, вызванные термическим и нетермическим уширением. Во время конечных работ при постройке спектрометра проведено подробную и тщательную лабораторную калибровку системы механического привода прибора, а также с очень большой точностью определены параметры кристаллов применяемых в приборе. В полете постоянно проводилась контроль изменений температуры составных частей прибора. На основании этих данных, при учетыванию эффектов вызванных неточностью наведения и стабилизации оси объекта на центр диска Солнца, полученные

спектры можно было точно привязать к шкале длин волн. Это дало возможность сделать очень четкую привязку экспериментальных длин волн и на много увеличило достоверность отождествления наблюдаемых спектральных линий.

На рис. 1.4, 1.5 и 1.6 показано (отдельно для “правых” и “левых” сканов спектрометра) усредненные спектры излучения солнечной вспышки с 25 августа 2001 года. Детальное совпадение спектров, полученных путем сканирования в противоположных направлениях, свидетельствует о реальности всех сходных спектральных особенностей. Многие из них, для которых по расчетам атомной физики известны интенсивности и положения, могли быть отождествлены впервые. Идентификация линий еще не закончена.

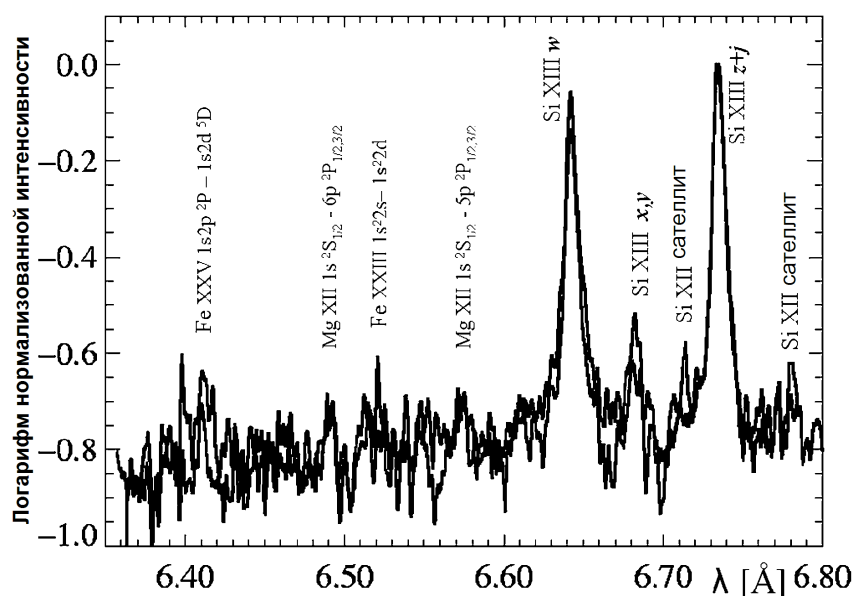


Рис. 1.6. Два усредненные рентгеновские спектры вспышки (две почти совпадающие кривые), которая произошла 25 августа 2001 года, полученные прибором ДИОГЕНЕСС во время сканирования в противоположных направлениях дисперсии. Приведена идентификация основных линии с диапазона 6.35 - 6.80 Å.

Спектры, полученные с использованием спектрометра ДИОГЕНЕСС для исследованной вспышки и других наблюдаемых явлений, будут использованы для анализа изменений температуры и меры эмиссии для того, чтобы построить полную картину временных изменений основных термодинамических характеристик плазмы.

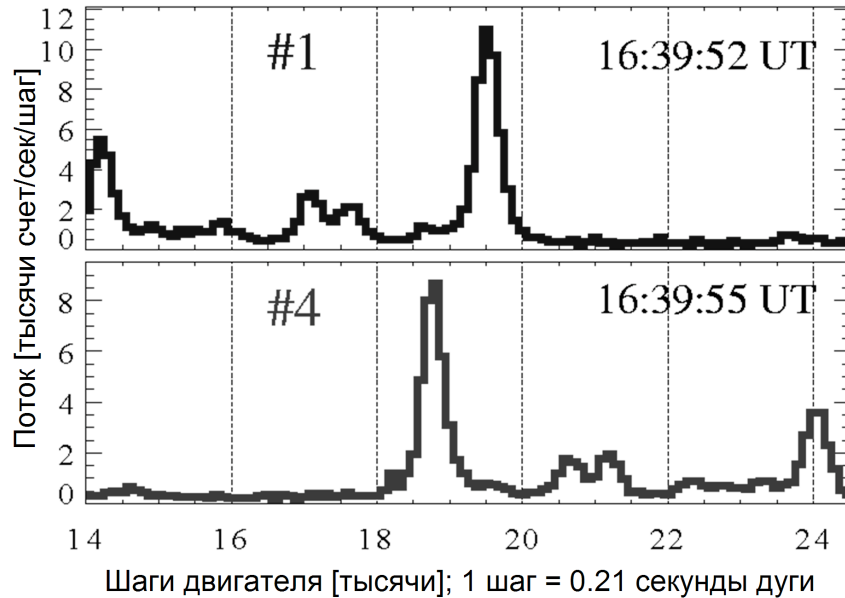
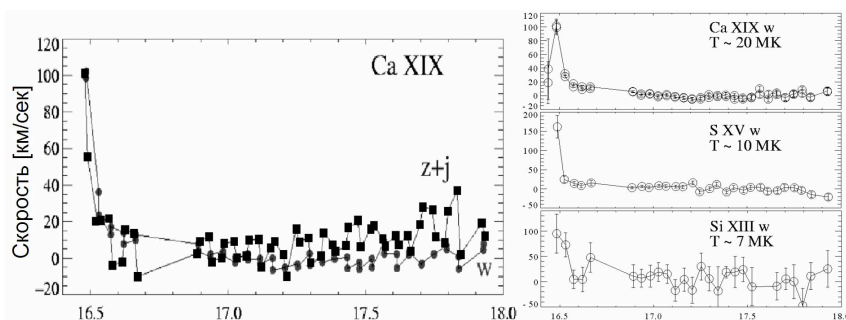


Рис. 1.7. Пример двух сканов, охватывающих спектральные области триплетов линии иона Ca XIX. Спектры снимались системой доплерометра во время вспышки 25 августа 2001 года. На горизонтальной оси отложено шаги двигателя привода стола с кристаллами (угол поворота). Видно, что резонансные линии измеряются не одновременно. После устранения постоянного инструментального сдвига оставшаяся разница положений центров зарегистрированных линий свидетельствует о присутствии доплеровского сдвига.

Хорошее качество спектров вспышки с 25 августа 2001 года дало тоже возможность определения доплеровских сдвигов спектральных линий. На рис. 1.7 представлены два спектра с совместного скана, охватывающие триплет линии Ca XIX, полученные кристаллами кварца в системе доплерометра во время развития вспышки. На рисунке видно, что резонансные линии не регистрировались одновременно. Частично это было вызвано небольшой, постоянной, но известной из лабораторных испытаний прибора, неточностью юстировки угла между атомными плоскостями пары кристаллов доплерометра. Она порядка 20 секунд дуги и ее можно легко устранить последствием расчета. После исправления записи на этот инструментальный сдвиг, оставшиеся несовпадения линий можно только интерпретировать эффектом Доплера, вследствие движения источника вдоль луча зрения. Итоги такой интерпретации представлены на рис. 1.8, который иллюстрирует изменение радиальной составляющей скорости горячей плазмы вспышки со временем, а тем самым с фазой ее развития. Самую большую скорость

(100 - 150 км/сек в направлении от Солнца) наблюдалось во время начальной стадии вспышки. Достоверность полученных результатов подтверждает факт, что похожие величины скорости получились независимо с измерений как резонансной (самой сильной), так и запрещенной линии иона Ca XIX.

Резонансная линия иона Ca XIX эффективно формируется только в горячей плазме с температурой выше 7 МК. Максимум эффективности попадает на температуру ~ 20 МК. В данной вспышке плазма характеризовалась такой температурой в самой начальной стадии вспышки, на фазе роста потока мягкого рентгеновского излучения. В низкотемпературной плазме формируются линии серы и кремния. Спектрометр ДИОГЕНЕСС не был приспособлен до функционирования в системе доплерометра в спектральном диапазоне, охватывающим линии этих элементов. Несмотря на это, для линий ионов S XV и Si XIII хорошее знание геометрии прибора разрешило анализировать их смещение относительно положения “мнимой” бисектрисы угла между кристаллами. Результаты, полученные таким образом, также представлены на рис. 1.8, качественно совпадают с выведенными для линии иона кальция.



Всемирное время [ч] 25 августа 2001 г.

Рис. 1.8. В левой части рисунка приведен график временного хода скорости плазмы во вспышке, которая произошла 25 августа 2001 г. Буквой “w” обозначены значения скорости, полученные из измерений относительных сдвигов резонансной линии иона Ca XIX ($\lambda = 3.176 \text{ \AA}$). Буквами “z+j” обозначены значения скорости, полученные для линии, являющейся блендой сателлитной линии “j” и так называемой запрещенной линии “z” иона Ca XIX. В правой части рисунка приведено сравнение временного хода доплеровских скоростей, полученных для резонансных линий ионов Ca XIX, S XV и Si XIII. Указаны характерные температуры формирования этих линий.

Работы со спектрометром ДИОГЕНЕСС выполнены в Лаборатории физики солнца Центра космических исследований Польской академии наук во Вроцлаве (Польша) при поддержке

Польского фонда по научным исследованиям (проект 1.Р03D.017.29).

1. Sylwester J. Experience of Wroclaw team in construction of solar X-ray instruments // ESA SP, 2001, 493, 377-382.
2. Sylwester J., Farnik F. DIOGENESS Soft X-ray Spectrometer-photometer for Studies of Flare Energy Balance // BAC, 1990, 41, 3, 149-157