

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.7

**СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ  
ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ БАЛЛА 1 N 8 ИЮНЯ 1968 г. \*)****Г. Вайана, У. Рейди, Т. Ценпфенниг,  
Л. Ван-Спейбрук, Р. Джаккони**

*С помощью поднятого на ракете телескопа скользящего отражения были получены с высоким разрешением изображения Солнца в рентгеновских лучах. Рентгеновская вспышка занимает протяженную область, имеет тонкую структуру и следует нейтральной линии магнитного поля. Излучающие рентген корональные петли связывают активные области. Наблюдалось общее излучение короны на лимбе и несколько слабых областей на диске.*

Для исследования физических процессов, определяющих появление и развитие солнечных вспышек, мы подняли на ориентированной ракетной платформе рентгеновский телескоп и в течение вспышки получили рентгеновские фотографии Солнца высокого разрешения. Принципиальным результатом оказалось то, что в рентгеновской вспышке наблюдались структурные детали протяженностью всего лишь в несколько угловых секунд. Фотографии показывают также рентгеновское излучение из областей, связанных с флоккулами, и общее рентгеновское излучение короны. С помощью широкополосных фильтров были получены спектральные характеристики излучения; кроме того, применение нового бесщелевого спектрографа позволило получить дисперсные спектры отдельных активных областей.

Рентгеновское излучение Солнца служит наиболее чувствительным индикатором солнечной активности; оно позволяет исследовать физические процессы в областях, содержащих высокотемпературную плазму или электроны высоких энергий. Исследования солнечного рентгеновского излучения хорошо отражены в обзорах <sup>1</sup>.

Надежные физические параметры могут быть установлены только в том случае, если известны пространственные и спектральные распределения излучения исследуемых областей. Несколькими группами исследователей рентгеновские изображения Солнца были получены с использованием техники камеры-обскуры <sup>2, 3</sup>. Телескопы скользящего отражения в варианте, предложенном для рентгеновской астрономии Джаккони и Росси <sup>4</sup>, применялись в других работах <sup>5, 6</sup>.

На лучших полученных до сих пор рентгеновских фотографиях можно было разрешить структурные детали размером 20 угловых секунд. Имеющиеся сведения о спектральном распределении излучения отдельных областей Солнца получены с помощью широкополосных фильтров. С другой

\*) G. S. Vaiana, W. Reidy, T. Zehnpfennig, L. Van Speybroeck, R. Giacconi, X-ray Structures of the Sun during the Importance 1 N Flare of 8 June 1968, Science 161, 564 (1968). Перевод С. И. Сыроватского.

стороны, в целом ряде работ были получены дисперсные рентгеновские спектры Солнца как целого <sup>7</sup>. Наша группа сосредоточила усилия на том, чтобы получить рентгеновские изображения высокого разрешения и одновременно спектры каждой отдельной излучающей области \*).

Рентгеновский телескоп, поднятый в нашем ракетном эксперименте, состоял из коаксиальных, конфокальных парабооида и гипербооида <sup>5</sup>. Приходящие рентгеновские лучи однократно отражались под очень острым (скользящим) углом от каждого зеркала и в фокальной плоскости давали действительное изображение удаленного рентгеновского источника. Собирающая поверхность телескопа равна  $32 \text{ см}^2$  и фокусное расстояние  $132 \text{ см}$ : этот телескоп был наибольшим и наиболее чувствительным из всех ранее использованных в полетах. Благодаря достаточно высокой светосиле могли быть использованы сравнительно малочувствительные мелкозернистые фотопленки («Панатомик Х»), даже в одной из наиболее коротких экспозиций ( $2 \text{ сек}$ ); при этом получена удовлетворительная плотность изображения как в области флоккулов, так и во вспышке. На оригинальных негативах в области вспышки можно различить детали размеров всего лишь в 2 угловые секунды.

Камера состояла из вращающегося двенадцатизарядного барабана, на котором были установлены фотопленки и комбинации фильтров. Разные фильтры пропускали разные интервалы рентгеновских длин волн и защищали пленку от видимого и ультрафиолетового излучения Солнца.

Непосредственно позади телескопа была помещена дифракционная решетка, впервые успешно использованная для проходящих мягких рентгеновских лучей; при запуске она находилась в сложенном состоянии и была развернута в последних четырех экспозициях. Комбинация телескопа и дифракционной решетки образует бесцелевой спектрограф для мягких рентгеновских лучей \*\*). Решетка разлагает часть излучения, фокусируемого в данной точке, в спектр разных порядков, который охватывает эту точку. Использованная в этом полете решетка состояла из периленового основания (толщиной  $1 \text{ мкм}$ ), на которое с помощью вакуумного напыления было нанесено золотом 1440 параллельных штрихов на миллиметр. В первом порядке дисперсия была равна  $0,50$  угловой минуты на ангстрем или в фокальной плоскости  $0,15 \text{ мм}/\text{Å}$ .

Ракета была запущена в течение нескольких минут после регистрации солнечной вспышки сетью оповещения наземных солнечных обсерваторий. Одновременно велись наземные наблюдения в хромосферных линиях  $H_{\alpha}$  и  $\text{Ca II}$ , в сантиметровом и декаметровом радиодиапазонах, а также в корональной линии  $5303 \text{ Å}$ . Помимо этого три эксперимента, осуществляемые на «OSO-4» (орбитальная солнечная обсерватория) \*\*\*), могут дать следующую информацию: 1) спектры, полученные с помощью брегговского кристаллического спектрометра для Солнца в целом (группа из Морской исследовательской лаборатории), 2) история развития вспыш-

\*) Эта работа была выполнена при содействии Отдела солнечной физики Управления НАСА. Экспериментальная установка, использованная в этом эксперименте, является уменьшенным вариантом более сложного эксперимента, который мы готовим для полета на обитаемом солнечном корабле («Аполло Телескоп Маунт»), подготовляемого Маршаллским центром космических полетов.

\*\*\*) Спектрограф этой конструкции был предложен в работе <sup>8</sup> и разработан Т. Ценффеннигом (там же, стр. 1855).

\*\*\*) Доклады с описанием и предварительными результатами, полученными этими тремя приборами, были представлены на Специальном совещании по солнечной астрономии Американского астрономического общества, Таксон, Аризона, 1—3 февраля 1968 г. (H. Friedman et al., J. L. Culhane et al., F. R. Paolini et al.), а также на конференции Среднего Запада по космическим лучам, Айова, 1 и 2 марта 1968 г. (F. R. Paolini et al. and G. S. Vaiana et al.).

ки, получаемая с высоким временным разрешением с использованием техники пропорциональных счетчиков (группа из Лейцестерского университета и Университетского колледжа в Лондоне) и 3) изображения Солнца, получаемые каждые 300 сек до, во время и после вспышки с угловым разрешением в 4 угловые минуты (группа из «Америкен сайанс энд энжиниринг»). Мы опишем теперь некоторые качественные результаты, вытекающие из осмотра полученных рентгеновских снимков и из сопоставления с доступными нам сейчас другими данными.

8 июня 1968 г. активность Солнца была умеренной. На диске присутствовало более дюжины активных областей, наиболее выделяющейся из которых была как раз та, в которой развилась наблюдавшаяся нами вспышка. Эта область (отождествляемая как № 9429 по Мак-Масу) со времени ее первого появления 2 июня на восточном краю Солнца росла по площади и интенсивности флоккула, площади и числу пятен, потоку радиоизлучения на волне 9,1 см и по вспышечной активности. В течение нескольких часов до вспышки в активной области наблюдались флуктуации яркости. Связанное с этой областью волокно внезапно исчезло примерно за 30 мин до вспышки. До исчезновения волокно располагалось вдоль нейтральной линии магнитной конфигурации, определяемой по полярности солнечных пятен и тонкой структуре в линии  $H_{\alpha}$  \*). Наблюдавшаяся вспышка была большой вспышкой балла 1N типа параллельных лент. Она сопровождалась сантиметровым микроволновым всплеском, налагавшимся на очень малое постепенное возрастание и спад во всей микроволновой области с продолжительностью, сравнимой с длительностью вспышки в линии  $H_{\alpha}$ . Непрерывное декаметровое излучение началось в 1600 мирового времени (U.T.) и продолжалось до 1700 U.T. Вспышка сопровождалась также ионосферным возмущением. В линии  $H_{\alpha}$  вспышка началась приблизительно в 1732 U.T., достигла максимума около 1745 U.T. и продолжалась около 1,5 час. В 1740 U.T. была запущена ракета, экспозиции производились с 1742 U.T. до 1745 U.T. Система наведения, разработанная отделом зондовых ракет Годдардского центра космических полетов, обеспечила беспрецедентную точность  $\pm 1$  сек дуги в течение всех экспозиций.

Время экспозиции, фильтр, пленка и номинальный интервал длин волн для каждой экспозиции приведены в таблице. Беглый просмотр фотографий выявил целый ряд новых существенных фактов. Некоторые избранные изображения \*\*) (или их части) представлены на рисунках. Ниже суммируются наиболее существенные результаты.

1. В с п ы ш к а. Сама по себе вспышка была пока наиболее впечатляющей из всех излучающих рентген областей. 6-сек экспозиция (рис. 1) на пленке «Пан-Х» с майларовым фильтром 3,8 мм дает изображение вспышки, несколько передержанное в центральной части. Внутренняя структура вспышки лучше выявляется на рис. 3, а, полученном при 2-сек экспозиции с 13-мм бериллиевым фильтром на пленке «Пан-Х».

Прежде всего мы видим, что область вспышки более чем на порядок величины \*\*\*) ярче, чем все другие области, и что рентгеновское излучение

\*) П. С. Мак-Интош, частное сообщение. Магнитограмма, полученная 9 июня 1968 г. Р. Говардом (обсерватории Маунт-Вилсон и Паломар), подтверждает существование нейтральной линии.

\*\*) Динамический интервал негатива ( $10^3$ ) значительно больше, чем для отпечатка на бумаге. Поэтому мы ослабили начальную плотность негатива, чтобы показать как наиболее яркие, так и наиболее слабые детали. Это привело к значительному снижению контраста на отпечатке. Слабое гало, видимое вокруг очень интенсивных деталей, является инструментальным эффектом, обусловленным тем, что телескоп несколько размывает изображение точечного источника. Темные лучи в гало — это тени от ребер апертурной пластинки телескопа.

\*\*\*) См. предыдущую сноску.

Фотошленки, фильтры и время экспозиции

Кадр	Время экспозиции, сек	Фильтр: толщина в мкм *) и материал	Фотошленка **)
I	22	13, Ве	«103-О» без ТС
II	2	50, Ве	«Пан-Х» с ТС
III	6	13, Ве	«Пан-Х» с ТС
IV	19	13, Ве	«Пан-Х» без ТС
V	2	13, Ве	«Пан-Х» с ТС
VI	6	3,8, майлар ***)	«Пан-Х» без ТС
VII	18	2,5, сталь	«103-О» без ТС
VIII	2	От видимого света	«Пан-Х» с ТС
IX	6	3,8, майлар ***)	«Илфорд» специальная ****)
X	6	13, Ве	«103-О» без ТС ****)
XI	22	13, Ве	«103-О» без ТС ****)
XII	52	13, Ве	«103-О» без ТС ****)

\*) Приведена номинальная толщина фильтров. Полоса пропускания приблизительно равна: 13 мкм бериллия—от 3,5 до 14 Å; 50 мкм бериллия—от 3,5 до 10 Å; 3,8 мкм майлара—от 3,5 до 14 и от 44 до 60 Å.

\*\*) ТС и без ТС—с защитным желатиновым слоем и без него соответственно.

\*\*\*) На майлар было напылено около 2200 Å алюминия.

\*\*\*\*) Экспозиции с дифракционной решеткой

сосредоточено в двух главных структурах, каждая длиной в несколько угловых минут и сечением приблизительно в 20 угловых секунд. Одна из структур представляет собой ленту, тянущуюся с северо-востока на юго-запад; вторая деталь, расположенная южнее первой, имеет форму буквы S. Мы еще не получили  $H_{\alpha}$ -фотографий, сделанных в течение полета ракеты. Однако из сопоставления с фотографиями в линии  $H_{\alpha}$  (рис. 2 и 3, a'), полученными перед полетом, а также из обсуждений с Мак-Интошем, наблюдателем Администрации космического научного обслуживания (ЕССА) в период вспышки, мы можем сделать вывод, что общая структура рентгеновской вспышки обнаруживает разительное сходство со структурой вспышки в линии  $H_{\alpha}$ . Части вспышки, более яркие в линии  $H_{\alpha}$ , оказываются также более яркими в рентгеновских лучах, причем со значительно большим контрастом. Наиболее яркая часть вспышки в рентгене (часть S-образной структуры), по всей видимости, соответствует положению исчезнувшего активного волокна (рис. 3, a и a'). Во вспышке видны также многие мелкие детали, которые не наблюдались в соседних активных областях; например, на оригинальном негативе рис. 3, a отчетливо видны два волокна с сечением около 2 угловых секунд на расстоянии 5 угловых секунд друг от друга \*).

2. А к т и в н ы е о б л а с т и. Все области, активные в  $H_{\alpha}$ , имеют двойников на рентгеновской фотографии (см. рис. 1); даже малым увеличениям яркости в  $H_{\alpha}$ , например вблизи экватора на долготях около  $30^{\circ}W$

\*) Такие тонкие детали могут наблюдаться только вблизи оптической оси, где получается наибольшее разрешение; имеются, однако, активные области, расположенные столь же близко к оптической оси, как и вспышка, и не показывающие тонкой структуры такого типа.

и  $70^{\circ}\text{W}$ , соответствуют области повышенной яркости в рентгеновских лучах. Более тщательное сравнение показывает, что соответствие между изображениями данной области в линии  $H_{\alpha}$  и в рентгеновских лучах зависит от положения на солнечном диске. Области рентгеновского излучения,



Рис. 1. Рентгеновская фотография Солнца (полученная с поднятым на ракете рентгеновским телескопом) показывает корональную плазму с температурами в миллионы градусов.

Север Солнца расположен приблизительно около 5 часов по циферблату, восток — справа. Излучающие рентген области, формируемые магнитным полем и иногда обогащенные тепловыми частицами, служат естественной астрофизической лабораторией. Для вспышки (в центре), представляющей собой, по-видимому, внезапное освобождение магнитной энергии, впервые выявлена ее рентгеновская структура.

расположенные вблизи центра диска, довольно хорошо повторяют форму и границы областей, ярких в линии  $H_{\alpha}$ . Однако рентгеновские изображения областей вблизи лимба (см. рис. 3, б) обнаруживают петли и соединения между активными областями, отсутствующие на изображениях

в линии  $H_{\alpha}$  (см. рис. 3, б'); можно видеть рентгеновские структуры, простирающиеся на 100 000 км и более над водородными  $H_{\alpha}$ -флоккулами. Наконец, на лимбе (см. рис. 3, в и в') наблюдаются петли и структуры, сходные с теми, которые видны на фотографиях короны в белом свете. Рентгеновские петлевые структуры не имеют соответствующих аналогов в линии  $H_{\alpha}$ ; однако полученные в обсерватории Сакраменто-Пик спектры показывают, что в этих участках лимба была сильной зеленая линия

5303 Å, а двумя днями позже на диск вышла область слабых флоккулов.

Области рентгеновского излучения имеют, по-видимому, один и тот же размер в интервалах длин волн от 44 до 60 Å и от 3,5 до 14 Å. Это вывод вытекает из сравнения изображений, полученных с майларовым и бериллиевым фильтрами и имевших эквивалентные фотографические плотности в результате соответствующего подбора длительности экспозиций.

3. О б щ е е и з л у ч е н и е к о р о н ы. Не связанное со вспышками или флоккулами общее излучение короны видно на фотографиях, полученных с майларовым фильтром, который пропускает излучение в области от 44 до 60 Å (см. рис. 1). Так как это излучение не обнаруживается при наибольшей экспозиции с бериллиевым фильтром (3,5—14 Å), мы заключаем, в согласии с результатами прежних наблюдений, что общее излучение короны несколько мягче, чем излучение, связанное с флоккулами

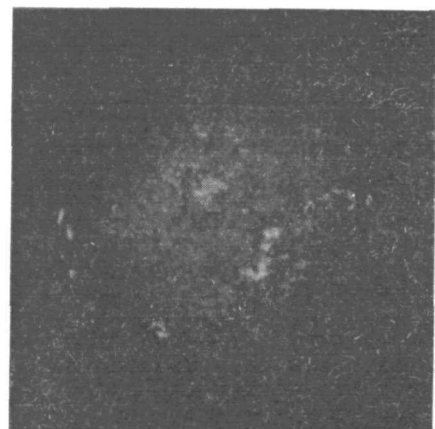


Рис. 2. Фотография Солнца в свете линии  $H_{\alpha}$  в 1555 мирового времени, приблизительно за два часа до рентгеновских наблюдений.

Существует поразительная корреляция между областями, активными в линии  $H_{\alpha}$ , и областями, излучающими рентгеновские лучи (см. рис. 1). Ориентация изображения такая же, как и на предыдущем рисунке; гелиографический север находится примерно в 30° по часовой стрелке от нижней части диска, восток — справа.

или вспышкой. Мы видим также простирающиеся на диске, слабо излучающие области, не связанные с флоккулами, что согласуется с наблюдениями, проведенными в одном из прежних полетов<sup>5</sup>. Эти образования видны при экспозиции с майларовым фильтром, как, например, в северной части диска (см. рис. 1), но отсутствуют на фотографиях с бериллиевым фильтром; таким образом, это излучение также мягче, чем то, которое связано с флоккулами.

Наконец, результаты показывают, что техника бесщелевого спектрографа оказывается полезной в тех случаях, когда требуется высокая светосила; она особенно полезна при изучении быстрых процессов, а также нужна для того, чтобы получить спектральные данные отдельно для каждой из нескольких малых активных областей на Солнце. Четыре экспозиции с дифракционной решеткой содержат спектры каждой из активных областей, включая вспышку. Экспозиция X (см. таблицу) показана на рис. 4. На оригинальном негативе можно видеть несколько эмиссионных линий, или бленд; линии особенно четки в высших порядках спектра. Наиболее выделяющаяся линия вспышки (она видна также в некоторых спектрах флоккулов) лежит вблизи 9,2 Å. Ее можно отождествить либо с линией Mg XI, либо с линией Fe XXI, которые наблюдались другими экспериментаторами<sup>3, 7</sup>. Для некоторых областей можно определить также огибающую спектра.

Модели вспышек и других проявлений активности должны учитывать определенные качественные характеристики, вытекающие из следующих

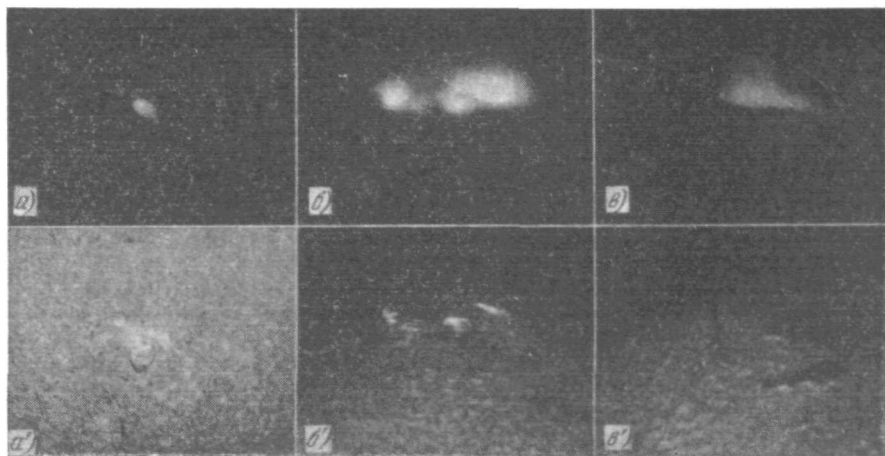


Рис. 3. *a* — *в*) рентгеновские изображения отдельных участков Солнца. *a'* — *в'*) фотографии соответствующих участков в линии  $H_{\alpha}$ , полученные за два часа до полета.

Соответствующие изображения ориентированы одинаковым образом. *a*) Область вспышки в интервале длин волн 3,5—14 Å (экспозиция V). S-образная структура (наиболее яркая часть вспышки) следует нулевой линии, демонстрируемой волокном (*a'*), которое исчезло, как это описано в тексте. Части волокна простираются к пятну и влево от него, а затем вверх. *б*) Группа флоккулов в юго-западном квадранте вблизи лимба. Можно различить по меньшей мере три арки, соединяющие области. Эти связи отсутствуют в свете линии  $H_{\alpha}$ . *в*) Петлевая структура на юго-востоке. Она простирается на расстояние свыше 150 000 км над лимбом; в линии  $H_{\alpha}$  эта петля не имеет аналога, однако в этой части лимба была яркой зеленой корональная линия (5303 Å), а спустя два дня из-за лимба вышла область флоккулов.

наблюдений. Рассмотрим прежде всего вспышку. Было установлено, что рентгеновское излучение составляет значительную часть выделяющейся энергии<sup>9</sup>. Основываясь на плотности изображения и размере вспышки, мы оцениваем энергию, выделившуюся в этой вспышке в мягких рентгеновских лучах, величиной порядка  $10^{30}$ — $10^{31}$  эрг. Нам представляется важным, что площадь рентгеновской вспышки расширена во время максимума яркости в  $H_{\alpha}$ . Если мы примем скромное предположение, что ленты вспышки имеют круговое сечение с диаметром, равным их наблюдаемой ширине, то найдем, что видимый объем вспышки превышает  $10^{28}$  см<sup>3</sup>.

Пространственное соответствие между рентгеновской вспышкой и вспышкой в линии  $H_{\alpha}$  свидетельствует о тесной связи между этими двумя процессами излучения; это довольно странно ввиду большой разницы в степени ионизации, требуемой для объяснения рентгеновского излучения и излучения линии  $H_{\alpha}$ .

Одна из возможностей состоит в предположении о сильной магнитной

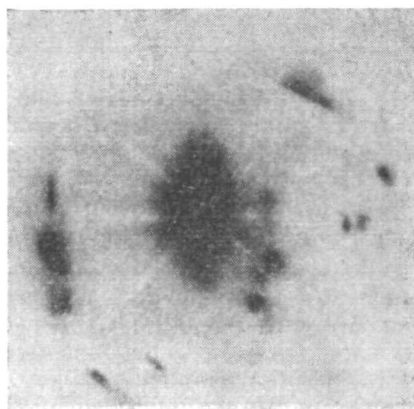


Рис. 4. Одна из четырех экспозиций Солнца с бесщелевым спектрографом. Направление дисперсии — снизу вверх, а ориентация такова же, как и на предыдущих рисунках.

связи между двумя областями, что позволило бы объяснить сходство их форм. Рентгеновское излучение, соответствующее другим флоккулярным областям, свидетельствует о наличии такой магнитной связи. Однако для вспышки имеются трудности, связанные с тем, что для объяснения наблюдаемого излучения нужно предположить сильную устойчивую магнитную связь и в то же время потребовать внезапного изменения магнитной конфигурации.

Наконец, мы отметим важность пространственной связи рентгеновского излучения с исчезающим волокном и, следовательно, с магнитной нейтральной линией. Ряд теорий вспышек подчеркивает роль нейтральной линии не только в процессе накопления магнитной энергии, но и в механизме ее внезапного выделения. До сих пор только наблюдения в видимом свете давали сведения по этому вопросу, однако рентгеновское излучение более непосредственно связано с энергичными частицами, участвующими в первичном процессе.

Рассмотрим теперь активные области. Рентгеновские изображения передают трехмерную корональную структуру флоккулов. Общее впечатление от фотографий состоит в том, что в основании короны области рентгеновского излучения сходны с областями  $H_{\alpha}$ -излучения, а на высоких уровнях рентгеновские области богаты петлеобразными структурами, которые соединяют активные  $H_{\alpha}$ -области и формируются главным образом магнитным полем. Такая интерпретация свидетельствует в пользу теорий, которые связывают разогрев верхних слоев активных областей с присутствием усиленного магнитного поля. Мы рассматриваем сходство размеров излучающих рентген областей в разных интервалах длин волн, а именно в интервалах  $44-60 \text{ \AA}$  и  $3,5-14 \text{ \AA}$  как на лимбе, так и на диске, в качестве указания на то, что активные в отношении рентгеновского излучения области не имеют крупномасштабной температурной структуры. С другой стороны, температурная структура может существовать в масштабах, малых по сравнению с размером области как целого, например, в многослойном волокнистом объеме, ограничиваемом сильным магнитным полем.

По поводу общего излучения короны можно высказать следующие замечания. Из сравнения рентгеновских и  $H_{\alpha}$ -изображений мы сопоставляем слабо излучающие области наиболее ярким участкам хромосферной магнитной сетки. Уже предполагалось, что в механизме нагрева короны важную роль играет магнитное поле хромосферной сетки<sup>10</sup>. Мы полагаем, что общее рентгеновское излучение короны на лимбе соответствует слабо излучающим областям на диске, связанным с яркими деталями сетки. Мягкий характер спектра обеих областей также согласуется с нашим предположением, что обе они относятся к одному и тому же типу активности.

Нужно будет изучить несколько вспышек, прежде чем мы сможем установить, являются ли обнаруженные нами свойства общей характеристикой всех вспышек. Анализ фотографий убеждает нас, что более детальные сведения о солнечных явлениях могут быть получены путем умеренного улучшения пространственного разрешения в рентгеновской области спектра. Определяющая роль, которую играют магнитные поля в накоплении и освобождении энергии в солнечной атмосфере, может быть уяснена из связи между структурами в линии  $H_{\alpha}$  и рентгеновскими структурами, из существования петель, соединяющих активные области, и из того факта, что рентгеновская вспышка развивается вдоль нейтральной линии магнитного поля \*).

\*) Мы благодарим сотрудников ЕССА, обсерваторий Сакраменто-Пик, Мак-Мас, Локхид и Сагаморе-Хилл за оповещение о вспышке и обеспечение наземных измерений, в частности, Д. Бакнэма и Р. Декера (ЕССА) за координацию службы оповещения. Мы обязаны Р. Говарду и Г. Зирину (обсерватории Маунт-Вилсон и Пало-



## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. de Jager, Ann. Astrophys. 28, 125 (1965); S. L. Mandel'stam, Space Sci. Rev. 4, 587 (1965); L. Goldberg, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 5, 279 (1967).
2. R. L. Blake, T. A. Chubb, H. Friedman, A. E. Unzicker, Astrophys. J. 142, 1 (1965); P. C. Russel, Nature 205, 684 (1965); K. A. Pounds, P. C. Russel, Space Res. 6, 32 (1966).
3. I. A. Zhitznik, V. V. Krutov, L. P. Malyavkin, S. L. Mandel'stam, Space Res. 7, 1263 (1967).
4. R. Giacconi, B. B. Rossi, J. Geophys. Res. 65, 773 (1960).
5. R. Giacconi, W. P. Reidy, T. Zehnpfennig, J. C. Lindsay, W. S. Muney, Astrophys. J. 142, 1274 (1965); W. P. Reidy, G. S. Vaiana, T. Zehnpfennig, R. Giacconi, Astrophys. J. 151, 333 (1968).
6. J. H. Underwood, W. S. Muney, Solar Phys. 1, 129 (1967).
7. H. R. Rugge, A. B. C. Walker, Space Res. 8 (1967); G. Fritz, R. W. Kreplin, J. F. Meekins, A. E. Unzicker, H. Friedman, Astrophys. J. 148, L133 (1967); W. M. Neupert, W. Gates, M. Swartz, R. Young, ibid. 149, L79 (1967); K. Evans, K. A. Pounds, ibid. 152, 319 (1968).
8. H. Gursky, T. Zehnpfennig, Appl. Opt. 5, 875 (1966).
9. A. Bruzek, в сб. Solar Physics (R. S. Xanthakis, Ed.) Interscience. London. 1967, стр. 414.
- 10 D. E. Osterbrock, Astrophys. J. 134, 347 (1961).

## ДОПОЛНЕНИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Солнечные вспышки представляют собой одно из наиболее значительных проявлений солнечной активности и давно привлекают внимание многих исследователей. Почти все обсерватории мира ведут систематическую службу Солнца, важнейшей задачей которой является наблюдение и всестороннее изучение солнечных вспышек. Интерес к этому явлению не случаен. Он определяется в первую очередь огромной величиной энергии, до  $10^{32}$  эрг, выделяющейся за сравнительно короткое время вспышки — несколько десятков минут.

Выделившаяся энергия в форме ускоренных частиц с широким энергетическим спектром вплоть до солнечных космических лучей с энергиями в несколько десятков Гэв, а также в форме рентгеновского, оптического и радиоизлучений поступает в межпланетное пространство и вызывает на Земле целый ряд геофизических явлений, таких, как магнитные и ионосферные бури, нарушения радиосвязи, полярные поглощения и т. д. Отсюда ясно, насколько важны систематические наблюдения вспышек и выяснение их причин и механизма.

В этом направлении за последние годы произошел значительный сдвиг. Он обусловлен, с одной стороны, осуществлением широкой программы наблюдений вспышек в видимом рентгеновском и радиодиапазонах, а также наблюдений состояния солнечной атмосферы и в особенности магнитных полей в активных областях. С другой стороны, благодаря развитию физики плазмы и, в частности, динамики плазмы в сильных магнитных полях стал ясен, по крайней мере в общих чертах, механизм самого явления вспышки.

В этой связи перечислим некоторые из важнейших наблюдаемых свойств вспышек (см., например, <sup>1-3</sup>).

1. Вспышки возникают в области сильных магнитных полей пятен и активных областей над фотосферой; энергия магнитного поля является единственным известным источником, достаточным для того, чтобы обеспечить наблюдаемую энергию вспышек.

2. Вспышки тесно связаны с нулевыми линиями магнитного поля: они развиваются вблизи или вдоль этих линий. При этом вероятность появления вспышки тем выше, чем больше перепад (градиент) напряженности магнитного поля вблизи нулевой линии. Заметим, что в процессе вспышки магнитное поле сильно деформируется и в области оптического свечения может достигать больших значений. Это, однако, не изменяет основного результата, полученного еще Джованелли <sup>4</sup>, что вспышки возникают в районе нулевых линий исходного магнитного поля.

мар), У. Ливингстону и Н. Шили (обсерватория Китт-Пик), У. Куртису (высокогорная обсерватория) за дополнительные наземные измерения, а также П. Мак-Интошу за помощь в интерпретации обсуждавшихся деталей в *H $\alpha$* . Мы благодарим персонал Отдела зондовых ракет Годдардского центра космических полетов и персонал ракетного полигона Уайт-Сэндс, которые поддерживали нас во время ожидания вспышки. Мы благодарим А. Де-Карпио, Р. Хаггерти, Г. Манко и Д. Янсена (АСвЕ) за техническую помощь.

3. Вспышки сопровождаются значительными изменениями магнитного поля вблизи нулевой линии и тесно связаны с перемещениями пятен, изменением их числа или площади.

4. В процессе вспышки наблюдаются высокие скорости перемещения вещества и выбросы солнечной плазмы.

5. Развитие вспышки связано с появлением большого количества ускоренных частиц, которые регистрируются по их рентгеновскому и радиоизлучению, а также непосредственно наблюдаются на Земле и в межпланетном пространстве.

Перечисленные свойства не оставляют сомнений в том, что вспышка представляет собой быстрое освобождение значительной части магнитной энергии солнечных пятен и активных областей и ее эффективное превращение в энергию ускоренных частиц. Основная трудность теории была связана с механизмом такого превращения. Дело в том, что благодаря высокой проводимости солнечной плазмы любые изменения магнитного поля могут быть связаны только с перемещениями плазмы практически без расхода энергии поля на джоулевы или какие-либо иные потери.

Имеется, однако, очень важное исключение — нулевые линии магнитного поля. Движение плазмы в их окрестности обладает той специфической особенностью<sup>2</sup>, что даже небольшие изменения магнитного поля вдали от нулевой линии приводят к эффекту кумуляции, в результате которого вблизи нулевой линии возникают высокие скорости движения вещества, сильно деформируется магнитное поле и возникает тонкий токовый слой. В этом слое плотность тока превышает критическое значение, выше которого начинаются характерные плазменные процессы — развитие неустойчивости и появление ускоренных (убегающих) частиц. Существенно при этом, что проводимость плазмы, связанная со столкновениями частиц, здесь уже не играет роли; энергия магнитного поля расходуется на турбулентный нагрев плазмы и ускорение частиц независимо от частоты столкновений между частицами.

Важным следствием теории, непосредственно подтверждаемым наблюдениями, является возникновение двух волокон уплотненной плазмы, параллельных нулевой линии и удаляющихся от нее в процессе развития вспышки. Эти волокна образованы плазмой, вытесняемой магнитным полем из окрестности нулевой линии. Из теории следует также, что в области кумуляции магнитное поле, плотность и скорость плазмы, а также ее термодинамические характеристики крайне неоднородны. Именно, должны наблюдаться сильные пространственные и временные изменения магнитного поля, близко расположенные области уплотненной и разреженной плазмы и высокие скорости ее движения.

В этой связи особенно важны наблюдения вспышек с высоким временным и пространственным разрешением. Важным шагом в этом направлении является работа Вайана и др., в которой удалось достичь рекордного разрешения в рентгеновской области с помощью телескопа, основанного на принципе скользящего отражения.

Уже предварительные результаты дают целый ряд важных сведений о рентгеновском излучении Солнца вообще и излучении вспышек в особенности. Здесь следует особенно подчеркнуть двухленточную структуру вспышки, наблюдаемую как в оптическом, так и в рентгеновском диапазонах длин волн, тесное пространственное соответствие оптических и рентгеновских деталей вспышки, ее связь с нулевой линией магнитного поля. Можно высказать уверенность, что увеличение пространственного и временного разрешения и систематические комплексные наблюдения вспышек в оптическом, рентгеновском и радиодиапазонах вместе с измерениями магнитных полей солнечных активных областей приведут в скором времени к полной разгадке этого явления и выяснению его роли в астрофизике и физике плазмы.

С. И. Сыроватский

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Смит, Э. Смит, Солнечные вспышки, М., Изд-во «Мир», М., 1966.
2. A. B. Severny, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2, 263 (1964).
3. S. F. Smith, H. E. Ramsey, Solar Phys. 2, 158 (1967).
4. R. G. Giovanelli, Month. Not. R.A.S. 108, 163 (1948).
5. С. И. Сыроватский, Астрон. ж. 43, 340 (1966); On the Mechanism on the Solar Flares (Tokyo, 1968); Препринт ФИАН (1968).