

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ИССЛЕДОВАНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА****С. Л. Мандельштам и А. И. Ефремов**

Исследования последних лет чрезвычайно расширили наши знания об излучении Солнца.

Использование высотных ракет позволило обнаружить и исследовать сильно поглощаемое атмосферой и поэтому не доходящее до поверхности Земли коротковолновое ультрафиолетовое излучение, вплоть до мягкой рентгеновской области. Новые возможности для этих исследований предоставит использование искусственных спутников Земли, позволяющих производить длительные измерения, недоступные при использовании ракет.

Поглощение в земной атмосфере практически обрезает все излучение Солнца с длиной волны короче 2900 Å. Между тем, эта коротковолновая часть солнечного спектра представляет исключительно большой интерес. В эту область, вплоть до 1700—1600 Å, простирается излучение важных участков спектра фотосферы; в области 1600—900 Å сосредоточено основное излучение хромосферы, и в области короче 900 Å (вплоть до нескольких ангстрем) — излучение короны. Хромосфера и корона излучают в видимой и близкой ультрафиолетовой области спектра, доступной для земных наблюдений, очень мало, поэтому детальные знания об этих оболочках Солнца могут быть получены лишь путем исследования их коротковолнового излучения. Вместе с тем исследование этого коротковолнового излучения чрезвычайно важно и для многих вопросов физики земной атмосферы, ибо это излучение ионизует молекулы воздуха и ответственно за образование ионосферных слоев в атмосфере Земли.

В настоящем обзоре кратко излагаются новые результаты экспериментальных и теоретических работ по исследованию коротковолнового излучения Солнца, опубликованные со времени первого обзора на эту тему¹, а также описываются эксперименты, которые предполагается осуществить с помощью искусственных спутников Земли.

§ 1. ИЗЛУЧЕНИЕ ФОТОСФЕРЫ

Основным сообщением, опубликованным в литературе за истекшее время, является статья Клермана², в которой приводятся подробные результаты обработки спектрограмм, полученных ранее Хопфилдом и Клерманом³. В работе даны таблицы для всех линий поглощения, которые смогли быть измерены в спектре. Изученный спектр охватывает область 2285—3000 Å и содержит 248 линий. В таблице приведены для каждой линии измеренная длина волны (точность измерений оценивается в 0,2 Å), визуальная оценка интенсивности, элементы, которым может принадлежать данная линия, и лабораторная длина волны линии. Оказалось возможным отождествить около 90% всех линий. Основные результаты этого отождествления по элементам таковы:

В1 — присутствие этого элемента на Солнце установлено только по молекулярным полосам. Наиболее чувствительные его линии ($\lambda = 2496$ Å

и $\lambda=2497 \text{ \AA}$) попадают в участок спектра, содержащий много сильных линий железа, и не смогли быть обнаружены.

С I — единственная в рассматриваемой области интенсивная линия $\lambda=2479 \text{ \AA}$ блендируется линиями Fe и не смогла быть обнаружена.

O I — этому элементу приписывается мультиплет, состоящий из трех линий. Эти линии, однако, перекрываются линиями Fe и V, вследствие чего отождествление не считается надежным.

Na I — отождествлены две линии, принадлежащие главной серии.

Mg I — отождествлен целый ряд линий.

Mg II — имеется сильный резонансный дублет, обнаруживающий наличие эмиссионных линий в центре абсорбционных линий.

Al I — отождествлено два дублета.

Al II — отождествлена одна линия.

Si I — отождествлено семь интенсивных мультиплетов.

P I — отождествлено пять интенсивных линий.

Элементы длинного периода — надежно отождествлено лишь несколько линий.

Fe I, Fe II — отождествлены все основные линии, попадающие в исследованную область спектра; они составляют подавляющее число всех наблюдаемых линий.

Молекулярные полосы — часть линий могла

быть истолкована как канты некоторых двухатомных молекул, однако отсутствие остальных членов соответствующих систем не позволило ни в одном случае принять это отождествление.

Таким образом, существенно новых результатов в работе не получено. Для получения новых данных необходимы фотографии спектра со значительно большей дисперсией и разрешением.

В работе⁴ приведена очень интересная фотография дублета Mg II $3s^2S-3p^2P^0$ (рис. 1). Спектрограмма была получена при помощи ракеты Аэроби 3/IX 1952 г. с высоты 77—85 км при использовании спектрографа с дифракционной решеткой радиуса 40 см, 600 штрихов/мм. Линии имеют эмиссионный центр на фоне широких линий поглощения. Ширина линий порядка 0,7—0,8 Å является, по мнению авторов, аппаратной шириной.

В работе⁵ спектры Солнца, полученные на различных высотах между 35 и 70 км, использованы для изучения распределения concentra-

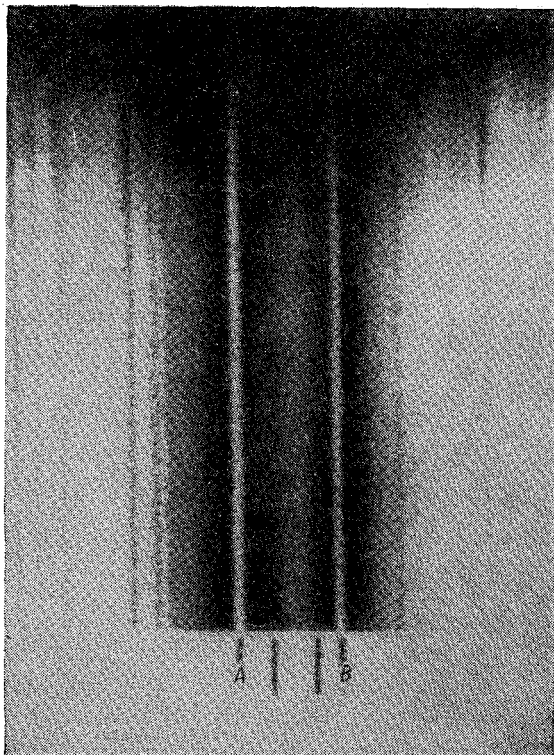


Рис. 1. Дублет Mg II $\lambda\lambda 2795, 523 \text{ \AA}$ (A) и $2802, 698 \text{ \AA}$ (B).

ции озона по высоте. Применена интересная конструкция сдвоенного спектрографа с очень широким углом зрения.

Теоретическое рассмотрение излучения в области 3000—2000 Å было произведено Де Ягером⁶. Это излучение принадлежит фотосфере и переходной области между фотосферой и хромосферой и было рассчитано Де Ягером, исходя из некоторой средней модели строения этой области. На рис. 2 представлено приведенное в этой работе сопоставление теоретических и экспериментальных результатов. Экспериментальные результаты взяты из работы⁷. Депрессия в области 2800—2850 Å обусловлена интенсивным дублетом Mg II, и депрессия в области 2500 Å обусловлена пределом серии Mg I. Для области $\lambda > 2600$ Å наблюдается достаточно хорошее совпадение между теоретическими и экспериментальными данными, для более коротковолновой области спектра расхождения довольно значительны. Так, для 2300 Å теоретическое значение интенсивности излучения соответствует температуре излучения в 4500°, а найденное экспериментально — 5000°. Экспериментальное значение превышает теоретическое примерно в 5 раз. Возможное объяснение этих расхождений заключается в температурной неоднородности фотосферы. Температурные неоднородности порядка $\pm 500^\circ$ могут увеличить излучение в области $\lambda = 2200$ Å в пять раз.

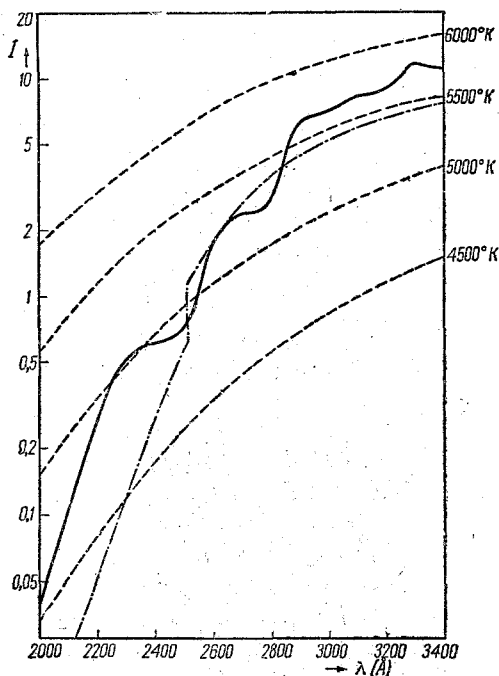


Рис. 2. Распределение энергии в области 3000—2000 Å. — эксперимент, — — — теоретические значения.

§ 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ХРОМОСФЕРЫ

Исследования коротковолнового излучения хромосферы были выполнены как при спектральном разложении света с помощью спектрографов, так и с помощью фотоэлектрических приемников с выделением узкой спектральной области.

Использование следящих систем⁸, наводящих оптическую ось спектрографа на Солнце в продолжение большей части времени пребывания ракеты на высотной части траектории, позволило получить спектры с большими экспозициями и продвинуться значительно дальше в коротковолновую область спектра по сравнению с первыми фотографиями спектра Солнца.

Первая спектрограмма данного ряда была получена в полете ракеты типа Аэроби 12 декабря 1952 г.⁹ Более подробное описание этого исследования дано в работе Ренса¹⁰. Был использован спектрограф с дифракционной решеткой 600 штрихов/мм в установке косого падения. Радиус кривизны решетки 49,80 см, угол падения 85° . Спектрограф наводился на Солнце с помощью двухосевой следящей системы; эффективная экспози-

ция составляла 28 сек., средняя высота подъема ракеты за время экспозиции — 81 км.

Полученный спектр имел в области 5000—2000 Å обычный вид — многочисленные линии поглощения на фоне непрерывного спектра. По чернение в области спектра короче 2000 Å было обусловлено в основном рассеянием света в спектрографе, однако линии поглощения могли быть прослежены до 1800 Å, а непрерывный спектр — до 1700 Å. Короче этой области была обнаружена лишь одна линия; измерения ее длины волны

дали значения $\lambda = 1215,5 \pm 1,0$ Å, и линия была отождествлена как L_α -головная линия лаймановской серии водорода. Линия имеет узкий эмиссионный центр и несимметричные эмиссионные крылья; общая ширина линии составляет около 5 Å, поток излучения в линии составляет $0,5 \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$ на границе земной атмосферы.

В работе¹¹ были получены спектры во время полета ракеты 2 февраля 1954 г. на высотах между 80 и 104 км; прибор наводился на Солнце с помощью следящей системы.

Для уменьшения рассеянного света была использована реплика решетки из пластмассы и Солнце фокусировалось на щель с помощью кварцевого зеркала, отражающая способность которого увеличивается для области спектра короче 2000 Å и достигает максимума порядка 20% для $\lambda \approx 1200$ Å. Наблюдалась интенсивная линия L_α и следы непрерывного спектра в области 1100—1300 Å, соответствующей «окну» в поглощении O_2 . Непрерывный спектр в остальных участках был поглощен молекулами O_2 , находящимися выше ракеты. Поток излучения в линии L_α составлял $0,3\text{—}0,6 \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$, а полуширина линии $< 0,3$ Å.

В работе Миллера, Меркюра и Ренсе¹² использовался спектрограф с дифракционной решеткой радиусом 39 см, 600 штрихов/мм. Угол падения на решетку составлял $49,5^\circ$ и был выбран из расчета устранения астигматизма для линии L_α . Было сделано три снимка на высотах (в скобках указана длительность экспозиции) 89 км (16,1 сек.),

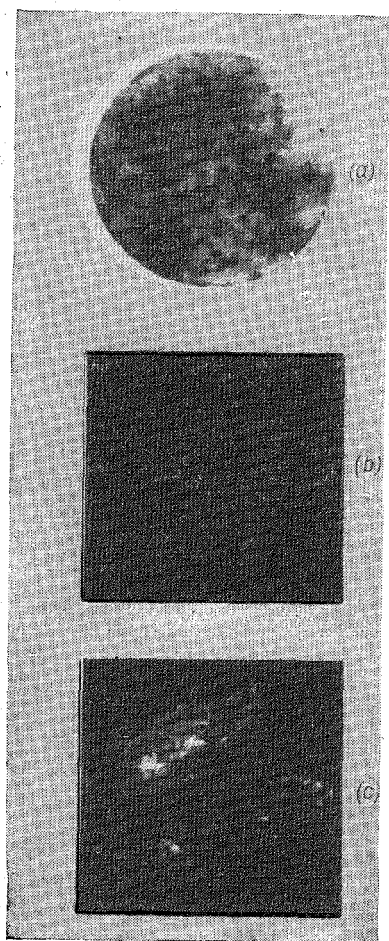


Рис. 3. Фотография солнечного диска: а) в лучах L_α (негатив), б) в лучах H_α (позитив), в) в лучах $Ca II$ (позитив).

105 км (7,5 сек.), 122 км (31,4 сек.). Полученные значения интенсивностей излучения и полуширины линии L_α приведены в таблице I. Устранение астигматизма для линии L_α позволило получить данные об изменении интенсивностей этой линии по диску Солнца, важные для построения модели хромосферы.

В работе¹³ было произведено фотографирование диска Солнца в лучах L_α с помощью монохроматической камеры. Оптическая система

состояла из двух 15° -призм и линзы из LiF. Разрешающая способность камеры — около $1/20$ солнечного диаметра, а ширина спектральной области — около $40 \text{ \AA}$. Диаметр изображения составлял $2,8 \text{ мм}$. Камера наводилась на Солнце с помощью следящей системы. Колебания в направлении оси за время экспозиции в 2 сек. не превышали двух минут дуги. Фотографии были сделаны с высоты в 148 км .

На рис. 3 изображена одна из полученных фотографий (негатив); для сравнения приведены фотографии солнечного диска в лучах H_α ($6563 \text{ \AA}$) и CaII ($3934 \text{ \AA}$) (позитивы), полученные в тот же день (8 мая 1956 г.). Имеется строгая корреляция между областями усиления L и активными областями Солнца.

Таблица I

Эффективная высота, км	Интенсивность L_α , $\text{эрг/см}^2\text{сек}$	Полуширина L_α , $\text{\AA}$
89	1,7	0,74
105	2,6	0,80
122	3,0	0,85

Первые результаты измерений области спектра вблизи L_α с применением счетчиков фотонов, а также с применением специальных фосфоров были описаны в ¹. Дальнейшие результаты измерений с помощью счетчиков фотонов были получены в работе ¹⁴.

Область чувствительности счетчиков охватывала интервал $1100 - 1300 \text{ \AA}$. Как и в предыдущих опытах, излучение было обнаружено на высоте $74 \pm 2 \text{ км}$; наибольшая высота полета составляла 128 км . Интенсивность излучения, экстраполированная к границе земной атмосферы, составила $0,10 \pm 0,02 \text{ эрг/см}^2 \text{сек}$. График, дающий зависимость интенсивности излучения от высоты, имеет прямолинейный вид. Так как вблизи L_α в поглощении O_2 имеется узкое «окно», шириной около $1 \text{ \AA}$, на краях которого поглощение возрастает на 200% , линейный ход интенсивности с высотой указывает, что ширина линии L_α меньше $1 \text{ \AA}$. Это хорошо согласуется с позднейшими фотографическими измерениями приведенными выше. Интенсивность непрерывного спектра в области L_α по данным этих измерений имеет величину $0,01 \text{ эрг/см}^2 \text{сек}$ на область в $100 \text{ \AA}$.

Последние по времени фотоэлектрические измерения были выполнены Байрамом, Шубб, Фридманом и Кушпереном в 1956 г. ¹⁵. Приемником излучения служила ионизационная камера, заполненная NO и закрытая окном из LiF. Граница пропускания LiF (около $1100 \text{ \AA}$) определяла коротковолновую границу регистрируемой области, а порог ионизации NO при $1340 \text{ \AA}$ — длинноволновую границу. Таким образом, область чувствительности приемника охватывала интервал $1100 - 1340 \text{ \AA}$. В соответствии с фотографическими измерениями, на долю L_α приходится 95% всего потока в этой области. Измерения дали значения энергии, превышающие $2 \text{ эрг/см}^2 \text{сек}$ на границе земной атмосферы.

Сопоставление всех приведенных выше результатов измерений дает для интенсивности линии L_α чрезвычайно различающиеся между собой значения, лежащие между $0,1$ и $10 \text{ эрг/см}^2 \text{сек}$ ²³. Несомненно, что часть полученных значений отягощена некоторыми погрешностями, обусловленными ошибками измерений и ошибками в экстраполяции измеренных значений к границе земной атмосферы. По-видимому, однако, имеют место и реальные сильные вариации интенсивностей линии L_α в различных опытах. При всех описанных измерениях не отмечалось

какой-либо повышенной активности Солнца. Это заставляет полагать, что сильные вариации в интенсивности L_α могут иметь место и в условиях относительно спокойного Солнца (см. § 4).

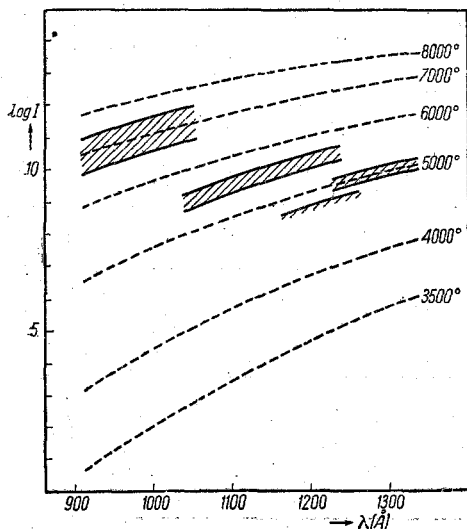


Рис. 4. Наблюдаемые и рассчитанные значения энергии непрерывного спектра хромосферы.

Теоретическое исследование излучения хромосферы после рассмотренных в ¹ работ Шкловекого ¹⁶ было выполнено Де Ягером ⁶. Де Ягер раздельно рассматривает непрерывное излучение хромосферы и линию L_α . Принимая, что излучение непрерывного спектра может быть аппроксимировано излучением серого тела, Де Ягер сопоставляет экспериментальные результаты, приведенные в ¹, с данными расчетов для различных значений температуры. Это сопоставление показано на рис. 4.

При сопоставлении теоретических и экспериментальных данных для L_α Де Ягер исходит из экспериментального значения $0,10 \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$ и из ширины линии, меньшей 1 Å ; это соответствует температуре излучения $\sim 6400^\circ$, что значительно ниже температуры хромосферы

($\sim 30\,000^\circ$). Отсюда делается вывод, что излучение в линии L_α определяется не локальным значением электронной температуры, а обусловлено рассеянием.

К этому же выводу приходят Атей и Томас, также рассматривающие, основываясь на данных для L_α , различные модели строения хромосферы ¹⁷. Форма и интенсивность линии L_α в условиях сильной вспышки, а также для спокойной хромосферы были рассчитаны Э. В. Мустелем и А. Б. Северным ²⁴.

§ 3. ИЗЛУЧЕНИЕ КОРОНЫ

Излучение короны как в более ранних, так и в последующих работах исследовалось с помощью фотоэлектрических приемников — счетчиков фотонов с выделением узких областей спектра фильтрами.

Последние результаты исследований изложены в работе Байрама, Шубба и Фридмана ¹⁸. Счетчик фотонов представлял собой цилиндрическую оболочку из хромоникелевой стали, служившую катодом, по оси которой была натянута вольфрамовая нить — анод. Отверстие в оболочке закрывалось тонкими металлическими и органическими пленками, служившими фильтрами, выделявшими соответствующую область спектра. Счетчики заполнялись смесью благородного газа с гасящим молекулярным газом. Импульсы, даваемые счетчиками, интегрировались с постоянной времени порядка 2 сек. и передавались на Землю с помощью телеметрической системы.

Наиболее надежные результаты, по мнению авторов исследования, получены при двух полетах ракет типа Аэробы NRL в ноябре и декабре 1953 г. В каждом полете использовалась группа из четырех счетчиков, рассчитанных на регистрацию различных областей спектра и на различные уровни интенсивности излучения. Счетчики были ориентированы таким образом, что давали заметные отсчеты только тогда, когда они оказывались при вращении ракеты наведенными на Солнце.

Один из счетчиков был закрыт бериллиевым окном диаметром в 8 мм и толщиной в 0,125 мм и был рассчитан на регистрацию излучения короче 8 Å; этот счетчик не дал никаких отсчетов. Спектральные чувствительности остальных счетчиков показаны на рис. 5 и 6. Эти кривые получены путем расчета пропускаемости окон и поглощения излучения

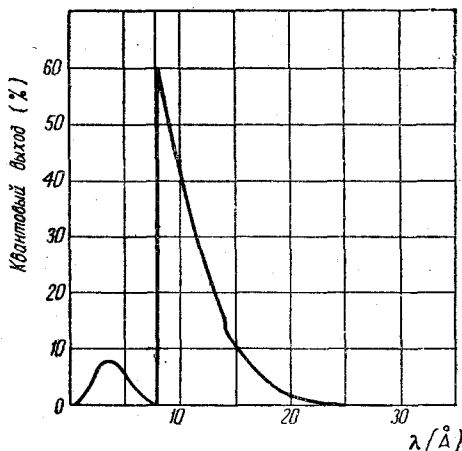


Рис. 5. Спектральная чувствительность счетчика с Al-фильтром. Al — 1,7 мг/см², заполнение — 9,4 мм, этил-формиат и 625 мм Ne, поглощающий слой — 2 см.

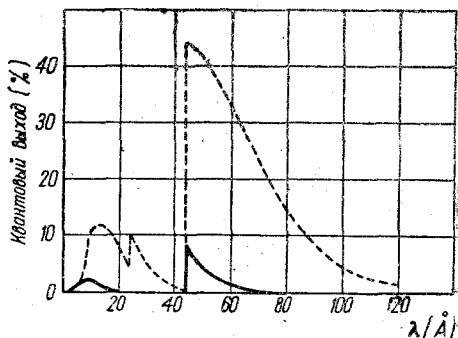


Рис. 6. Спектральные чувствительности счетчиков с фильтрами из органических пленок [(C₄H₈O₄)_x]. — майлар 0,73 мг/см², — — — глиптал 0,18 мг/см², заполнение — 6,4 мм, этил-формиат и 750 мм Ne, поглощающий слой — 2 см.

газом счетчика в предположении, что поглощает только газ и что каждый поглощенный фотон вызывает отсчет (оба эти предположения были экспериментально проверены).

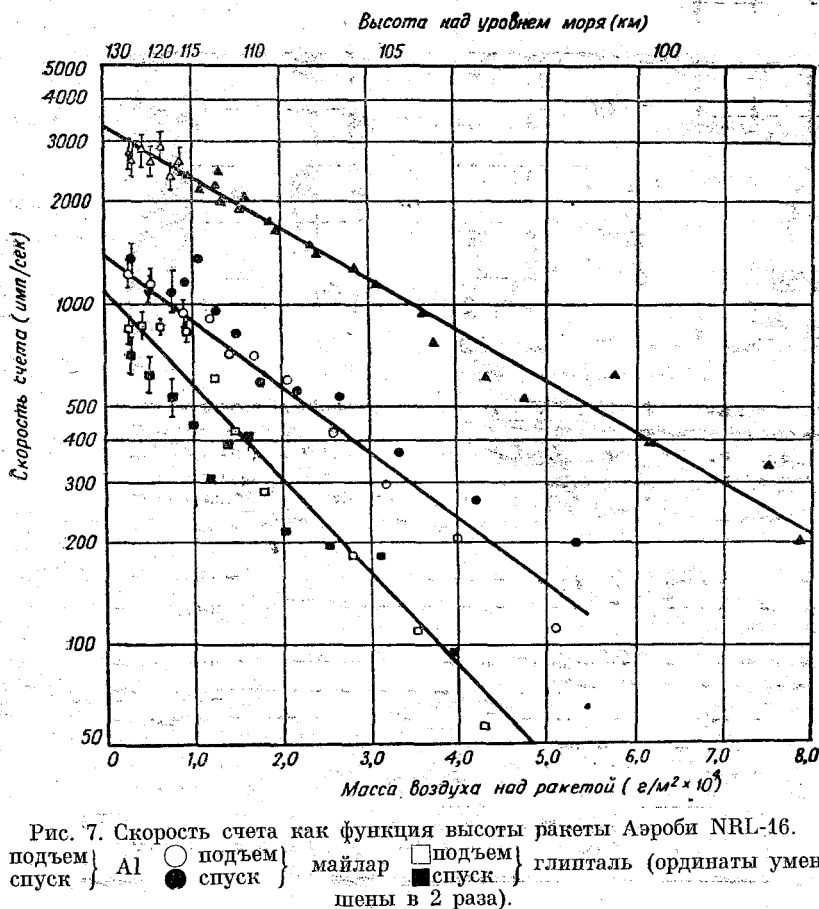
На рис. 7 показаны результаты измерений со всеми тремя счетчиками при полете ракеты NRL-16. По оси абсцисс вверху отложена высота ракеты в км, внизу — масса воздуха над ракетой; по оси ординат отложена скорость счета (в импульсах в секунду).

Таблица II

Фильтр	Алюминий	Майлар	Глиптал
Толщина (мг/см ²)	1,6	0,73	0,18
Диаметр отверстия (мм) . . .	3	0,25	0,13
Число импульсов/см ² сек, экстраполированное к границе земной атмосферы . . .	4,5 · 10 ⁴	2,8 · 10 ⁶	4,9 · 10 ⁷

В таблице II приведены полученные максимальные значения скорости счета, исправленные на мертвое время счетчиков, обусловленное конечной разрешающей способностью, и на отклонения нормали к окнам счетчиков от направления на Солнце (положение ракеты относительно Солнца определялось с помощью фотоэлементов). Для того чтобы от этих данных перейти к интенсивности излучения, необходимо знать закон распределения интенсивности излучения по длинам волн. Это распределение принято соответствующим излучению серого тела, и расчеты выполнены для трех значений температуры: 7 · 10⁵, 1 · 10⁶ и 2 · 10⁶ °K. Результаты этих

вычислений приведены в таблице III. Пятая строчка таблицы дает интенсивность излучения в узкой области спектральной чувствительности приемника, а шестая строчка — полную энергию излучения во всей исследованной рентгеновской области. Эти последние данные показывают, что температура в $7 \cdot 10^5$ °K, соответствующая полному потоку излучения $\sim 0,1$ эрг/см² сек, наилучшим образом удовлетворяет измерениям со всеми тремя типами счетчиков. Излучательная способность Солнца оказывается при этом равной $4 \cdot 10^{-16}$. Если принять температуру равной 10^6 °K,



то значение полной энергии, вычисленное по данным измерений со счетчиком с Al-окном, в 10 раз расходится с значением энергии, вычисленным по данным остальных двух счетчиков. Это показывает, как чувствительны результаты вычислений полной энергии к принятому значению температуры, тогда как величина энергии, приходящейся на узкий спектральный интервал, от значения температуры зависит слабо. Температура $7 \cdot 10^5$ °K хорошо совпадает с температурой $8 \cdot 10^5$ °K, полученной для внутренней короны по радиоизмерениям и, по-видимому, соответствует спокойному состоянию короны. Полеты ракет Аэробы-14 и Аэробы-16 происходили в условиях, когда солнечная активность была минимальна.

Излучение в области спектра вблизи 50 Å сравнительно стабильно по интенсивности. Иначе обстоит дело с излучением в области спектра короче 20 Å. Как показывает сопоставление данных, полученных при всех полетах ракет, интенсивность этого излучения подвержена сильным

вариациям. И. С. Шкловским¹⁶ на основании анализа видимого спектра короны было показано наличие в солнечной короне областей с более высокой температурой, в которых возбуждаются корональные линии, требующие для своего возбуждения больших энергий. Есть все основания приписать этим участкам повышенное излучение в области 20 Å.

Таблица III

Ракета типа Аэробл	NRL-16	NRL-16	NRL-16	NRL-14
1. Фильтр	алюминий	майлар	глиптал	глиптал
2. Число импульсов/см ² сек	$4,5 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^6$	$4,9 \cdot 10^7$	$5,9 \cdot 10^7$
3. Максимальный квантовый выход	60%	9%	44%	44%
4. Область спектральной чувствительности (ангстремы)	8—20	44—60	44—100	44—100
5. Энергия в эрг/см ² сек в пределах данной спектральной области				
$7 \cdot 10^5$ °K	0,00074	0,023	0,053	0,064
$1 \cdot 10^6$ °K	0,00069	0,021	0,042	0,051
$2 \cdot 10^6$ °K	0,00039	0,014	9,029	0,035
6. Энергия в эрг/см ² сек в пределах всей рентгеновской области спектра				
$7 \cdot 10^5$ °K	0,094	0,099	0,10	0,12
$1 \cdot 10^6$ °K	0,011	0,11	0,12	0,14
$2 \cdot 10^6$ °K	0,00085	0,24	2,29	0,35

В таблице IV приведены результаты измерений, полученные при шести полетах ракет. В строке 5 приведены значения интенсивности излучения для всей области 0—20 Å, вычисленные в предположении $T=10^6$ °K и $T=2 \cdot 10^6$ °K. Если принять более низкое значение температуры, например $7 \cdot 10^5$ °K, то общая интенсивность, вычисленная на основе измерений со счетчиками с Ве-окнами, окажется чрезмерно большой.

В строке 6 приведены интенсивности некоторых корональных линий на основании земных наблюдений с помощью коронографа. Наблюдается корреляция между интенсивностью излучения в области 0—20 Å и интенсивностью линий Fe XIV и Ni XV. В то время как интенсивность линий Fe X во всех случаях примерно одинакова, интенсивность линий Fe XIV и Ni XV, соответствующих более высокой энергии возбуждения, больше во время полетов ракет Аэробл-9, Аэробл-10 и Викинг-9, в которых наблюдается и значительно большая интенсивность излучения в области 0—20 Å.

Излучение короны теоретически рассматривалось также Эльвертом¹⁹ и Де Ягером⁶.

Непрерывное излучение короны нельзя непосредственно отождествлять с излучением черного тела, так как корона оптически прозрачна. Эльвертом произведены расчеты для излучения, обусловленного фоторекомбинацией электронов и ионов и свободно-свободными переходами электронов в поле ионов, для двух значений температуры: $7 \cdot 10^5$ °K и

Таблица IV

Тип ракеты	V-2	Аэробл-9	Аэробл-10	Викинг-9	Аэробл-14	Аэробл-16
1. Дата запуска	29/9/49	1/5/52	5/5/52	15/12/52	15/11/53	1/12/53
2. Фильтр . . .	Be	Be	Be	Al	Al	Al
3 Число импульсов/см ² сек	13 мг/см ²	47 мг/см ²	47 мг/см ²	1,59 мг/см ²	1,59 мг/см ²	1,59 мг/см ²
4. Область спектральной чувствительности (ангстремы) . . .	1, 10 ⁴	495	<125	2, 9·10 ⁶	<3, 1·10 ⁴	4, 5·10 ⁴
5. Энергия (эрг/см ² сек) в области 0—20 Å	7—12	5—9	5—9	8—20	8—20	8—20
1·10 ⁶ °K . .	0,44	2,5	<0,64	0,2	<0,0015	0,0007
2·10 ⁶ °K . .	0,01	0,0034	0,0009	0,2	<0,0015	0,0004
6. Интенсивность корональных линий						
Fe X 6374 Å, 238 эв . .	—	104	109	131	136	131
Fe XIV 5303 Å, 355 эв . .	—	227	254	224	68,1	85
Ni XV 6702 Å, 422 эв . .	—	26	32	25	0,5	0
Ca XV 5694 Å, 814 эв . .	—	0	0	0	0	0

$1 \cdot 10^6$ °K. Общее непрерывное излучение короны для $T=10^6$ °K составляет 10^3 эрг/см²сек; спектральное распределение излучения изображено на рис. 8. На рис. 9 излучение непрерывного спектра короны для $T=10^6$ °K сопоставлено с излучением черного тела при той же температуре. Оба распределения оказываются чрезвычайно схожими, и, таким образом, спектральное распределение непрерывного излучения короны можно аппроксимировать распределением черного тела; абсолютная величина излучения соответствует оптической толщине короны $\sim 4 \cdot 10^{-17}$. При этом

учтено наличие неоднородностей плотности $Q=2$, где $Q = \frac{\bar{N}_e^2}{N_e^2}$.

Значительный интерес представляет расчет линейчатого спектра короны в рассматриваемой области. Как известно, в спектре короны в видимой области наблюдается около 20 эмиссионных спектральных линий. Эти линии видны только в спектре короны; в спектре фотосферы и хромосферы их нет; они также не наблюдались ни в одном земном источнике. Эти линии на протяжении многих десятков лет не могли быть идентифицированы, и природа их оставалась полностью загадочной. Об их происхождении делались многочисленные гипотезы — начиная от гипотетического элемента «корония» и кончая атомным комбинационным рассеянием. В 1941—1942 гг. Эдленом было показано, что все корональные линии могут быть отождествлены, как запрещенные магнитодипольные

переходы в спектрах высокоионизованных атомов железа, никеля и других элементов (Fe X, XI, XIII, XIV; Ni XII, XIII, XV, XVI; Ca XI, XIII, XV; Ag X). Все эти линии соответствуют переходам между компонентами гонкой структуры метастабильных уровней, причем большая часть этих отождествлений покоится на экстраполяции лабораторных значений энергий уровней. Отсутствие в видимом спектре короны линий ряда атомов в промежуточных состояниях ионизации, например Fe XII, Ni XIV, а также линий соответствующих ионов других элементов объясняется индивидуальными особенностями строения энергетических состояний этих ионов.

Таким образом, наблюдения видимого линейчатого спектра короны дают очень неполное и в некоторой степени недостаточно достоверное представление о спектре короны. Все наиболее характерные резонансные линии высокоионизованных атомов, присутствие которых можно ожидать в короне, лежат в рассматриваемой коротковолновой области спектра. Исследование линейчатого спектра короны в этой области приобретает поэтому первостепенный интерес.

Исходя из вероятного химического состава короны, Эльверт определил

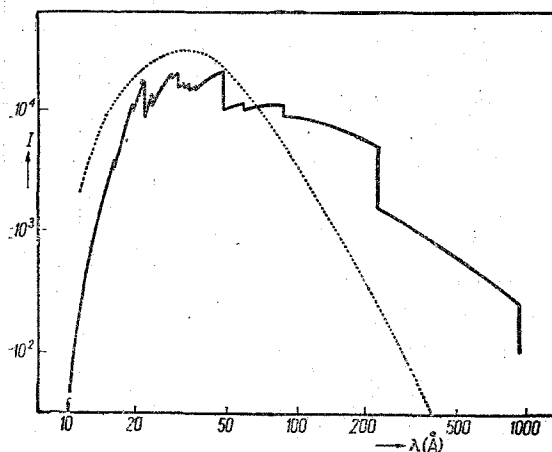


Рис. 9. Сопоставление спектрального распределения излучения короны (—) и черного тела (...) для $T = 10^6$ °K.

элементарные процессы, приводящие к возбуждению ионов, и процессы разрушения возбужденных ионов, Эльверт приходит к выводу, что основным процессом возбуждения является возбуждение иона из

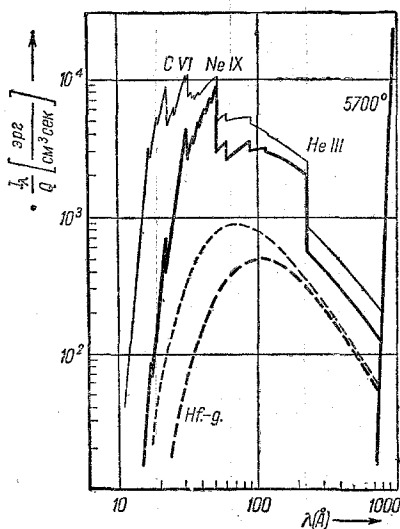


Рис. 8. Непрерывный спектр солнечной короны. Интенсивность $\frac{I_\lambda}{Q}$ на $1 \text{ см}^2 \text{сек}$, приходящаяся на интервал $\Delta\lambda = 1 \text{ см}$, на границе земной атмосферы: — для $T = 7 \cdot 10^5$ °K, — для $T = 10^6$ °K. Для сравнения приведено излучение рекомбинации H: — — — для $T = 7 \cdot 10^5$ °K, — — — для $T = 10^6$ °K и излучение фотосферы при $T = 5700^\circ$.

состояние ионизации атомов элементов, в котором они могут существовать в условиях короны. Считая эти ионы водородоподобными, Эльверт вычислил далее приближенные значения длин волн их резонансных линий. Эти данные были сравнены с экспериментальными значениями длин волн, имеющимися для некоторых ионов, и в теоретические значения были внесены поправки. Все эти данные приведены в таблице V; принятые для дальнейших расчетов значения длин волн даны в последней графе.

Далее, Эльвертом были рассчитаны интенсивности этих линий. Рассматривая процессы возбуждения ионов, и процессы разрушения возбужденных ионов, Эльверт приходит к выводу, что основным процессом возбуждения является возбуждение иона из

Таблица V

Элемент	λ канта	λ теор	Переход	λ эксп.	λ
He II	227	304	$1s - 2p$	304	304
C IV	194	350	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 3p^2 P_{1/2}$	312	342
V	32	43	$1s^2 1S_0 - 1s 2p^1 P_1$	40	40
N V	126	230	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 3p^2 P_{1/2}$	210	240
VI	22	30	$1s^2 1S_0 - 1s 2p^1 P_1$	29	29
O VI	90	160	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 3p^2 P_{1/2}$	150	150
			$2S_{1/2} - 2P_{1/2}$	150	
VII	47	23	$1s^2 1S_0 - 1s 2p^1 P_1$	22	22
Ne VII	59	105			95
VIII	52	93			85
Mg VIII	48	80	$2s^2 2p^2 P_{1/2} - 2s^2 3d^2 D_{3/2}$	75	75
			$2P_{1/2} - 2D_{3/2}$	75	
IX	38	70	$2s^2 1S_0 - 2s 3p^1 P_1$	63	63
X	34	60	$2s^2 3S_{1/2} - 3p^2 P_{1/2}$	58	58
			$2S_{1/2} - 2P_{1/2}$	58	58
Si VIII	40	70	$2s^2 2p^3 4S_{3/2} - 2s^2 2p^3 3s^4 P_{5/2}$	70	67
			$4S_{3/2} - 3d^4 P_{5/2}$	67	
			$2P_{3/2} - 3d^2 D_{3/2}$	64	
			$2D_{3/2} - 2F_{5/2}$ и др.	64	
IX	34	60	$2s^2 2p^3 1S_0 - 2s^2 2p^3 3d^1 P_1$	58	55
			$1D_2 - 1F_3$	56	
			$1D_2 - 2s 2p^2 3p^1 F_3$	51	
X	30	54	$2s^2 2p^2 2P_{3/2} - 2s^2 3d^2 2D_{5/2}$	и а. 51	51
Fe IX	50	113	$3s^2 3p^3 1S_0 - 3s^2 3p^3 4s^3 P_1$	105	105
X	47	107	$3s^2 3p^3 2P_{3/2} - 3s^2 3p^3 4s^2 P_{1/2}$	95	97
			$2P_{1/2} - 2P_{1/2}$	97	

Продолжение табл. V

Элемент	λ канта	λ теор.	Переход	λ эксп.	λ
XI	43	98	$2P_{3/2} - 2P_{3/2}$	96	88
			$2P_{1/2} - 2P_{3/2}$	98	
			$3s^2 3p^4 \ 3P_1 - 3s^2 3p^3 4s \ 3S_1$	90	
			$3P_2 - 3S_1$	89	
			$3P_1 - 3P_2$	88	
			$3P_2 - 3D_2$	87	
XII	35	80			73
XIII	32	73			65

нормального состояния соударениями с электронами; вследствие большого различия в энергиях между резонансным и следующим возбужденным уровнем практически возбуждается только резонансный уровень. Образование возбужденных ионов за счет рекомбинации ионов в соответствующее состояние играет значительно меньшую роль. Вычисления далее показывают, что для излучения в линиях корона не является прозрачной. Принимая, что линии имеют доплеровскую форму, обусловленную тепловым и турбулентным движением ионов, с шириной порядка 10^{-2} Å, Эльверт вычислил интенсивности линий для трех значений температуры. Результаты вычислений приведены на рис. 10.

Рассмотрение этих данных показывает, что излучение линейчатого спектра играет основную роль в излучении короны; его интенсивность составляет $2,5 \cdot 10^{+3} Q' \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$, что соответствует $6 \cdot 10^{-2} Q' \text{ эрг/см}^2 \text{ сек}$ на границе земной атмосферы (Q' — фактор неоднородности, могущий иметь значение ~ 2). Общий поток излучения оказывается при этом мало зависящим от принятого значения температуры; максимум излучения, однако, для температуры 10^6 °K значительно сдвинут в коротковолновую часть спектра по сравнению с температурой $6 \cdot 10^5$ °K.

На рис. 11 изображено совместно линейчатое и непрерывное излучение короны, суммированное по дискретным интервалам длин волн (10, 20, 50 и 100 Å) ⁶.

§ 4. ВАРИАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Изложенные в предыдущих параграфах результаты указывают на наличие весьма значительных вариаций интенсивности как линии L_{α} , излучаемой хромосферой, так и рентгеновского участка спектра, излучаемого короной. Если абсолютное значение интенсивности излучения хромосферы и короны в целом по порядку величины удовлетворительно описывается теорией, то указанные вариации остаются пока вне рамок теории.

Несомненно, что эти вариации связаны с физическими процессами, протекающими в хромосфере и короне Солнца. В свою очередь вариации

в интенсивности коротковолнового ультрафиолетового ионизирующего излучения Солнца вызывают сильные возмущения в ионосфере Земли, проявляющиеся в нарушении радиосвязи, магнитных бурях и т. д.

Систематическое исследование вариаций интенсивности коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца имеет поэтому первостепенное значение.

Недавно была сделана первая непосредственная попытка связать изменения интенсивности линии L_{α} и рентгеновского излучения с солнечными вспышками, ответственными за возмущения в ионосфере, приводящими к «федингам» в радиосвязи²⁰.

Вспышки длятся очень короткое время, порядка нескольких минут; для того чтобы обеспечить измерения в момент вспышек, была принята следующая методика. Приемники излучения помещались в небольшие ракеты, которые были прикреплены к воздушным шарам. Шары поднимались на высоту 24 км, и запуск ракет осуществлялся по радио в момент появления вспышек на Солнце. Исследования велись с экспедиционного судна в течение двух недель, начиная с 16 июля 1956 г. в районе Тихого

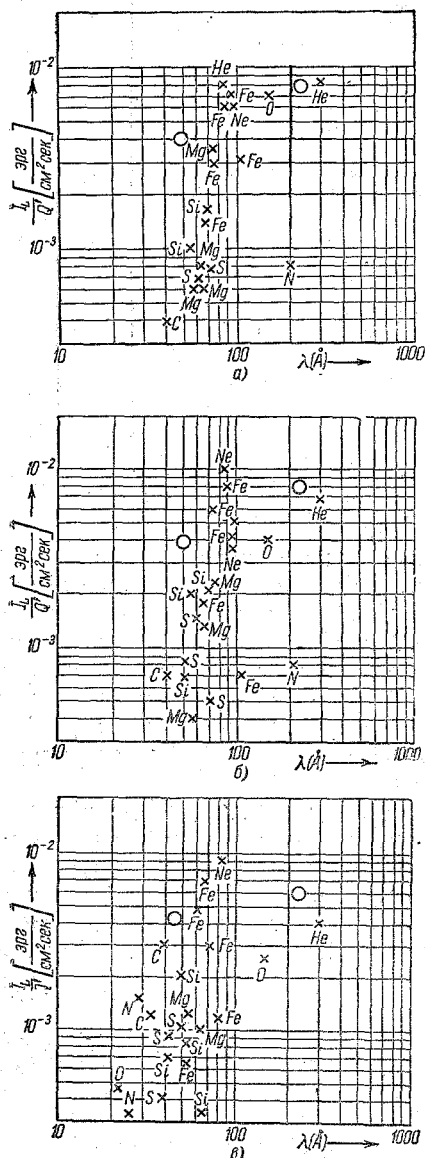


Рис. 10. Интенсивность линий в спектре короны. а) $T = 6 \cdot 10^5$ °K, б) $T = 7 \cdot 10^5$ °K, в) $T = 1 \cdot 10^6$ °K; интенсивность непрерывного спектра для области 50 Å и He обозначена кружками.

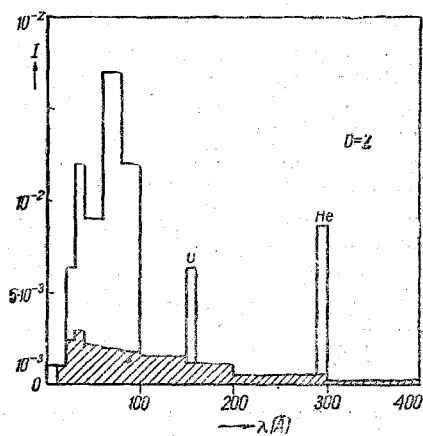


Рис. 11. Линейчатое и непрерывное (заштриховано) излучение короны, суммированное по дискретным интервалам длин волн (10, 20, 50 и 100 Å).

океана, на расстоянии 200—400 миль на юго-запад от Сан-Диего. Шары диаметром около 21 м заполнялись гелием и поднимали четырехметровую ракету, снабженную приемниками ультрафиолетового излучения и передающей телеметрической системой.

В качестве приемников излучения использовались ионизационные камеры и счетчики фотонов; регистрировалось излучение L_{α} ; область 1—10 Å и область жестких рентгеновских лучей 0,05—1 Å.

Ежедневно производился запуск одного шара на высоту 24 км. В момент появления «феддинга» с борта судна посылался сигнал, который приводил в действие двигатель ракеты и научную аппаратуру. В течение 1½—2 минут ракета достигала высоты в 50—70 миль над Землей и сигналы приемников излучения передавались на судно. Был подготовлен также второй метод установления момента запуска ракеты: оптический телескоп был снабжен фиолетовым фильтром, выделяющим К-линии Ca II, и фотоэлектрическим приемником, сигнал которого в момент усиления линий кальция управлял запуском ракеты. Облачная погода, однако, помешала использованию этого метода.

За 11 дней исследований была наблюде́на одна вспышка класса 1 и две — класса 2.

Обе последние вспышки, однако, не были использованы. Вспышка класса 1 была слишком слаба, чтобы вызвать «феддинг», и была обнаружена с помощью спектрографа на обсерватории в Климаксе. Быстро посланное по радио на борт судна сообщение об этой вспышке позволило запустить ракету еще во время продолжения вспышки. Была обнаружена значительная интенсивность излучения в области 3 Å, соответствующая температуре порядка 10^7 °K. Интенсивность линии L_{α} оставалась нормальной, что, возможно, объясняется тем, что ракета достигла нужной высоты уже после прохождения вспышки через максимум.

Международный геофизический год совпадает с периодом 11-летней максимальной активности Солнца, что создает очень благоприятные условия для исследования вариаций в интенсивности коротковолнового излучения Солнца. Искусственные спутники Земли могут, очевидно, обеспечить проведение этих исследований, позволяя выполнить надежные измерения как длительных, так и быстрых вариаций интенсивности излучения Солнца.

Одним из первых экспериментов, намеченных в США, является измерение интенсивности линии L_{α} и вариаций ее интенсивности, связанных со вспышками на Солнце^{21, 22}; предполагается использовать ионизационную камеру с LiF-окном, заполненную NO¹⁵.

Первый этап исследований, намеченный в СССР, заключается в измерении солнечной радиации в рентгеновской области спектра. Выделение отдельных участков спектра в этой области будет осуществлено с помощью фильтров. Предполагается выделить следующие участки: от 3—5 до 8 Å; от 8 до 22 Å; от 44 до 120 Å. Как указывалось выше, первый участок спектра соответствует особо «горячим» областям короны, участок 8—22 Å соответствует излучению областей конденсации короны, а участок 44—120 Å соответствует излучению основной части короны.

Так как одной из основных задач эксперимента является исследование длительных и кратковременных вариаций соотношения потоков радиации в указанных областях, целесообразно применять способ измерения потоков радиации с помощью одного приемника. Это позволяет избежать ошибок, связанных с различным изменением чувствительности отдельных приемников за время длительного нахождения их на спутнике. Перед приемником радиации попеременно устанавливаются различные фильтры, выделяющие нужные области спектра.

Блок-схема прибора для регистрации рентгеновского участка спектра Солнца представлена на рис. 12. Перед приемником рентгеновской радиации 1 помещается диск с набором различных фильтров 2. С помощью шагового механизма 3 производится попеременная перестановка

различных фильтров. Сигналы от приемника 1 поступают на радиотехническую счетно-интегрирующую схему 4, выход которой подключен к передающей радиотелеметрической системе. Управление работой шагового механизма осуществляется с помощью релаксационного генератора 5. Для своевременного включения прибора имеется автомат 6, который управляется с помощью двух фотосопротивлений 7.

В приборе установлено три приемника 1, разнесенные по периметру под углами 120° , для увеличения вероятности попадания солнечной радиации на фотокатод приемника при различных ориентациях спутника

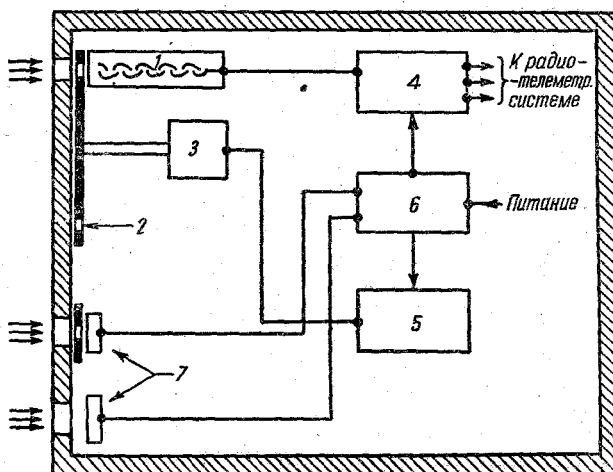


Рис. 12. Блок-схема прибора для регистрации рентгеновского участка спектра Солнца.

по отношению к Солнцу. Приемниками радиации являются вторично-электронные умножители из бериллиевой бронзы. Фотокатод этих приемников нечувствителен к видимой области спектра Солнца (красная граница фотоэффекта находится в области $2300\text{--}2500\text{ \AA}$.) Устанавливаемые перед приемниками фильтры представляют собой пленки бериллия, алюминия и полиэтилена различной толщины. Вычитая пропускание одних пленок из пропускания других, можно выделять различные спектральные области излучения Солнца. На рис. 13 представлены расчетные кривые пропускания различных фильтров.

Область *A* получается прохождением исследуемой радиации через бериллиевую фольгу толщиной 200 м . Область *B* получается вычитанием из пропускания алюминиевой пленки толщиной 5 м пропускания бериллиевой фольги толщиной 200 м . Область *B* получается вычитанием из пропускания полиэтиленовой пленки толщиной 3 м пропускания бериллиевой пленки толщиной 4 м .

Выделение линии L_α в принципе возможно с помощью двух фильтров из LiF с несколько сдвинутыми границами коротковолнового пропускания, устанавливаемых перед приемником, фотокатод которого имеет пониженную чувствительность к области спектра длиннее $1700\text{ \AA}$.

Поочередная перестановка фильтров осуществляется с частотой смены фильтров 2 фильтра в секунду.

В диске шагового механизма, помимо фильтров, имеются свободные отверстия, через которые радиация попадает прямо на фотокатод. По сигналам от приемника в момент установки перед ним свободного отверстия можно произвести необходимую корректировку на угол падения радиации.

на фильтры, который изменяется в связи с поворотом спутника, а также производить корректировку на изменения чувствительности приемника.

Сигналы от приемника в виде импульсов напряжения, число которых в секунду пропорционально интенсивности падающей на фотокатод радиации, поступают на вход счетно-интегрирующей радиотехнической схемы. Она состоит из импульсного усилителя, преобразователя импульсов и трех интегрирующих цепей. На выходе этих цепей создаются постоянные напряжения, пропорциональные скорости счета импульсов. Три выхода этих цепей соответствуют трем скоростям счета: 500 *имп/сек*, 5000 *имп/сек* и 50 000 *имп/сек*. Выходы интегрирующих цепей подключены на радиотелеметрическую систему, в которой эти сигналы поступают

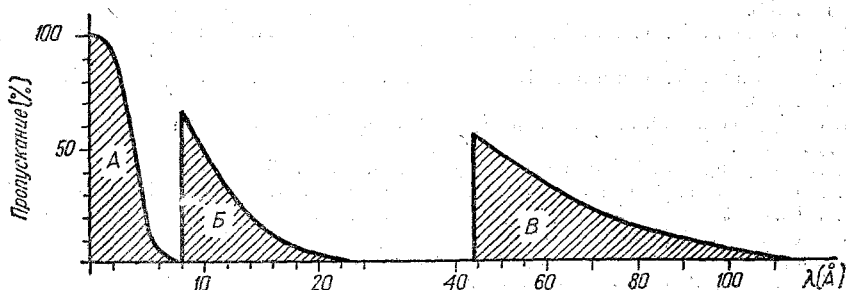


Рис. 13. Расчетные кривые пропускания фильтров.

на запоминающее устройство и передаются на Землю. Телеметрическая система включается на работу по определенному временному графику.

Использование импульсного метода регистрации излучения, несмотря на его сложность по сравнению с методом регистрации по постоянному току, обусловлено его большей чувствительностью и малой зависимостью результатов измерения от нестабильности источников питания и усилительных характеристик приемника.

Включение прибора в работу осуществляется автоматически в тот момент, когда солнечная радиация попадает на фотокатод одного из приемников и когда одновременно работает радиотелеметрическая система. Управление включением осуществляется с помощью фотосопротивлений, свет на которые попадает одновременно с попаданием на фотокатод. С каждым приемником связано два фотосопротивления: одно фотосопротивление имеет угол обзора 120° и включает накальные цепи прибора, второе имеет угол обзора 60° и включает анодные цепи прибора. Прибор включается с помощью фотосопротивлений только тогда, когда от специального программного устройства спутника подается сигнал на работу радиотелеметрической системы.

Следующим этапом исследований с помощью спутников должно явиться получение линейчатых спектров хромосферы и короны Солнца. Для этого будут использованы два малогабаритных спектрографа, один из которых охватывает область спектра от 30 Å до 300 Å, а второй — от 600 Å до 1500 Å. Предполагается использовать два метода регистрации: фотографический и фотоэлектрический.

Предполагается также осуществить фотографирование короны Солнца в рентгеновских лучах с помощью специального коронографа.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Л. Мандельштам, УФН 46, 145 (1952).
2. H. Clearman, Astrophys. J. 117, 29 (1953).
3. J. Norfield and H. Clearman, Phys. Rev. 73, 877 (1948).

- 4 F. Jonson, J. Purcell, R. Tousey, N. Wilson, *Astrophys. J.* **117**, 238 (1953).
5. F. Jonson, J. Purcell, R. Tousey, K. Watanabe, *J. Geophys. Res.* **57**, 157 (1952).
6. C. De Jager, *Ann. de Geophys.* **11**, 1 (1955).
7. F. Jonson, J. Purcell, R. Tousey, *Bull. Amer. Phys. Soc.* **29**, № 4 (1954).
8. D. Stacey, G. Stith, R. Nidey, W. Pietenpol, *Electronics*, **27**, 149 (1954); R. Nidey, D. Stacey, *Rev. Sci. Instr.* **27**, 216 (1956).
9. W. Pietenpol, W. Rense, F. Walz, *Phys. Rev.* **90**, 156 (1953).
10. W. Rense, *Phys. Rev.* **91**, 299 (1953).
11. F. S. Jonson, J. Purcell, R. Tousey, *Bull. Amer. Phys. Soc.* **29**, № 4, 33 (1954); *Astronom. J.* **60**, 165 (1955).
12. S. Miller, R. Mercure, W. Rense, *Astrophys. J.* **124**, 580 (1956).
13. R. Mercure, S. Miller, W. Rense, F. Stuart, *J. Geophys. Res.* **61**, 571 (1956).
14. E. Bayram, T. Chubb, H. Friedman and N. Gailar, *Phys. Rev.* **91**, 1278 (1953).
15. E. Bayram, T. Chubb, H. Friedman and J. Kupperon, *JOSA* **46**, 384 (1956).
16. И. С. Шкловский, *Известия Кр. АО* **4**, 80 (1949); «Солнечная корона», Гостехиздат, 1951.
17. R. Athay and R. Thomas, *Astrophys. J.* **124**, 586 (1956).
18. E. Bayram, T. A. Chubb and H. Friedman, *J. Geophys. Res.* **61**, 251 (1956).
19. G. Elwert, *Zeits. f. Naturforsch.* **9a**, 637 (1954).
20. *Science* **124**, 673 (1956).
21. J. Kaplan and H. Odishaw, *Science* **122**, 1003 (1955).
22. R. Tousey, *JOS A* **47**, 261 (1957).
23. E. T. Byram, T. A. Chubb, H. Friedman, J. Kupperiah, *Astrophys. J.* **124**, 480 (1956).
24. Э. Р. Мустель, А. Б. Северный, *Известия Кр. А. О.* **8**, 19 (1956).