

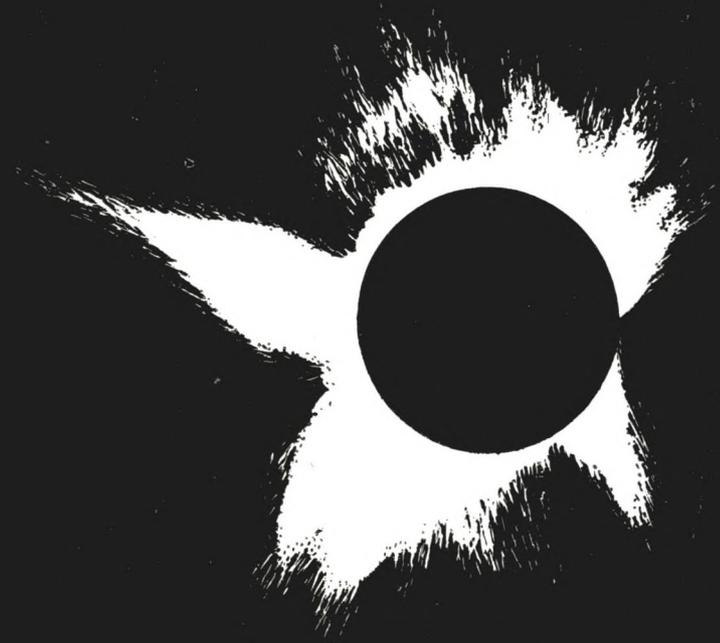
НОВОЕ  
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

2/1975

СЕРИЯ  
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

Г.М. Никольский  
СОЛНЕЧНАЯ  
КОРОНА  
И МЕЖ-  
ПЛАНЕТНОЕ  
ПРОСТРАНСТВО



**Г. М. Никольский,**  
доктор физико-математических наук

**СОЛНЕЧНАЯ  
КОРОНА  
И МЕЖПЛАНЕТНОЕ  
ПРОСТРАНСТВО**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»  
Москва 1975

**Никольский Г. М.**

**Н64** Солнечная корона и межпланетное пространство. М., «Знание», 1975.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 2. Издается ежемесячно с 1971 г.)

Явление солнечной короны — лучистого сияния, окружающего Солнце,— было известно с незапамятных времен. Однако лишь в последние годы, особенно в связи с космическими исследованиями, наши представления о физических условиях в короне обрели более конкретные очертания.

В данной брошюре популярно излагаются современные проблемы исследования солнечной короны и ее связь с межпланетным пространством.

20601

526

**Никольский Геннадий Михайлович**

**СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА  
И МЕЖПЛАНЕТНОЕ ПРОСТРАНСТВО**

Редактор Е. Ю. Ермаков  
Обложка Е. М. Матвеева  
Худож. редактор В. Н. Конюхов  
Техн. редактор Ф. Е. Ривилис  
Корректор О. Ю. Мигун

А 02402. Индекс заказа 54202. Сдано в набор 15/XI 1974 г. Подписано к печати 2/II 1975 г. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,54. Тираж 30 430 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 2206. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.  
Цена 11 коп.

© Издательство «Знание», 1975 г.

## Физические свойства солнечной короны

---

**Непрерывное излучение.** Явление солнечной короны (лучистого сияния, окружающего Солнце и видимого во время полных солнечных затмений) было известно давно. Однако лишь в XIX столетии было доказано, что это сияние связано с Солнцем<sup>1</sup>. К началу XX века стали известны следующие свойства излучения солнечной короны: 1) цвет солнечной короны близок к цвету Солнца; 2) в спектре короны отсутствуют темные (фраунгоферовы) линии поглощения, характерные для спектра Солнца; 3) излучение короны частично поляризовано, причем плоскость электрического вектора световых колебаний лежит в плоскости, перпендикулярной радиальным направлениям, проведенным из центра солнечного диска (подробно о поляризации короны будет рассказано в следующей главе).

В 1905 г. немецкий ученый М. Шварцшильд предположил, что свечение короны обусловлено рассеянием света фотосферы на свободных электронах, окружающих Солнце (независимо эту же гипотезу выдвинул американский ученый С. Митчелл). Такое предположение объясняло все известные к тому времени свойства непрерывного излучения короны. Действительно, рассеяние света на электронах происходит независимо от длины волны (цвета), и, таким образом, цвет короны мало отличается от солнечного. Далее, при температуре электронного

---

<sup>1</sup> Хотя еще Плутарх, наблюдая затмение 98 г. н. э., писал, что, когда Луна закрывает Солнце, становятся видны его другие части (т. е. корона). Существуют также указания на то, что один из крупнейших астрономов XI столетия — хорезмец Абу Райхан Бируни — высказывал гипотезу о принадлежности короны Солнцу, считая ее веществом, сгорающим в сфере огня, окружающей наше светило.

газа, большей  $5000^\circ$ , вследствие Доплер-эффекта, связанного с тепловым движением электронов, происходит «замывание» линий поглощения солнечного спектра, так что в спектре короны эти линии не наблюдаются. Наконец, поскольку способность электронов рассеивать свет зависит от угла между направлениями падающего и рассеянного света, излучение электронной короны должно быть поляризованным.

Однако корона из одних только электронов не могла бы существовать, так как электрические силы отталкивания между одноименно заряженными частицами (электронами) привели бы к рассеиванию электронного облака. Этого не происходит, если корона состоит из ионизованного газа, в котором часть или все электроны потеряли связь с ядрами атомов. При этом корона в целом будет электрически нейтральна, так как число отрицательных зарядов равно числу положительных. Газ в таком состоянии называется плазмой (термин введен в 1919 г. американским физиком Лэнгмюром). Вещество Солнца состоит главным образом (90%) из водорода, около 10% составляет гелий и лишь примерно 0,1% — более тяжелые элементы. Таким образом, плазма солнечной короны — это преимущественно электронно-протонный газ (атом водорода состоит из протона и электрона). Заметим, что способность протонов рассеивать свет весьма мала по сравнению с электронами.

В 1937 г. немецким астрофизиком С. Баумбахом было рассчитано объемное распределение электронов в солнечной короне. Во время ряда затмений были проведены измерения поверхностной яркости короны, и, чтобы вывести распределение электронов, необходимо было вычислить объемную излучательную способность короны, а также степень поляризации на различных расстояниях от центра Солнца. При этом Баумбах исходил из довольно грубых приближений: он считал корону сферически симметричным облаком, окружающим Солнце, а рассеивающую способность электронов — независимой от углов. Расчет показал, что для объяснения наблюдаемого свечения «основание» короны должно содержать около  $10^8$  электронов на кубический сантиметр.

Степень поляризации в зависимости от расстояния между центром Солнца и рассматриваемой точкой короны была рассчитана, конечно, с учетом угловой зависи-

мости рассеяния света на электронах. В дальнейшем распределение электронов в короне рассчитывалось более точно, но к этим работам мы обратимся несколько дальше.

**Излучение в линиях.** Итак, с непрерывным излучением дело обстояло удовлетворительно. Однако еще в 1869 г., когда 7 августа на территории США были удачно проведены наблюдения полного затмения Солнца, было сделано неожиданное открытие. По независимым наблюдениям Харкнесса и Юнга в спектре короны была обнаружена линия излучения с длиной волны 5303 Å. Эта зеленая линия не могла быть приписана никакому из известных элементов, поэтому считалось, что в короне содержится новый элемент — «короний». Нужно заметить, что за год до открытия зеленой корональной линии Жансен наблюдал в спектре протуберанца довольно яркую желтую линию (5876 Å), которую он приписал новому элементу — «гелию» («солнечному»). Впоследствии гелий был обнаружен на Земле и теперь широко применяется для различных прикладных целей. С развитием атомной физики и лабораторного спектрального анализа стали хорошо известны линии излучения достаточно распространенных химических элементов (в космических условиях обычно линии элементов не тяжелее железа). В Периодической таблице химических элементов Д. И. Менделеева<sup>1</sup> «не осталось» места для «корония». Между прочим, аналогичная картина создалась и с другим гипотетическим элементом — «небулием» (по выражению советского астрофизика И. С. Шкловского, «родным братом корония»), наблюдавшимся в спектрах далеких газовых туманностей. В 1927 г. загадка «небулия» была решена — линии излучения, приписываемые этому «элементу», оказались принадлежащими азоту и кислороду, находящимся в «необычных» условиях<sup>2</sup>. Но происхождение «корония» оставалось неясным.

В 1939 г. немецкий астрофизик В. Гротриан показал, что красная и инфракрасная линии «корония» 6374 Å и

---

<sup>1</sup> Периодическая система элементов была открыта Д. И. Менделеевым в том же году, в котором впервые наблюдался «короний».

<sup>2</sup> В газовых туманностях вещество крайне разрежено, и поэтому столкновения между атомами происходят редко, что приводит к излучению линий, которые в «обычных» условиях, т. е. при большей плотности вещества, не могут наблюдаться.

7892 Å могут излучаться 9- и 13-кратно ионизованным железом (принятые обозначения FeX, FeXIV, так как нейтральный атом железа обозначается FeI). Гротриан использовал экспериментальные результаты лабораторных исследований шведского ученого Б. Эдлена, который изучал линии высокоионизованных элементов в спектре конденсированной искры. В области мощной электрической искры достигается высокая температура, и наблюдаемое излучение в основном лежит в далекой ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра, недоступных наблюдениям в воздухе (поэтому Эдлен применял вакуумный спектрограф). В то время результаты Эдлена были уникальными; лишь спустя десятки лет развитие соответствующей техники позволило другим ученым повторить эксперименты Эдлена.

Ниже будут изложены некоторые сведения о спектрах атомов, и читатель, знакомый с основами спектрального анализа, может пропустить этот раздел.

**Теория спектров.** Согласно модели атома, предложенной Нильсом Бором, вокруг ядер, имеющих в зависимости от вида элемента различные положительные заряды и веса, по эллиптическим орбитам обращаются электроны. Атом, поглотивший энергию за счет соударения с другими частицами (с электронами процесс наиболее эффективен) или со световой частицей — квантом (фотоном), становится возбужденным. Это состояние характеризуется переходом на более удаленную орбиту. Возбужденный атом, как правило, «живет» недолго, обычно около стомиллионной доли секунды, переходя в первоначальное основное состояние. При этом спонтанном переходе излучается квант света, энергия которого определяется положением исходной и конечной орбит, или, как принято говорить, разностью энергий уровней атома.

Атомный переход может произойти и без излучения (такой переход называется вынужденным переходом или гашением возбуждения), если возбужденный атом вновь столкнется с частицей, например, со свободным электроном. Энергия возбуждения идет при этом на увеличение кинетической энергии свободной частицы. Существуют возбужденные состояния (орбиты электронов), в которых атом находится необычно долгое время (от долей секунды до часов и более). Такие состояния

называются метастабильными, а переход на любую более низкую орбиту — «запрещенным».

Согласно квантовой механике возбужденные состояния не могут характеризоваться любой энергией (или любой орбитой), а существуют определенные дискретные (квантовые) уровни. При этом разность энергий между соседними уровнями уменьшается по квадратичному закону по мере удаления от основной орбиты и стремится в пределе к нулю. Энергетическому уровню с номером «бесконечность» соответствует энергия, необходимая для ионизации атома,  $E_\infty$ . Если атом поглотит энергию, бóльшую  $E_\infty$ , то его электрон становится свободным (как говорят, «переходит в континуум»). В реальном случае число уровней ограничено, что связано с существованием ансамбля атомов, которые оказывают влияние друг на друга. Энергия  $E_\infty$  также называется потенциалом ионизации и чаще всего выражается в электрон-вольтах. Например, для того чтобы ионизовать невозмущенный атом водорода, ему нужно сообщить энергию в 13,6 эВ или более.

Каждый из возможных энергетических уровней характеризуется набором квантовых чисел, которым могут быть поставлены в соответствие механические характеристики в планетарной атомной модели Бора: 1) главное квантовое число  $n$ , определяющее энергию уровня, т. е. радиус орбиты; 2) азимутальное квантовое число  $l$ , характеризующее орбитальный момент движения электрона; 3) спиновый угловой момент  $s$ , обусловленный вращением электрона вокруг его «оси». В спектроскопии чаще употребляется полный угловой момент или внутреннее квантовое число  $j = l + s$ .

Существуют и другие квантовые числа, являющиеся производными перечисленных. Если на внешней орбите (уровне) находится не один электрон, а несколько, то характеристикой уровня в целом является сумма квантовых чисел всех электронов.

Квантовые числа выражаются в атомных единицах и представляют собой безразмерные величины, а для азимутального квантового числа используют буквы: значения  $l = 0, 1, 2, 3, 4...$  соответствуют  $s, p, d, f, g...$  (при этом буквы заменяются заглавными, если характеризуется уровень в целом, а не один электрон). Например, первый возбужденный уровень водорода  $2^2P_{3/2}$  расшифровывается так:  $n = 2, l = 1, j = 3/2$  ( $s = 1/2$ ). Знак

вверху слева характеризует число подуровней (мультиплетность), равное  $2s + 1$ .

Квантовые переходы между атомными уровнями с излучением происходят не во всех случаях. Существуют так называемые правила отбора, ограничивающие число возможных переходов. Для простой атомной системы переход возможен лишь в том случае, если изменение азимутального квантового числа есть  $\Delta l = \pm 1$ , а изменение внутреннего квантового числа —  $\Delta j = 0, \pm 1$ .

Вообще говоря, другие переходы возможны, но они будут происходить с очень малой вероятностью. В случае сложной атомной системы с большим количеством электронов, взаимодействующих между собой, правила отбора нарушаются или видоизменяются; например, запрещение так называемых «интеркомбинационных» переходов (между уровнями с различной мультиплетностью), довольно строго выполняющееся для гелия, нарушается для атома железа.

В одной из своих ранних работ А. Эйнштейн количественно рассмотрел переходы в ансамбле атомов. Он ввел вероятности переходов, теперь широко известные под названием эйнштейновских. Пусть в одном кубическом сантиметре содержится  $n$  атомов, имеющих возбужденное состояние «2» и основное «1». Число квантов с частотой  $\nu_{12}$ , излучаемых одним кубическим сантиметром за одну секунду, равно  $n_2 A_{21}$ , где  $A_{21}$  — эйнштейновская вероятность спонтанного перехода, а  $n_2$  — среднее число возбужденных атомов в  $1 \text{ см}^3$ .

Время «жизни» атома в возбужденном состоянии есть величина, обратная эйнштейновской вероятности. Простая аналогия позволяет понять смысл эйнштейновской вероятности. Пусть в городе с 7-миллионным населением ( $n$ )<sup>1</sup> средняя продолжительность жизни человека ( $\tau$ ) составляет 70 лет. В случае «равновесия» (население не меняется) ежегодно должно рождаться (и умирать)  $\Delta n$  человек, при этом  $\Delta n \cdot \tau = n$  (в данном примере  $\Delta n = 100$  тыс. человек).  $1/\tau$  есть эйнштейновская вероятность смерти (или для оптимистов — вероятность рождения.)

**Отождествление линий.** Эдлен, ознакомившись с работой Гротриана, занялся отождествлением других корональных линий. Для этой цели он использовал свои

---

<sup>1</sup> Часто для  $n$  употребляется термин «населенность».

результаты определения энергии различных уровней высокоионизованных атомов.

Вначале Эдлен нашел, что линии «корония» 3328 Å и 4086 Å излучаются в результате переходов Ca XII  $2^2P_{1/2} - 2^2P_{3/2}$  и  $2^3P_1 - 2^3P_2$  (упомянутые ранее отождествления Гротриана имеют следующую запись: линия 6374 Å соответствует переходу FeX  $3^2P_{1/2} - 3^2P_{3/2}$ , а линия 7892 Å — FeXIV  $3^3P_1 - 3^3P_2$ ). Все записанные здесь переходы «запрещены», так как они происходят между подуровнями одной и той же электронной конфигурации (и нарушается правило Лапорта<sup>1</sup>). Энергии аналогичных подуровней для низкоионизованных или нейтральных атомов весьма близки (и соответствующее излучение не попадает на оптический диапазон), но с ростом заряда ядра «расщепление» подуровней растет так, что излучаемая в результате перехода между подуровнями линия может оказаться в оптической области спектра (как и в рассматриваемом случае).

На основании этих четырех «прямых» отождествлений Эдлен заключил, что в короне следует ожидать присутствия ионов скорее более высоких стадий ионизации, чем FeX, так как три других иона имеют больший заряд ядра.

Разумеется, Эдлен не располагал экспериментальными данными об энергиях уровней всех подходящих для отождествления ионов. Такие ионы должны быть, во-первых, среди достаточно распространенных на Солнце элементов и, во-вторых, должны давать линии, попадающие в исследуемую область спектра.

Если расположить элементы, как в таблице Менделеева, по атомным номерам (по величине заряда ядра), и рассматривать в таком ряду ионы, стадия ионизации которых растет последовательно, получится изоэлектронный ряд, в котором электронная конфигурация будет сохраняться. Например, конфигурация  $3s^23p^2$  (главное квантовое число равно трем, имеются два электрона с

---

<sup>1</sup> Правило отбора Лапорта гласит: переходы могут осуществляться только между «четным» и «нечетным» уровнями. Четность определяется значением суммы орбитальных моментов всех электронов, относящихся к конфигурации уровня. В спектроскопии четные уровни обозначаются значком «о», стоящим справа сверху у буквы. Например,  $2^oP_{3/2}$  — четный уровень. Если уровень нечетный, то знак отсутствует. Часто в записи переходов значок четности опускают.

азимутальным квантовым числом  $l = 0$  и два — с  $l = 1$ ) сохраняется вдоль ряда: Si, Cl II, ..., FeXI, CoXII, NiXIII, ... Эдлену пришлось проделать кропотливую работу по экстраполяции энергий уровней вдоль изоэлектронных рядов. В частности, Эдлен, имея экспериментальные данные об энергии уровней  $3^3P_2$ ,  $3^3P_1$  и  $1D_2$ , для ионов более низких стадий ионизации, чем FeXI, нашел, что переход  $3^3P_2 - 3^3P_1$  дает наблюдаемую линию NiXIII 5116 Å, а  $1D_2 - 3^3P_1$  дает FeXI 3987 Å и NiXIII 3643 Å. Таким же образом Эдленом при рассмотрении других изоэлектронных последовательностей были отождествлены 19 корональных линий из 24, уверенно наблюдаемых к тому времени. Было установлено в короне существование ионов железа, никеля, кальция и аргона, находящихся в исключительно высоких стадиях ионизации.

Эдлен вычислил эйнштейновские вероятности переходов, дающих корональные линии: они оказались в сотни тысяч раз меньше, чем для «разрешенных» переходов, т. е. время «жизни» возбужденного коронального иона составляет 0,001—0,1 с. Возбуждение корональных линий, как было показано Эдленом, происходит в основном за счет столкновений ионов с электронами, т. е., как говорят, возбуждение осуществляется «электронным ударом». Лишь на значительном удалении (около одного солнечного радиуса) от поверхности Солнца — фотосферы — возбуждение уже обусловлено поглощением соответствующих квантов излучения.

Отождествление корональных линий, указывающее на высокую степень ионизации, свидетельствовало о том, что температура короны может быть очень высока: в экспериментах Эдлена температура конденсированной искры, где образовывались ионы FeX, FeXI, приближалась к миллиону градусов. Это заставило астрофизиков по-новому решать проблему короны, и прежде всего вопрос о происхождении высокой ионизации тяжелых элементов в короне.

Такая задача была решена в 1945 г. И. С. Шкловским<sup>1</sup>, доказавшим, что при высокой электронной температуре (около  $10^6$  и более градусов) наблюдаемое количество ионов в короне обусловлено двумя процесса-

---

<sup>1</sup> Независимо и почти одновременно аналогичная работа проделана английскими астрофизиками Алленом и Вулли.

ми: ионизацией «электронным ударом» (т. е. столкновением атома с электроном, обладающим энергией движения, большей  $E_{\infty}$ ) и захватом свободного электрона ионом с последующим излучением (фоторекомбинацией). При этом степень ионизации, т. е. отношение концентраций иона и суммы всех атомов данного элемента, не зависит от электронной концентрации. Шкловский проанализировал различные наблюдательные данные и доказал, что они с необходимостью приводят к представлению о короне как об электронно-протонной плазме исключительно высокой температуры, равной в среднем 1,5 млн. градусов. Однако допускается, что различные области короны имеют неодинаковую температуру. Например, области свечения красной линии FeX имеют температуру меньше миллиона градусов, области, где излучается зеленая линия иона FeXIV,—больше миллиона градусов, а «желтые» области (свечения иона CaXV) нагреты до 3—5 млн. градусов.

Результат теоретического анализа условий в короне был настолько неожиданным, что некоторые из специалистов, даже 10 лет спустя после описываемых работ, серьезно продолжали обсуждать вопрос о «холодной» короне с температурой около  $10\,000^{\circ}$ .

Впоследствии теория «горячей» короны нашла неоспоримое подтверждение в ряде новых данных наблюдений. Прежде чем перейти к их описанию, упомянем о радиоизлучении Солнца, открытом в 1942 г. англичанином Хеем в метровом диапазоне и в 1945 г. американцами Саусвортом и Рёбером — в сантиметровом диапазоне длин волн. Оказалось, что радиоизлучение Солнца состоит из мало меняющейся («спокойной») составляющей и всплесков — быстрых и интенсивных изменений излучения. «Спокойная» тепловая составляющая радиоизлучения может быть понята только при условии высокой (около  $10^6$  градусов) температуры короны. Теория солнечного радиоизлучения независимо была развита в работах советских ученых И. С. Шкловского, В. Л. Гинзбурга и австралийца Мартина.

**Жесткое излучение короны.** Во время второй мировой войны в руки американцев попало значительное количество довольно мощных для того времени немецких ракет «Фау-2». Вскоре после войны эти ракеты использовались американскими исследователями для запуска спектральной аппаратуры в верхние слои земной

атмосферы. Дело в том, что излучение с длинами волн короче 2900 Å (ультрафиолетовый, рентгеновский и гамма-диапазоны спектра) поглощается в земной атмосфере на высотах от 20 км и выше. В 1952 г. сотрудники Колорадского университета, используя «Фау-2», получили первый спектр Солнца в области длин волн 2500—1200 Å. Дальнейшие запуски ракет с более совершенной аппаратурой позволили «продвинуться» в еще более коротковолновую область спектра.

В результате этих исследований были получены следующие данные. В районе длин волн 1500—2000 Å яркость непрерывного спектра Солнца с темными фраунгоферовыми линиями начинает быстро падать, и становятся отчетливо видимыми светлые линии излучения. Самая яркая линия во всей области спектра с длинами волн короче указанной границы — линия водорода Лайман-альфа — резонансная линия, возникающая при переходе атома из первого возбужденного состояния в основное. В области с длинами волн короче 1000 Å спектр почти полностью состоит из линий излучения, причем суммарная яркость этих линий превосходит излучение абсолютно черного тела при температуре 6000°, которым удовлетворительно описывается наблюдаемое распределение энергии в спектре Солнца для длин волн, больших 1000—2000 Å.

Этот «избыток» излучения в области около 700 Å уже становится 1000-кратным и быстро растет для более коротких длин волн. При этом заметим, что наблюдаемое излучение Солнца в крайней ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра ничего общего не имеет с непрерывным спектром видимой и ультрафиолетовой областей, так как оно состоит из множества линий излучения, «затмевающих» непрерывный спектр.

Еще в 1945 г. Шкловский показал, что наблюдаемое излучение короны в коротковолновой области спектра является следствием ее высокой температуры. В частности, им были указаны конкретные линии, которые должны излучаться короной в этой области спектра MgX (610 и 625 Å), NeVIII (770 и 780 Å). Затем последовали работы И. С. Шкловского (1949 г.) и немецкого астрофизика Г. Эльверта (1952 и 1954 гг.), в которых развивалась более подробная теория излучения короной в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах спектра.

Основные положения этой теории подтвердились

дальнейшими ракетными спектральными измерениями. Было зарегистрировано в коротковолновом спектре излучения Солнца множество линий, и самые яркие из них отождествили с линиями «разрешенных» переходов высокоионизованных элементов, существование которых допускалось в короне. К 1970 г. число линий, обнаруженных в коротковолновой области спектра, достигло нескольких сотен. Перед учеными встала задача осуществить как можно более полное отождествление всех этих линий. Она была выполнена автором совместно с Г. С. Ивановым-Холодным. Ими на основании известных наблюдаемых энергий излучения ряда уверенно отождествленных линий были предсказаны энергии и длины волн более 1000 линий, излучаемых 146 ионами 21 химического элемента.

Сравнивая наблюдаемые величины энергий и длин волн с предсказанными, эти авторы смогли отождествить 400 линий из 450 наблюдаемых в области спектра 10—1200 Å<sup>1</sup>. Оказалось, что значительная часть линий излучается так называемой «переходной» областью между короной и хромосферой. Эта область солнечной атмосферы характерна быстрым ростом температуры от 10 000 до 1 000 000° при относительно малой толщине этой области (в несколько тысяч километров, или около 0,01 солнечного радиуса).

Несмотря на то, что в коротковолновой области спектра Солнце излучает весьма малую долю энергии (около 10<sup>-10</sup>) от полной энергии излучения Солнца, жесткая радиация играет определяющую роль в формировании земной ионосферы. Существование земной ионосферы — электропроводящей части верхней атмосферы Земли — было обнаружено в 1925 г. посредством регистрации отраженного от этих частей радиосигнала. Ионосфера занимает обширную область от высот примерно 100 км до 500 км и представляет собой слабоионизованную плазму. Исследования ионосферы имеют существенное прикладное значение, так как дальняя радиосвязь на коротких волнах целиком определяется отражениями последних от ионосферы, меняющей свои свойства. Эти свойства зависят не только от географических факторов, но и от сильно изменяющихся спек-

---

<sup>1</sup> Почти все эти отождествления были подтверждены другими исследователями.

трального состава и интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучений Солнца. Жесткое излучение короны и переходной области в значительной мере влияет также на нижние слои солнечной атмосферы — хромосферу и на относительно холодные ( $T \leq 10\,000^\circ$ ) облака газа — протуберанцы, появляющиеся в короне<sup>1</sup>.

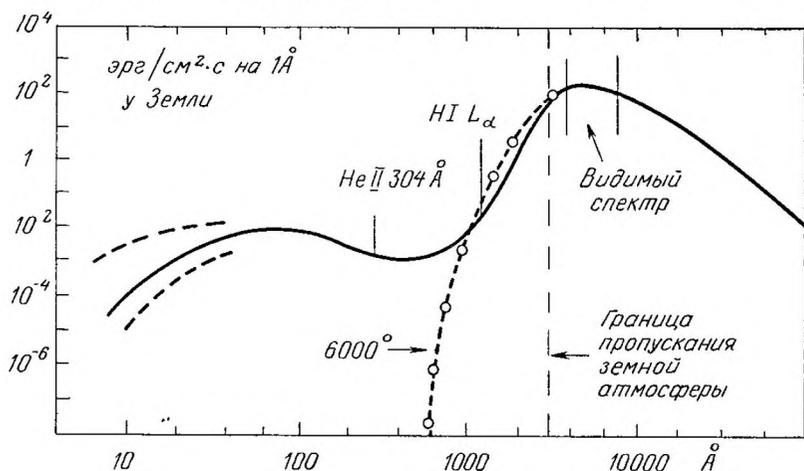


Рис. 1. Распределение энергии в спектре Солнца от рентгеновских лучей до далеких инфракрасных. По оси ординат отложен логарифмический масштаб потока энергии вблизи Земли. В рентгеновской области пунктиром показаны возможные изменения потока с активностью Солнца.

На рис. 1 приведено распределение энергии в спектре Солнца от рентгеновской до далекой инфракрасной области. Энергия выражена в единицах эрг/см<sup>2</sup>с на расстоянии Земли от Солнца и в расчете на интервал длин волн 1 Å. Для длин волн короче 1000 Å даны средние величины, приходящиеся на 1 Å, поскольку спектр в этой области, как известно, состоит из узких линий. Пунктирной линией с кружочками дано распределение энергии для абсолютно черного тела при  $T \approx 6000^\circ$ . Масштаб по обеим осям — логарифмический. Коротковолновое излучение, в особенности, испускаемое ионами

<sup>1</sup> Еще в 1945 г. И. С. Шкловский рассматривал вопрос о воздействии жесткой радиации короны на протуберанцы и хромосферу, сделав вывод о важной роли в их ионизации радиации короны. Лишь 20 лет спустя этот вопрос вновь был пересмотрен различными авторами, подтвердившими точку зрения Шкловского.

высоких стадий ионизации, исходит из активных областей на Солнце. Поэтому фотографии Солнца, полученные в крайней ультрафиолетовой или в рентгеновской областях, выглядят как несколько ярких пятен на слабо светящемся диске, который окружен неоднородным кольцом. С активностью Солнца энергия коротковолнового излучения меняется тем значительнее, чем горячее испускающие ее области. В табл. 1 даны величины коротковолновой энергии, излучаемой различными слоями солнечной атмосферы, и указаны пределы изменения этих величин в зависимости от активности Солнца.

Таблица 1  
Энергия коротковолнового излучения различных областей Солнца в зависимости от солнечной активности (по данным автора и Иванова-Холодного)

Область солнечной атмосферы	Температура, град.	Вклад в излучение < 1000 Å		Амплитуда изменения энергии излучения $E_{\max} / E_{\min}$	Контраст излучения активных и спокойных областей на Солнце, относительные единицы
		Максимум активности	Минимум активности		
Корона	$> 6 \cdot 10^5$	35%	65%	7	20
Переходная область	$6 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^4$	40 »	25 »	2	5
Хромосфера	$< 3 \cdot 10^4$	25 »	10 »	1,3	2
Вся солнечная атмосфера на расстоянии Земли		2,5 эрг/см <sup>2</sup> с	8 эрг/см <sup>2</sup> с	3	8

**Химический состав.** Рассмотрим вопрос о химическом составе солнечной короны. Существуют предположения, что в различных слоях солнечной атмосферы химический состав несколько различен в количественном отношении. Однако веских аргументов в пользу этих соображений нет. Вернее, с той точностью, с какой мы в состоянии определить содержание<sup>1</sup> того или иного элемента, разумно считать, что таких различий нет.

<sup>1</sup> Содержание какого-либо элемента обычно выражается по отношению к водороду (по числу частиц).

После отождествления Эдленом корональных линий стал возможным количественный химический анализ короны. В 1945 г. И. С. Шкловским и Кун-Хуангом были независимо определены содержания элементов, излучающих корональные линии. В условиях короны почти все ионы находятся в своих основных энергетических состояниях, поэтому, зная энергию, излучаемую ионом в линии, и вероятность ее возбуждения электронным ударом, можно определить концентрацию ионов. Используя это, Шкловский показал, что содержание железа, никеля и кальция в короне такое же, как и в нижних слоях солнечной атмосферы.

После открытия коротковолнового излучения Солнца стало возможным определение более точного химического состава короны. Автор и Г. С. Иванов-Холодный в 1961—1962 гг. определили содержание азота и железа, которое оказалось заметно отличающимся от принятых до того значений. Дело в том, что существующие методы определения химического состава Солнца основываются на анализе фраунгоферовых линий, обычно не связанных с основным энергетическим уровнем, на котором находится определяющее большинство рассматриваемых атомов. Кроме того, вычисление перехода от возбужденного уровня к основному дает весьма приближенный результат вследствие неточности в определении температуры. Однако для любых элементов могут быть найдены коротковолновые резонансные линии (переход между основным и ближайшим к нему энергетическими уровнями). Для вычисления этих переходов существует относительно простая теория, которая дает более точные результаты. При этом излучение в коротковолновых линиях исходит из оптически тонкого слоя (т. е. среда прозрачна для собственной радиации). Таким образом, не требуется производить учет поглощения излучения, который приводит к значительным ошибкам при использовании фраунгоферовых линий.

Дальнейшему определению химического состава короны с использованием коротковолновых резонансных линий были посвящены работы автора, а также американских ученых С. Потташа, Дж. Висбро, К. Джордан и других. В частности, они показали, что железа в короне примерно в 10 раз больше, чем в фотосфере (по оценкам, полученным по фраунгоферовым линиям).

В связи с этим Потташ предположил, что корона обо-

гащена тяжелыми элементами за счет захвата метеоритных частиц межпланетного пространства. Однако Ван де Холст показал, что из-за существования постоянного истечения газа короны наружу проникновение метеоритных частиц в нижние слои короны практически исключено, так как этот поток газа должен «выметать» ве-

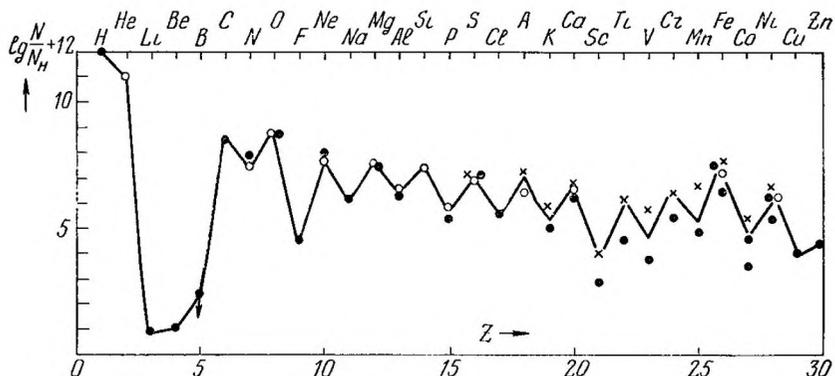


Рис. 2. Содержание химических элементов в солнечной атмосфере. По оси ординат — логарифм отношения числа атомов элемента к числу атомов водорода ( $\lg N = 12$ ). Светлые кружки — определения (по ракетным наблюдениям) коротковолновых линий излучения короны и переходной области между короной и хромосферой. Темные кружки — определения (по наземным наблюдениям) спектра Солнца с фраунгоферовыми линиями поглощения. Крестики — определения (по наземным наблюдениям) линий излучения короны и хромосферы. По оси абсцисс — порядковые номера элементов. Для бора определена лишь верхняя граница содержания. Обращает на себя внимание более высокое содержание элементов с четными номерами по сравнению с соседними элементами, имеющими нечетные номера. Это обстоятельство, по мнению некоторых специалистов, связано с первоначальным образованием элементов во Вселенной. Если не принимать во внимание резкий провал в области Li, Be, B и колебаний от четного к нечетному номеру, то в среднем, с ростом номера, содержание элементов падает по экспоненте, на фоне которой выделяется повышенное содержание элементов группы железа

шество испаряющихся метеоритов. Более тщательные определения содержания железа в фотосфере впоследствии показали, что прежние оценки значительно занижали величину содержания элементов. На рис. 2 показана диаграмма, иллюстрирующая содержание элементов в солнечной атмосфере. Ракетные наблюдения коротковолнового спектра позволили установить ряд интересных фактов. Оказалось, что азота на Солнце в 5—10 раз

меньше, чем принималось ранее, а железа в 10 раз больше. Впервые в солнечной атмосфере было определено содержание неона, не дающего достаточно интенсивных линий, лежащих в видимой области спектра. Коротковолновые измерения показали, что неона примерно столько же, сколько железа.

Анализ коротковолнового спектра позволил определить содержание 14 элементов с точностью, превосходящей точность предшествующих измерений.

**Причины образования короны.** После знакомства с необычными физическими условиями в короне у читателя возникает естественный вопрос: каково происхождение короны, как могло получиться, чтобы Солнце с температурой поверхности около  $6000^\circ$  имело внешнюю атмосферу, температура которой достигает в среднем миллиона градусов, а в некоторых активных областях и существенно больше?

Прежде чем перейти к этому вопросу, познакомимся с определением физической характеристики — температуры. Существует ряд различных видов температуры. Для короны наиболее существенны два вида: 1) цветовая и 2) кинетическая.

Цветовая температура характеризуется распределением энергии в спектре (по длинам волн). Как уже упоминалось, в видимой области спектра распределение энергии излучения короны подобно солнечному, поэтому цветовая температура короны близка к  $6000^\circ$  (в крайнем ультрафиолетовом и радио-диапазонах существуют сильные отклонения от этого значения).

Кинетическая температура является мерой энергии движения частиц. Если рассматривать газ в достаточно большом объеме, таком, чтобы частица не могла пролететь от одной его границы до другой, не испытав соударения с остальными частицами, то тогда в этом объеме установится некоторое распределение частиц по скоростям, называемое максвелловским. При этом различные направления скоростей будут равновероятны, и наибольшее количество частиц будет обладать скоростями, близкими к средней величине  $v_0$ , однозначно связанной с массой частицы  $m$  и температурой  $T$ :  $mv_0^2 = 3kT$  для одноатомного газа ( $k$  — атомная постоянная Больцмана). Частицы с другими скоростями встречаются тем реже, чем сильнее различие между их скоростью и  $v_0$ .

Расчеты показывают, что максвелловское распреде-

ление устанавливается после нескольких соударений между частицами. Для короны, имеющей в среднем температуру  $1,5 \cdot 10^6$  градусов, средние скорости электронов и протонов будут равны соответственно 10 000 и 300 км/с.

Еще в начале XX столетия, благодаря работам теоретиков Эмдена, Милна, Эддингтона, строение недр Солнца стало более или менее понятным. В центральной части Солнца, где температура достигает более 10 млн. градусов, а плотность составляет примерно  $100 \text{ г/см}^3$ , должно выделяться большое количество энергии. Теперь известно, что источником этой энергии является ядерный синтез гелия из водорода (этот синтез — «протон-протонная» реакция — происходит и при взрыве водородной бомбы). В этом процессе энергия производится в виде очень «жестких» квантов (гамма-излучения), которые не могут выйти наружу из Солнца по причине сильной непрозрачности слоев для гамма-квантов. В результате поглощения гамма-квантов эта энергия переизлучается в виде все более «мягких» квантов и выходит по мере удаления от центра Солнца как наблюдаемое нами излучение с «чернотельной» температурой в  $6000^\circ$ . Часть энергии идет на образование «конвективной зоны» — относительно неглубоко расположенного слоя под фотосферой, сравнительно тонкого, в котором хаотически движутся сгустки плазмы. Конвективная зона является генератором волн сжатия и разрежения («акустических» волн), которые и переносят энергию в корону. Поток этой энергии «подогревает» корону примерно так же, как подогревается вода в чайнике, стоящем на электрической плите. Но в случае солнечной короны мы не знаем механизма передачи энергии в корону, при этом нет уверенности даже в том, что именно конвективная зона является источником тепла<sup>1</sup>. Однако есть и важное сходство, на которое указал советский астрофизик С. Б. Пикельнер. Температура нагреваемой воды не мо-

---

<sup>1</sup> Недавно московский астрофизик Ю. Д. Жугжда, специалист в области волновых процессов на Солнце, пришел к выводу о том, что в условиях солнечной плазмы, сквозь которую проходит лучистая энергия, волны определенного вида не затухают, а растут. Это означает, что и в отсутствие конвективной зоны могут возникать колебания плотности, которые и будут являться источником нагревания короны. Последнее подтверждается оценками энергии, переносимой этими колебаниями.

жет превысить значения  $100^{\circ}\text{C}$  при нормальном атмосферном давлении. Точно так же средняя температура короны не может превысить некоторого предела, определяемого «параболической скоростью» частиц вблизи Солнца (т. е. скоростью ускользания из сферы притяжения Солнца). Таким образом, роль атмосферного давления в случае короны играет сила тяжести.

Представим себе, что первоначально холодный газ короны начинает нагреваться потоком энергии из фотосферы. Тогда кинетическая температура короны начнет расти<sup>1</sup> и достигнет величины, при которой заметная доля всех протонов будет обладать скоростями, превосходящими параболическую. Корона начнет «кипеть», т. е. самые быстрые частицы покинут корону и тем самым охладят ее (тепловая диссипация). Таким образом, будет иметь место «термостатирование» короны (т. е. сохранение постоянного значения ее температуры).

Теория тепловой диссипации короны была развита С. Б. Пикельнером еще в 1950 г. Пикельнер оценил также температуры корон у других звезд, имеющих различные массы и радиусы. Оказалось, что самыми «горячими» коронами со средней температурой 2—3 млн. градусов обладают голубые гигантские звезды спектрального класса В, а «холодными» коронами (температура около 100 тыс. градусов) — красные сверхгиганты класса К.

Вышеприведенные рассуждения о термостатировании несколько упрощены. Например, нельзя вычислить температуру короны, полагая энергию протона (улетающего с параболической или большей скоростью) равной средней тепловой энергии. В этом случае «кипение» короны было бы слишком «бурным». Процесс термостатирования, как он рассматривался Пикельнером, сводится к тому, что равновесное максвелловское распределение по скоростям практически не нарушается, т. е. диссипирующие частицы не успевают его исказить. Кроме того, при температуре более миллиона градусов почти все электроны будут иметь скорости, большие параболической, которая вблизи фотосферы составляет 700 км/с. Однако это не означает, что электроны покинут корону и она будет состоять из протонного газа. Действительно,

---

<sup>1</sup> Этот рост будет несколько замедлен вследствие потерь энергии на излучение короны в линиях и в радиодиапазоне.

электронам легче покинуть корону (как говорят физики, они обладают большей подвижностью), но при этом в короне появится положительный электрический заряд, который будет затруднять вылет электронов и облегчать вылет протонов.

Процесс термостатирования эффективно действует во внешних областях короны, но при возникновении «перегрева» в какой-либо области внутренней короны нагреются благодаря теплопроводности внешние слои, и диссипация там резко возрастет. Правда, в отдельных активных областях, занимающих малую часть объема внутренней короны, температура достигает, как показывают ракетные наблюдения рентгеновского излучения, весьма больших величин, до 10 млн. градусов. Эти области нестационарны; чаще всего они связаны с внезапными кратковременными выделениями энергии на Солнце — хромосферными вспышками. Их охлаждение происходит в основном за счет излучения, так как процессу теплопроводности, связанному с переносом вещества, мешает магнитное поле, имеющее замкнутую конфигурацию (типа поля обычного подковообразного магнита).

**Температура корональных областей.** Мы уже упоминали о том, что различные области короны имеют, вообще говоря, разные температуры (например, «красные», «зеленые» области, т. е. области свечения соответствующих линий). Гипотеза о существовании разнотемпературных областей в короне была выдвинута и обоснована еще в 1950 г. И. С. Шкловским. Нужно отметить, что кривая зависимости степени ионизации от температуры имеет острый максимум (это следует из теории ионизации короны). Например, согласно расчетам автора, для области излучения зеленой линии (ион  $\text{FeXIV}$ ) ионизационная температура (электронная температура, соответствующая максимуму степени ионизации) равна 1,3 млн. градусов, тогда как при температурах 0,8 или 1,8 млн. градусов ионов  $\text{FeXIV}$  было бы в 10 раз меньше, и зеленая линия практически отсутствовала бы. Отсюда следует, что свечение линии определенного иона в некоторой области короны указывает на то, что электронная температура этой области весьма близка к ионизационной.

Для примера в табл. 2 приводятся значения иони-

зационных температур для разных корональных ионов (по расчетам автора).

Таблица 2

Ионизационные температуры ионов железа, никеля и кальция

Ион	FeX	FeXI	NiXII	FeXIV	NiXV	CaXII	CaXIII	CaXV
$T \cdot 10^{-6}$ град.	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	2,0	2,6	3,5

Смежные в этой таблице ионы, очевидно, еще могут светиться в одной и той же области короны, но ионы, взятые через один столбец, при одинаковой температуре не могут существовать в достаточном количестве для наблюдения их излучения.

Экспериментальным подтверждением теоретических заключений служат наблюдения, показывающие отчетливое различие деталей короны в излучении отдельных линий, а также эмпирическая классификация линий, проведенная Г. А. Шайном и, независимо, Б. Лио и А. Дольфюссом по распределению областей свечений в короне и изменению его со временем.

В табл. 3 приводится классификация корональных ионов с указанием граничных значений электронных температур (согласно расчетам автора).

Таблица 3

Классификация корональных ионов

№ группы	$T_1$	$T_2$	Ионы (в скобках ионы, попадающие на «стыки» групп)
	млн. град.		
I	0,6	1,1	FeX, FeXI, NiXII, (FeXIII)
II	1,1	2,0	NiXIII, FeXIV, FeXV, NiXV, NiXVI (FeXIII), (CaXII)
III	2,0	3,6	CaXIII, ArXIV, CaXV (CaXII)

Каким образом существуют в тесном соседстве области с различными температурами? По оценкам И. С. Шкловского, «красная» область, существующая рядом с «зеленой», должна прогреться за несколько часов.

Он же указал в 1951 г. на возможность «теплоизоляции» магнитным полем, которое в условиях короны, будучи даже слабым, препятствует диффузии вещества поперек силовых линий. В настоящее время это объяснение сосуществования разнотемпературных областей, а также областей со значительно отличающимися плотностями вещества, является общепринятым.

В заключение этой главы рассмотрим вопрос о ионной температуре. Корональные линии вследствие эффекта Доплера, связанного с тепловым движением излучающих их ионов, должны быть широкими. По измеренной ширине этих линий можно вычислить ионную температуру, если известна масса иона. Например, у зеленой линии FeXIV ширина составляет в среднем около 0,9 Å, откуда следует, что ионная температура области излучения равна 2,5 млн. градусов. Вспомним, что электронная температура «зеленой» области близка к 1,3 млн. градусов.

Такое различие представляется нереальным, так как за счет столкновений более легких электронов с ионами электронная и ионная температуры очень быстро становятся одинаковыми. Следовательно, существует еще и другой механизм расширения корональных линий, действующий наряду с термическим. Действительно, в солнечной атмосфере, как известно, имеются хаотические движения сгустков вещества, часто называемые «турбулентными» движениями. Они в том случае, если луч зрения пересекает достаточное число сгустков, будут так же расширять корональную линию, как и тепловые.

Расчеты, выполненные автором, показывают, что наблюдаемые средние ширины красной и зеленой линий удовлетворительно объясняются их свечением при ионизационной температуре (равной ионной) в 0,6 и 1,3 млн. градусов и «турбулентной» скорости около 20 км/с.

## **Фраунгоферова составляющая короны и зодиакальный свет**

---

Две составляющие непрерывного излучения короны. В 1922 г. на спектрограмме короны, полученной во время затмения американским физиком Шарлоттой Мур, были обнаружены темные (фраунгоферовы) линии по-

глощения. Линии присутствовали в спектрах средней и внешней частей короны, начиная с расстояния в 0,5 солнечного радиуса от края Солнца.

Спустя 12 лет Гротриан детально исследовал спектр затмения 1922 г. и выделил в непрерывном спектре короны две составляющие:  $K$ -компоненту, не содержащую линии поглощения, и  $F$ -компоненту, в которой линии поглощения имеют точно такую же интенсивность, т. е. такую же глубину, как и в спектре фотосферы<sup>1</sup>. Яркость  $F$ -компоненты убывает с удалением от Солнца значительно медленнее, чем  $K$ -компоненты, поэтому с приближением к Солнцу (во внутренней короне) относительная яркость  $F$ -компоненты мала (около 0,1 от яркости  $K$ -компоненты) и линии поглощения практически отсутствуют. А на расстоянии в один солнечный радиус от края Солнца яркости  $K$ - и  $F$ -компонент примерно равны. Ход яркости  $F$ - и  $K$ -компонент, выраженный в единицах яркости солнечного диска, показан на рис. 3.

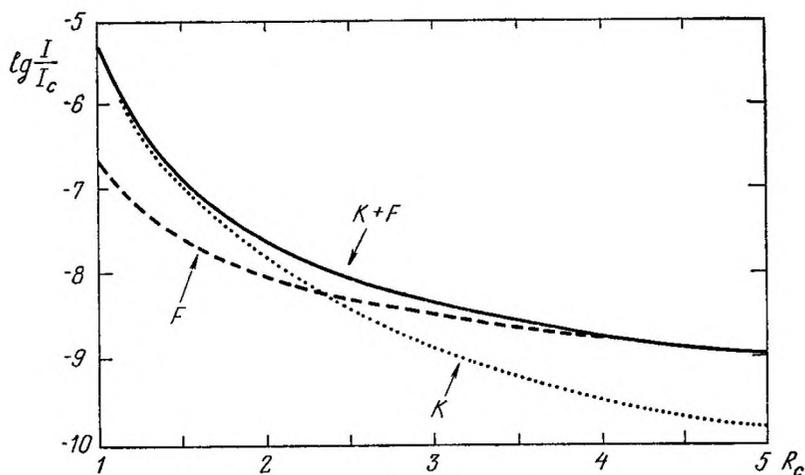


Рис. 3. Различные составляющие в короне (согласно Ван де Холсту). Идеализированная (сферически симметричная) модель короны эпохи максимума солнечной активности. По оси ординат отложена поверхностная яркость по отношению к яркости солнечного диска (в логарифмическом масштабе).  $K$ -компонента обусловлена рассеянием на электронах короны,  $F$ -компонента — дифракцией солнечного света на межпланетной пыли.  $K+F$  — суммарное наблюдаемое излучение.

<sup>1</sup> В 1931 г. Г. А. Тихов выделил из свечения короны еще «сферическую» составляющую, яркость которой не зависела от позиционного угла и менялась только с расстоянием от Солнца

Оказалось, что чисто эмпирическое деление спектра на две компоненты имеет и более глубокий физический смысл. *K*-компонента определяет структуру короны — это свечение собственно короны, состоящей из электронно-протонной плазмы. С основными особенностями *K*-составляющей мы знакомы по предыдущей главе.

Решение вопроса о происхождении *F*-компоненты было найдено независимо Алленом и Ван де Холстом в 1946—1947 гг. Ими было показано, что *F*-компонента физически не связана с короной, а образуется благодаря рассеянию солнечного света на межпланетной пыли, находящейся на большом линейном расстоянии от Солнца. Возникающее таким образом свечение проецируется в область излучения самой короны. Последнее связано с особенностью рассеивания пылинок: наибольшее количество света рассеивается ими при углах рассеяния, близких к  $180^\circ$  (рис. 4).

При этом на пылинках малых размеров (0,1—0,001 мм и меньше) происходит дифракция света<sup>1</sup>. О размерах частиц можно судить по отличию цвета *F*-компоненты от солнечного: если частицы имеют размеры, бóльшие 0,01 мм, то должно наблюдаться «покраснение», а в противном случае — «посинение» излучения *F*-компо-

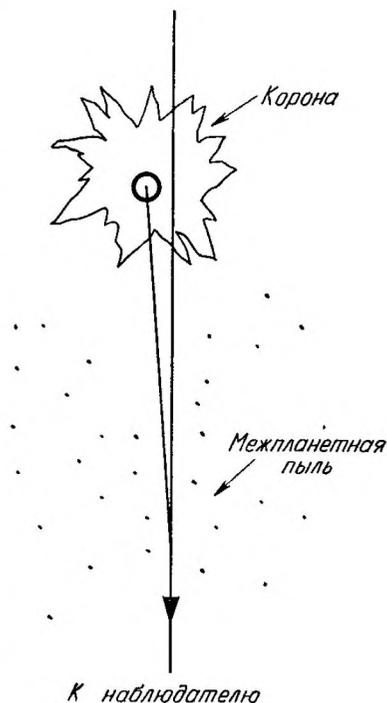


Рис. 4. Образование *F*-составляющей короны (дифракция солнечного света на межпланетной пыли). Основной вклад дают пылинки, расположенные между Солнцем и наблюдателем.

<sup>1</sup> Это явление, выражающееся в способности света отклоняться от первоначального направления, огибая препятствия, связано с волновой природой света.

ненты по сравнению с солнечным светом. Так как цвет  $F$ -компоненты практически не отличается от солнечного, то это говорит о том, что средние размеры частиц составляют около 0,01 мм.

Расчеты показывают, что для обеспечения наблюдаемой яркости  $F$ -компоненты достаточно, чтобы в межпланетном пространстве находилось несколько десятков пылинок в одном кубическом километре. При этом пыль не может находиться вблизи Солнца, так как уже при расстояниях в 5—10 солнечных радиусов пылинки нагреваются до температуры испарения.

**Связь короны и зодиакального света.**  $F$ -компоненту и Аллен, и Ван де Холст связывали с уже давно известным явлением — зодиакальным светом. Зодиакальный свет можно наблюдать ночью при хороших атмосферных условиях в виде слабо светящейся полосы, вытянутой вдоль эклиптики<sup>1</sup>. Яркость зодиакального света падает с удалением от Солнца, и он виден как «язык» — полоса, расширяющаяся к горизонту. В средних географических широтах Северного полушария зодиакальный свет лучше всего наблюдать весной после захода Солнца или осенью перед восходом (восточная и западная ветви зодиакального света). Яркость зодиакального света очень мала: на угловом расстоянии в  $50^\circ$  от Солнца он всего лишь в 2—3 раза ярче темного ночного неба и примерно в миллион раз слабее яркости солнечной короны (и в  $10^{12}$  слабее Солнца).

Ван де Холст и Аллен теоретически обосновали наличие связи внешней короны с зодиакальным светом, но для экспериментального обоснования необходимо было провести исследование и сопоставление распределений яркости областей внешней короны и внутренних (ближайших к Солнцу) районов зодиакального света. Проведение таких наблюдений — весьма трудная задача. Дело в том, что яркость неба во время полных солнечных затмений значительна, и на расстоянии в 10 солнечных радиусов ( $2,5^\circ$ ) от Солнца яркость короны примерно в 10 раз слабее неба; зодиакальный свет обычно не удается наблюдать ближе чем на угловых расстоя-

---

<sup>1</sup> Линия, вдоль которой Солнце в течение года совершает замкнутый путь среди звезд. Она пересекает зодиакальные созвездия. Это название происходит от греческого «зоон» («животные»), что связано с обозначениями созвездий: Телец, Овен, Рыбы и т. д.

ниях около  $30^\circ$  от Солнца, так как наблюдения возможны при полном наступлении сумерек, когда Солнце погружается больше чем на  $20^\circ$  под горизонт.

Во время затмения 25 февраля 1952 г. французский астрофизик Р. Мишар измерил яркость короны до 28 и поляризацию до 10 солнечных радиусов от Солнца. В измерениях яркости короны рекордных расстояний достиг английский исследователь Д. Блэквелл, наблюдая затмение 30 июня 1954 г. с самолета, летящего на высоте 9000 м. Блэквеллу удалось измерить яркость внешней короны до расстояний от Солнца в 54, а поляризацию — до 30 солнечных радиусов. А в 1958 г. в горах Боливии зодиакальный свет наблюдался Блэквеллом и Инхэмом вплоть до расстояний в  $25^\circ$  от Солнца.

На рис. 5 представлен ход яркости во внешней короне и зодиакальном свете с увеличением расстояния от Солнца. Хорошо видно, что существует плавный переход короны в зодиакальный свет. Однако возникает вопрос, какую же долю свечения составляет в наблюдаемой яркости рассеяние на электронах?

Определение электронной концентрации во внешней короне производилось и Мишаром, и Блэквеллом. При этом предполагалось, что свет, рассеянный (дифрагированный) на межпланетных пылинках, не поляризован. Согласно Мишару, электронная концентрация на расстоянии 10 солнечных радиусов составляет около  $10^4$  электронов на один кубический сантиметр. Сходную цифру дает Блэквелл, который для расстояния в 20 сол-

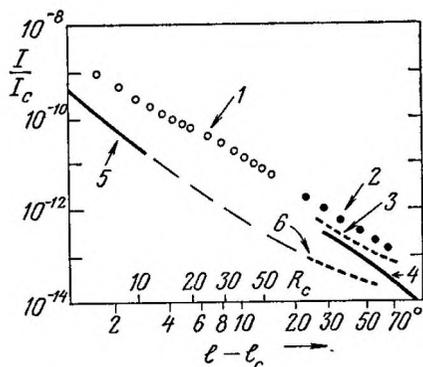


Рис. 5. Солнечная корона и зодиакальный свет. Яркость дана по отношению к яркости Солнца. По обоим осям — логарифмический масштаб. По оси абсцисс сверху — расстояния, выраженные в радиусах Солнца, внизу — угловое расстояние (элонгация) от Солнца в градусах.

1 — яркость внешней короны по наблюдениям Блэквелла солнечного затмения 1954 г. с самолета; 2 — яркость зодиакального света по наблюдениям Блэквелла и Инхэма (Боливия, 1958 г.); 3 — наблюдения автора (Казахстан, 1957 г.); 4 — наблюдения В. Г. Фесенкова (Казахстан, 1946—1947 гг.); 5 — K-составляющая короны (модель Ван де Холста); 6 — поляризованная компонента зодиакального света (наблюдения автора, 1957 г.).

нечных радиусов получил 3000 электронов в кубическом сантиметре.

Наблюдая затмение 20 июля 1963 г., Э. Ней из Миннесотского университета с помощью автоматической аппаратуры, установленной на аэростатах, измерил яркость внешней короны и зодиакального света. Яркость и поляризация внутренней и средней корон наблюдались им с Земли. Полученные результаты свидетельствовали о том, что, начиная с расстояний в 3 солнечных радиуса, близ полюсов Солнца яркость короны почти целиком обусловлена  $F$ -компонентой. Были подтверждены также измерения Блэквелла внешней экваториальной короны и зодиакального света. Степень поляризации  $F$ -компоненты во внешней короне настолько мала, что предположение о равенстве ее нулю вполне допустимо. С удалением от Солнца относительная яркость электронной  $K$ -компоненты падает, и поэтому степень поляризации внешней короны уменьшается до нескольких процентов на расстояниях 10—20 солнечных радиусов ( $2-5^\circ$ ). На рис. 6 показан ход поляризации во внешней короне по измерениям Блэквелла с самолета.

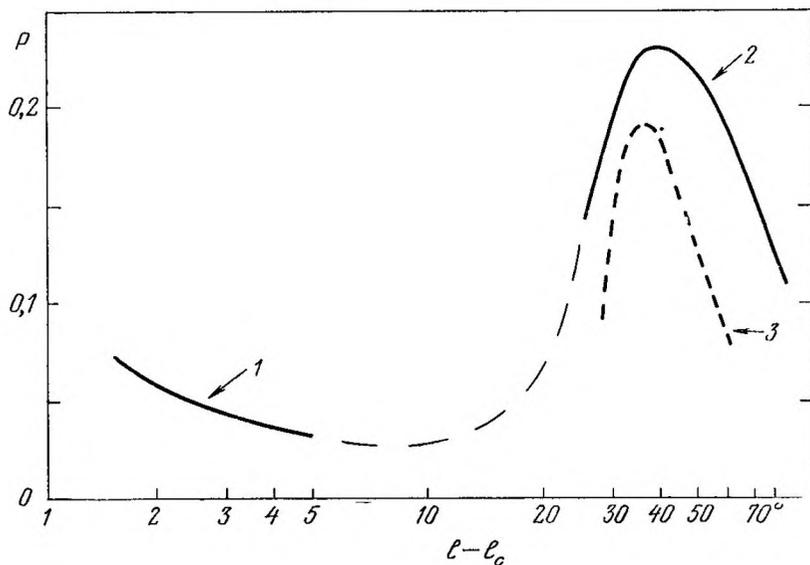


Рис. 6 Степень поляризации солнечной короны  $\rho$  и зодиакального света.

1 — наблюдения Блэквелла затмения с самолета (1954 г); 2 — наблюдения Блэквелла и Инхэма (1955 г) и Бэра и Зидентопфа (1953 г); 3 — наблюдения автора (1957 г).

Интересно рассмотреть ход поляризации при переходе от внешней короны к зодиакальному свету. Надежные измерения степени поляризации в зодиакальном свете были выполнены немецкими исследователями Бэрм и Зидентопфом в 1953 г. и Блэквеллом в 1955 г. (на малых элонгациях, т. е. угловых расстояниях от Солнца, 25—35°). Предполагая, что поляризация обусловлена только рассеянием света на свободных электронах, Бэр и Зидентопф получили в области земной орбиты (элонгация около 60°) весьма высокую величину их концентрации — 600 см<sup>-3</sup>. Последующие прямые ракетные измерения показали, что эта цифра завышена по крайней мере в 10 раз. По-видимому, следует некоторую долю наблюдаемой поляризации приписать пылевой составляющей, однако в количественном отношении этот вопрос до настоящего времени пока еще остается открытым. Наблюдения поляризации зодиакального света на малых элонгациях, выполненные Блэквеллом, обнаружили интересный факт — быстрое падение степени поляризации с приближением к Солнцу. Из рис. 6 видно, что поляризация в зодиакальном свете довольно хорошо «смыкается» с поляризацией во внешней короне. В 1957 г. автором были произведены фотоэлектрические наблюдения яркости и поляризации зодиакального света на малых элонгациях (см. рис. 5—6). В частности, был подтвержден результат Блэквелла. Интересно, что распределение свечения электронной компоненты короны (*K*-компоненты) плавно переходит в распределение поляризованной компоненты зодиакального света. Этот факт как будто является аргументом в пользу существенной роли электронов в образовании поляризованной составляющей свечения зодиакального света. Однако, как мы уже знаем, яркость поляризованной составляющей зодиакального света невозможно объяснить измераемым при помощи космических аппаратов количеством межпланетных электронов (1—10 в одном кубическом сантиметре вблизи орбиты Земли). Таким образом, вопрос о соотношении газовой и пылевой составляющих в межпланетной среде является крайне запутанным.

Заметим, что прямые методы зондирования межпланетного пространства с помощью космических аппаратов обладают недостатками. Во-первых, зондирование производится в определенный момент времени и в малой области пространства, практически в одной точке, а с те-

чением времени — вдоль линии (орбиты космического зонда); во-вторых, возникают неизбежные трудности, связанные с учетом изменений в структуре среды, вносимых самим зондом, вокруг которого возникает «атмосфера» в результате взаимодействия среды с поверхностью зонда.

**Электроны во внешней короне.** Для выделения электронной составляющей зодиакального света можно применить классический метод разделения  $K$ - и  $F$ -компонент в солнечной короне. Дело в том, что в непрерывном спектре зодиакального света должны быть видны линии поглощения, присутствующие в спектре Солнца. При этом в той доле свечения, которая обусловлена рассеянием на электронах, должны быть «замыты» все узкие линии. Имеются данные о том, что температура межпланетного газа не ниже  $10\,000^\circ$  (скорее ближе к  $100\,000^\circ$ ), а при такой температуре уже происходит «замывание» линий.

Наблюдения подобных эффектов связаны со значительными трудностями из-за весьма малой яркости зодиакального света, однако это удалось сделать Блэквеллу и Инхэму. С целью исключения свечения ночного неба (слабые полярные сияния) и рассеянного света в приземном слое земной атмосферы место наблюдений было выбрано в Боливийских Андах (высота более 5 км, а геомагнитная широта близка к нулю; это исключило влияние сияний, наблюдающихся в относительно высоких широтах).

Блэквелл и Инхэм не обнаружили заметного различия фраунгоферовых линий в спектрах зодиакального света и излучения Солнца. Это обстоятельство позволило им оценить предельное значение концентрации межпланетных электронов, и они получили величину  $<30\text{--}100\text{ см}^{-3}$ . Интересно отметить, что эти же исследователи зарегистрировали колебания яркости зодиакального света, которые они связывали с активными процессами на Солнце, давшими, по их оценке, корпускулярный поток с концентрацией электронов около  $300\text{ см}^{-3}$ . Описанные наблюдения говорят о преобладающей роли пыли в свечении и поляризации зодиакального света.

Методы радиоастрономии также дают возможность определить электронную концентрацию во внешней короне и в зодиакальном свете. Прямые наблюдения радиоизлучения межпланетного газа практически невоз-

можно, так как из-за разреженности и относительно малых линейных размеров «радиояркость» межпланетной среды должна быть существенно ниже фона, обусловленного межзвездным газом. Например, на волне 3 м яркостная температура зодиакального света составляет не более  $1^\circ\text{K}$ , в то время как эта же величина для излучения Галактики равна  $500^\circ\text{K}$  и выше.

В 1951 г. советским радиоастрономом В. В. Виткевичем был предложен оригинальный метод исследования внешней короны. Один из многочисленных дискретных радиоисточников отождествлен с Крабовидной туманностью, образовавшейся в 1054 г. после вспышки Сверхновой звезды. Ежегодно Солнце при своем движении вдоль эклиптики оказывается близко<sup>1</sup> (на расстоянии около  $1^\circ$ ) от туманности. При этом радиоволны, излучаемые Крабовидной туманностью, при прохождении через корону испытывают рассеяние, что приводит, в свою очередь, к изменению видимых угловых размеров туманности.

Для такого рода наблюдений необходимо применять специальную радиоаппаратуру — радиоинтерферометр, объединяющий в себе разнесенные на некоторое расстояние радиотелескопы. Независимо тот же метод был предложен английскими радиоастрономами, которые и произвели соответствующие наблюдения.

Как показывают расчеты, рассеяние излучения Крабовидной туманности, выражающееся в увеличении ее угловых размеров, зависит от флуктуаций электронной концентрации в короне. Покрытие Крабовидной туманности солнечной короной наблюдалось не раз отдельными исследователями на различных волнах в метровом и декаметровом диапазонах (В. В. Виткевичем, Хьюишем, Эриксоном). Покрытия солнечной короной тринадцати других дискретных радиоисточников наблюдал Сли. При этом эффект наблюдался до рекордного расстояния в 119 солнечных радиусов ( $32^\circ$ ), т. е. элонгаций, соответствующих собственно внутренним частям зодиакального света.

К сожалению, трудно установить связь между величиной рассеяния и электронной концентрацией, так как

---

<sup>1</sup> Крабовидная туманность в 400 000 раз дальше от нас, нежели Солнце, и поэтому речь идет об угловом видимом расстоянии.

необходимо знать размеры неоднородностей распределения электронов.

Попытки определить электронную концентрацию из предположения о ее линейном соотношении с угловыми размерами радиоисточника и при помощи привязки к известным значениям электронной концентрации на определенных расстояниях участков короны от Солнца делались Эриксоном, который использовал данные различных исследователей, а в качестве привязки для определения электронной концентрации взял измерения Блэквелла.

Согласно Эриксону, электронная концентрация составляет  $n_e \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$  на расстоянии 10 солнечных радиусов и  $n_e \approx 100 \text{ см}^{-3}$  при расстоянии 70 солнечных радиусов ( $19^\circ$ ). Экстраполяция его графика дает близ орбиты Земли (210 солнечных радиусов)  $n_e \approx 10 \text{ см}^{-3}$ , что согласуется с принятыми представлениями. Однако точность такого определения  $n_e$  невысока. Более ценными результатами при наблюдениях покрытий радиоисточников солнечной короной являются некоторые качественные выводы о характере неоднородности газа во внешних областях короны и межпланетного пространства. Например, наблюдения Сли свидетельствуют об изменении характера неоднородностей распределения электронной концентрации в зависимости от солнечной активности. А по мнению В. В. Виткевича, ряд явлений, наблюдаемых им во время покрытий Крабовидной туманности короной, свидетельствует о наличии в последней крупномасштабных неоднородностей, протягивающихся, может, до расстояний от Солнца в 30 солнечных радиусов и являющихся, по-видимому, корональными лучами.

Еще один метод исследования внешней короны стал возможен благодаря значительному прогрессу в строительстве крупных радиотелескопов. В радиоастрономической обсерватории Эль-Кампо (США) Абель, Чисхольм, Флек и Джеймс осуществили радиолокацию солнечной короны на волне 8 м. Регистрируя весьма слабый отраженный от короны сигнал, исследователи нашли, что корональная плазма движется наружу со средней скоростью около 40 км/с на высоте в несколько солнечных радиусов. Этот результат подтверждает существование «солнечного ветра» (об этом будет подробно рассказано в следующей главе). Надо полагать, что дальнейшее раз-

витие радиолокационного метода позволит получить интересные результаты, относящиеся к динамике внешней короны.

**Пыль в короне?** Проводя измерения инфракрасного излучения солнечной короны во время полного затмения 1966 г., американский исследователь Петерсон обнаружил, что в короне имеется область избыточного излучения с длиной волны около 2 мкм (20 000 Å), представляющая собой ореол вокруг Солнца с нерезкой внутренней границей на расстояниях 3—6 солнечных радиусов от центра диска Солнца. В этом же году другой американец, Мак-Квин, используя специальный телескоп — коронограф с внешним затмевающим диском (см. последнюю главу), поднятый с помощью аэростата на высоту 28 км, обнаружил в короне несколько ореолов, светящихся в инфракрасных лучах. Расстояния этих ореолов от центра Солнца составляли 4; 8,7 и 9,2 солнечного радиуса.

Эти наблюдения свидетельствуют о том, что вокруг Солнца на соответствующих расстояниях должна находиться пыль, которая, нагреваясь Солнцем, излучает энергию в инфракрасной области спектра. Кайзер (США) теоретически изучил вопрос об излучении пылинок и пришел к выводу о том, что кремниевые частицы могут дать максимум излучения на волне в 2 мкм. На других длинах волн, например в видимой области спектра, также должно наблюдаться излучение, только интенсивность его будет меньше. Недавно французским астрономом С. Кучми на основании наблюдений солнечных затмений 1968 и 1970 гг., а также наблюдений других исследователей был установлен факт существования во внешней короне на расстояниях 4—6 солнечных радиусов от центра Солнца кольцеобразного свечения. Это явление было им названо внешним диффузным уплотнением. Наблюдаемое свечение весьма далеко от идеальной формы кольца, а скорее представляет собой его части, локализующиеся в областях расположения больших корональных лучей. Природа этого явления во многих отношениях загадочна. Можно назвать два альтернативных объяснения внешних диффузных уплотнений, высказанных самим Кучми.

Как указывалось выше, межпланетная пыль вблизи Солнца должна быстро исчезать вследствие нагревания ее до высокой температуры. Однако в том случае, если

пылинки имеют весьма малые размеры (меньше длины волны света,  $5 \cdot 10^{-5}$  см), то световые кванты не будут отдавать энергию таким частицам, т. е. не будут нагревать их или оказывать на них давление. На таких пылинках будет происходить дифракция света и поэтому в какой-то мере они будут рассеивать свет, становясь благодаря этому наблюдаемыми. Характер расположения таких пылевых облаков в короне следует объяснить воздействием на них сил тяготения и давления «расширяющейся» короны («солнечного ветра»). Однако это предположение имеет ряд недостатков.

Вторая его гипотеза связывает «внешние диффузные уплотнения» с электронно-протонной плазмой короны. Анализируя фотографии короны, полученные во время полного солнечного затмения 30 июня 1973 г. экспедициями Парижского астрофизического института и кафедрой астрономии Киевского университета, а также снимки короны, полученные с борта сверхзвукового самолета «Конкорд», Кучми имел возможность сопоставить вид короны, полученный в различные моменты времени (интервал достигал двух часов). Сопоставление показало, что в области «шлемовидных» лучей (см. следующую главу) существует процесс отрыва больших частей луча, связанный, возможно, с распространением магнитно-гидродинамических волн в короне. Таким образом, по мнению Кучми, отрыв подобных облаков плазмы и создает внешние диффузные уплотнения, которые в этом случае должны быть уплотнениями газовой ( $K$ -составляющей) короны. Для окончательного решения вопроса о природе диффузных уплотнений необходимы дальнейшие наблюдения яркости, поляризации и цвета этих загадочных образований.

**Поляризация излучения короны.** В главе об основных физических свойствах солнечной короны говорилось, что свет, рассеянный на электронах ( $K$ -составляющая), поляризован. Вспомним, что свет представляет собой поперечные электромагнитные волны. В случае полностью неполяризованного излучения плоскость колебаний электрического вектора не имеет какого-либо преимущественного направления, т. е. с равной вероятностью мы встречаем любую ориентацию плоскости электрических колебаний. Если эта плоскость занимает определенное положение в пространстве, то такое излу-

чение называют линейно поляризованным<sup>1</sup>. Направление плоскости определяет плоскость поляризации. Излучение, состоящее из поляризованного и неполяризованного света, называют частично поляризованным и характеризуют его степенью поляризации  $p = i_p / (i_p + i_e)$ , где  $i_p$  — интенсивность поляризованного, а  $i_e$  — естественного или неполяризованного излучения. Величина  $p$  принимает значения от 0 до 1. При рассеянии света на электронах возникает линейная поляризация, причем  $p = 1$ , если угол между направлениями падающего и рассеянного излучения равен  $90^\circ$ . Если выбрать какую-либо точку в короне, лежащую в плоскости, перпендикулярной к лучу зрения и проходящей через центр Солнца, то излучение после рассеяния на электронах, находящихся в этой точке, будет частично поляризовано. Поляризация получается неполной, потому что рассеиваемый свет приходит в рассматриваемую точку под различными углами к лучу зрения. Если точку короны, в которой происходит рассеяние, мысленно удалить от Солнца, то степень поляризации будет расти, в пределе стремясь к 1, поскольку углы рассеяния от различных участков солнечной поверхности становятся мало отличающимися от  $90^\circ$ . Таким образом, поляризация света, рассеиваемого малым элементом короны, лежащим в картинной плоскости, зависит от расстояния этого элемента от Солнца или от величины телесного угла, под которым видно Солнце из рассматриваемой точки короны.

Подобные расчеты с учетом отклонения элемента короны от картинной плоскости и потемнения к краю Солнца, уменьшающего эффективные угловые размеры солнечного диска, были выполнены в 1930-х годах Баумбахом. Полученная зависимость степени поляризации от расстояния характеризует поляризацию, максимально возможную при рассеянии солнечного света на электронах короны. Это связано с тем, что вещество короны не сосредоточено в точке, а распределено каким-то образом вдоль луча зрения. Дальнейшие расчеты Баумбаха сводились к вычислению степени поляризации  $p$  в идеализированной короне, имеющей сферическую

---

<sup>1</sup> Существует еще и понятие о круговой поляризации, при которой плоскость колебаний вращается регулярно в одну сторону. Соответственно направлению вращения различают «правую» и «левую» круговую поляризацию.

симметрию, в которой электронная концентрация изменялась с расстоянием, как это описано в первой главе. Было получено, что  $p$  составляет около 0,2 при расстоянии в один солнечный радиус ( $r = 1R_{\odot}$ ), а затем растет до 0,6 при  $r \approx 2R_{\odot}$  и слабо увеличивается при дальнейшем удалении от Солнца.

Однако первые же наблюдения поляризации излучения короны показали, что после удаления от Солнца поляризация достигает максимума, значительно уменьшаясь далее с расстоянием. Последнее явление связано с вкладом  $F$ -компоненты, излучение которой вблизи Солнца неполяризовано (или очень слабо поляризовано): рост вклада  $F$ -составляющей в излучение короны с расстоянием и приводит к падению степени поляризации. Этот эффект был принят во внимание Ван де Холстом, который построил модель короны с учетом вклада  $F$ -составляющей. В этой модели различаются полярные и экваториальные области короны, а также характер короны эпох максимальной и минимальной активности Солнца. Нужно сказать, что на протяжении уже более двух десятилетий модель Ван де Холста успешно выдерживает испытание, являясь отличным приближением для различных исследований. В частности, распределение яркости  $F$ -составляющей, принятое Ван де Холстом, хорошо согласуется с более поздними определениями К. Саито, С. Кучми и других. Согласно модели Ван де Холста степень поляризации непрерывного излучения короны не превосходит 45%, достигая этой величины в максимуме солнечной активности на расстоянии около 1,5 солнечного радиуса.

Измерения поляризации короны проводятся обычно фотографическим способом. При этом корона фотографируется через поляроид — оптическую пластинку, пропускающую полностью поляризованное излучение, если направления плоскости поляризации и оси поляроида совпадают, и полностью его поглощающую, если эти направления взаимно перпендикулярны. Интенсивность неполяризованного излучения поляроид уменьшает ровно вдвое. Плоскость поляризации излучения короны ориентирована тангенциально относительно солнечного лимба, т. е. направление поляризации в каждой точке короны перпендикулярно к радиусу, проведенному из центра солнечного диска в эту точку. Для определения степени и направления поляризации часто применяют метод

В. Г. Фесенкова, заключающийся в получении трех фотографий с осями поляроидов, ориентированными под углами в  $60^\circ$  друг к другу. Этот метод позволяет хорошо оценить степень поляризации, но приводит к значительным ошибкам в определении направления.

Первые определения поляризации короны показали, что хотя в среднем ее ход с расстоянием от Солнца согласуется с моделью Ван де Холста, степень поляризации в отдельных областях короны достигает высоких или, напротив, весьма малых значений.

В ряде работ по определению поляризации короны получались отклонения плоскости поляризации от тангенциального направления, достигающие  $20^\circ$  (М. А. Вашикидзе, К. Г. Захарин). К сожалению, большая погрешность в определении направления поляризации делает эти результаты недостоверными. Если отклонения и существуют, то они, видимо, должны быть малыми (не превосходить нескольких градусов). Последнее предположение и было положено французским астрономом Лио в основу более точной методики определения степени поляризации. В этом эксперименте перед изображением короны помещается диск, состоящий из секторов-поляроидов, вырезанных так, чтобы оси поляроидов совпадали с центральным радиусом каждого из секторов. Центр диска совмещается с центром солнечного диска, а сам диск приводится во вращение с такой скоростью, чтобы за время экспозиции он сделал достаточно большое число оборотов. Это необходимо для исключения влияния неоднородностей пропускания света такой поляроидной мозаикой. Корона фотографируется одновременно через второй диск-мозаику, но с секторными поляроидами, оси которых перпендикулярны осям первых. Если измерить яркость короны на двух таких снимках (в одной и той же точке), то степень поляризации в этой точке составит  $p = k(i_2 - i_1)/(i_2 + i_1)$ , где  $k$  зависит от числа секторов ( $k$  тем ближе к единице, чем больше это число). Важно, чтобы оба снимка короны получались в строго одинаковых условиях.

Подобная методика была применена сотрудниками лаборатории солнечной активности Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) при наблюдениях затмения 10 июля 1972 г. В результате исследования полученных фотографий короны (А. К. Кишонков, А. А. Сазанов и автор)

было получено детальное распределение степени поляризации в короне в области  $1,2-2,0 R_{\odot}$ . На рис. 7 представлено распределение степени поляризации после исключения из свечения короны излучения, связанного с  $F$ -составляющей, которая считалась неполяризованной. Обращает на себя внимание крайне неоднородное рас-

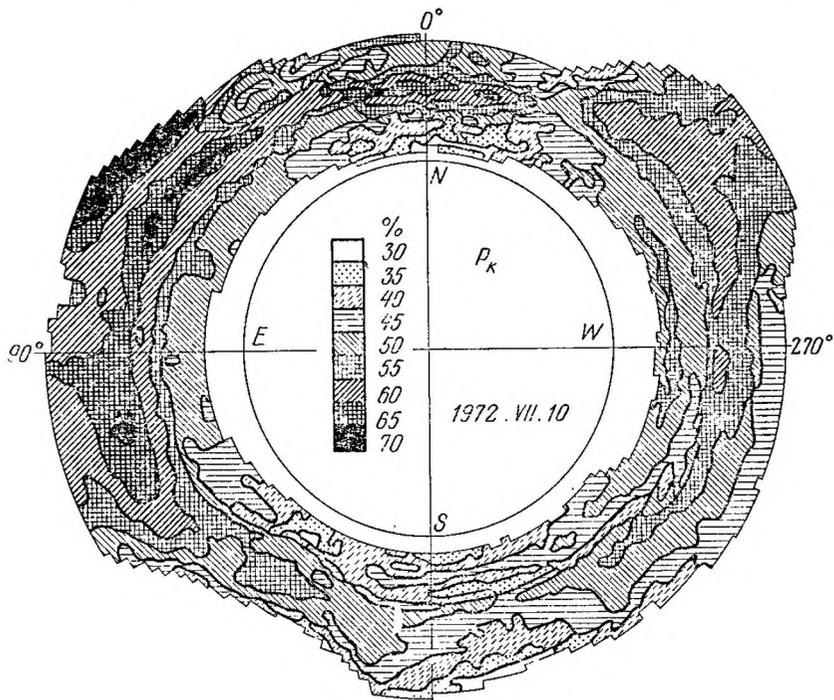


Рис. 7. Распределение поляризации в короне после учета  $F$ -составляющей, которая, будучи неполяризованной на малых расстояниях от Солнца, снижает степень поляризации «истинной» короны (т. е.  $K$ -составляющей). Результаты получены А. К. Кишонковым, А. А. Сазановым и автором по материалам затмения 10 июля 1972 г. Столь детальное распределение поляризации получено впервые.

пределение степени поляризации, которая оказывается весьма высокой в ряде областей короны.

При исследованиях короны мы видим все ее детали всегда в проекции на картинную плоскость. Так как корона прозрачна для собственного излучения, то по виду фотографий практически невозможно судить о распределении вещества вдоль луча зрения: какие из деталей

короны ближе, какие дальше от нас и какие лежат в картинной плоскости (отсутствует стереоскопический эффект). Поляризационные наблюдения в какой-то степени восполняют этот пробел, так как степень поляризации зависит от угла рассеяния (см. выше). Например, на основании результатов исследования поляризации короны затмения 1972 г. можно было сделать вывод о крайне неоднородном распределении электронов в короне: большие корональные лучи — «шлемы», как оказалось, сильно сплюснуты в направлении луча зрения, т. е. являются почти плоскими образованиями, ориентированными вдоль гелиографических меридианов<sup>1</sup>, и сильно изогнуты, т. е. отклонены от радиальных направлений. Наблюдателю, рассматривающему корону со стороны гелиографического полюса, представилась бы картина, совершенно отличная от обычно видимой: корональные лучи казались бы сравнительно тонкими «спицами», торчащими из Солнца во все стороны. По всей вероятности, «спицы» изогнуты в сторону, противоположную направлению вращения Солнца. В недалеком будущем вид короны с полюсов может быть получен при помощи космического аппарата, движущегося по гелиоцентрической орбите, наклоненной к эклиптике под углом, близким к  $90^\circ$ .

**Аномальная поляризация.** Солнечный свет, рассеянный на электронах короны, в соответствии с классической теорией должен иметь степень поляризации, не превышающую, по Баумбаху, максимальную (см. выше), а плоскость поляризации должна быть строго тангенциальна. Однако при исследовании короны на затмениях 1968 и 1970 гг. А. А. Сазановым (совместно с автором в 1968 г.) и независимо Кучми (1970 г.) было обнаружено, что в некоторых областях наблюдаемая степень поляризации превышает максимальную величину. Это, казалось бы, совершенно непонятное явление получило неожиданно простое объяснение в работах московского астрофизика М. М. Молоденского. При расчете поляризации обычно не учитывается движение электронов, однако если вещество в определенной области короны имеет направленное движение, то свет, приходящий в движущуюся точку короны, будет восприниматься в

---

<sup>1</sup> К подобному выводу ранее пришел киевский астроном В. И. Иванчук, анализируя видимую структуру короны.

этой точке как приходящий по другому направлению, отличному от первоначального. Это явление хорошо известно в астрономии под названием абберации. Существует годовая абберация звезд, связанная с орбитальным движением Земли (скорость около 30 км/с); вследствие годичной абберации видимые направления звезд отличаются от истинных на угол всего в  $20''$ . Понять суть явления абберации поможет следующая, правда, весьма поверхностная аналогия. Если вы находитесь у окна поезда, то в дождливую погоду и при слабом ветре на окне будут почти вертикальные следы дождевых капель. Как только поезд двинется, эти следы станут наклонными, причем наклон будет зависеть от скорости поезда, т. е. произойдет сложение скоростей падения дождя и движения поезда.

Возвратимся к короне. Если элемент вещества короны удаляется от Солнца, то вследствие абберации телесный угол, под которым видимо Солнце из движущегося элемента, станет меньше, и степень поляризации света, рассеянного электронами, содержащимися в этом элементе, возрастет. В случае приближения элемента, рассеивающего свет, наоборот, телесный угол возрастет и степень поляризации уменьшится. Если рассмотреть элемент короны, движущийся параллельно поверхности Солнца, то положение плоскости поляризации отклонится от тангенциального направления, так как для воображаемого наблюдателя, движущегося вместе с элементом короны, вследствие абберации видимое положение Солнца будет отличаться от истинного. В общем случае, когда имеются и радиальная, и тангенциальная компоненты скорости, будут меняться и степень, и направление поляризации. Расчеты М. М. Молоденского показали, что при скоростях движения, сравнимых с тепловой скоростью электронов (десятки тысяч километров в секунду), степень поляризации может измениться на несколько процентов, а угол положения плоскости поляризации — на несколько градусов<sup>1</sup>. Таким образом, измерения поляризации открывают новые возможности исследовать, кроме геометрии короны, также и ее динамику.

---

<sup>1</sup> Тепловое движение электронов также вызывает абберацию, но из-за равновероятности различных направлений движения (изотропности поля скоростей) средний эффект будет равен нулю.

М. М. Молоденским были предложены два способа точного определения положения плоскости поляризации. Первый заключался в кинематографировании короны через поляризатор, поворачивающийся от кадра к кадру на небольшой угол ( $5-10^\circ$ ). В этом случае яркость короны в каждой точке будет меняться периодически, причем полный период соответствует повороту поляризатора на  $180^\circ$ . Большое число периодов позволяет с высокой точностью (до десятых долей градуса) определить положение плоскости поляризации. Наблюдения с таким кинополяриметром были проведены экспедицией лаборатории солнечной активности ИЗМИРАН СССР во время затмения 1972 г. на Чукотке. Исследование показало, что в короне, как правило, отсутствуют массовые движения вещества со скоростями, превышающими тысячи километров в секунду. Отклонения плоскости поляризации около одного градуса были замечены лишь в некоторых областях внутренней короны.

Второй способ заключается в применении вращающихся поляризаторов с секторной мозаикой, аналогичной вышеописанной, но с той разницей, что ориентация осей поляризаторов соответствует углам  $\pm 45^\circ$  по отношению к радиальному направлению. В этом случае при строго тангенциальной ориентировке плоскости поляризации короны ее яркость на обоих снимках должна быть одинакова, а при даже небольшом отклонении — различна. Подобные наблюдения были проведены во время затмения 1973 г. в Мавритании (Западная Африка), но плохие атмосферные условия помешали получить надежные материалы.

## Структура короны и корпускулярное излучение

---

**Исследования структуры.** Первые научные описания короны были даны в XVII—XVIII столетиях (Кеплер, Кассини, Галлей). Структура короны, которая наблюдалась еще в Древнем Египте, подробно исследовалась на рубеже XIX и XX столетий. Реньяр, Локьер и Ганский установили переменность короны в зависимости от фазы солнечной активности. На рис. 8 изображена структурная схема короны (затмение 25 февраля

1952 г.), относящаяся к промежуточной фазе солнечной активности («средний уровень»). Рассмотрим на этом примере основные структурные образования. Самыми заметными деталями являются большие лучи: «шлемы», переходящие в «опахала» (русский термин, предложенный С. К. Всехсвятским и Е. Я. Бугославской) или «стримеры» (по-английски «потоки»).

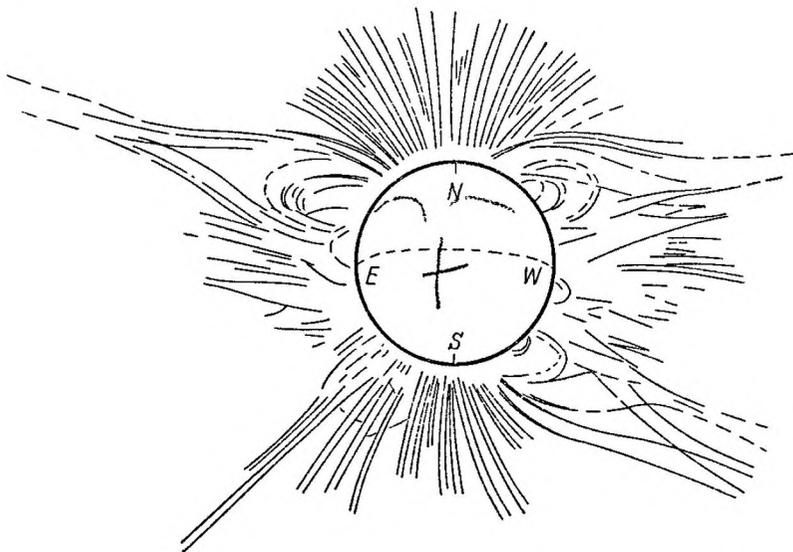


Рис. 8. Структура короны 25 февраля 1952 г. Эпоха промежуточной активности Солнца (по данным автора).

В нижней части «шлемов», до расстояний около одного солнечного радиуса, видны дуги, обычно окружающие спокойный волокнообразный протуберанец. Киевский астроном В. И. Иванчук считает, что «дуги» и «шлемы» — почти плоские образования вдоль луча зрения, и образуют «готический павильон», осью которого служит спокойный протуберанец — волокно, ориентированное примерно вдоль гелиографической параллели (вдоль луча зрения). Основной аргумент в пользу такого представления — чисто геометрический. И поэтому эта картина в некотором смысле идеализирована (и встречает некоторые возражения).

Так как одновременно видно много «шлемов», то из-за их значительной толщины вдоль луча зрения труд-

но разместить «шлемы» на поверхности Солнца. Полярные лучи (хорошо развитая система видна на севере) напоминают очертания силовых линий магнитного диполя (равномерно намагниченной сферы), ось которого совпадает с осью вращения Солнца. Вряд ли могут возникнуть сомнения в том, что полярные лучи располагаются вдоль магнитного поля, являющегося идеальным «каркасом» для корональной плазмы — сильно ионизованного газа высокой электропроводности. Открытым остается лишь вопрос, является ли это магнитное поле общим слабым полем Солнца или оно — результат суперпозиции местных магнитных полей (но достаточно сильных), занимающих ограниченные участки солнечной поверхности? Кроме того, существуют прямые лучи, не имеющие характерной «шлемовидной» формы, располагающиеся на западе и юго-востоке.

Корона обнаруживает сильную переменность от затмения к затмению. Мы имеем в виду не вращение короны вместе с Солнцем, факт, установленный советскими астрономами в 1936 г., а физическое изменение вида короны. Лучи-«опахала» существуют, по-видимому, около 1—3 месяцев, а полярные лучи существенно меньше — один или несколько дней. В зависимости от уровня общей активности Солнца (11-летний цикл) происходит не только исчезновение одних корональных форм и замена их сходными, вновь возникшими. Меняется общий вид короны, что связано с изменением направления лучей и областей их образования. На рис. 9 и 10 показана структура короны эпохи глубокого минимума активности (1954 г.) и корона в максимуме активности (1936 г.). В минимуме солнечной активности «опахальные» лучи вытянуты вдоль гелиографического экватора; полярные лучи занимают большие области и хорошо развиты. В максимуме активности полярные лучи практически исчезают, так как лучи-«опахала» распространяются в высокие гелиографические широты, вытесняя полярные лучи, а наклон лучей к соответствующим радиальным направлениям становится малым. Все эти изменения формы короны отражают изменения структуры суммарного магнитного поля Солнца (а может, общего магнитного поля Солнца?) с фазой активности. Исследования зависимости формы короны от фазы солнечной активности проводились (после классических работ Локьера, Ганского, Люден-

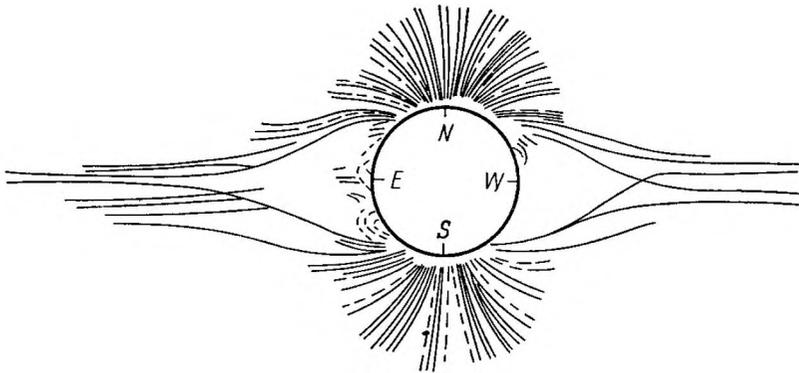


Рис. 9. Структура короны 30 июня 1954 г. Минимум солнечной активности (по С. К. Всехсвятскому и автору)

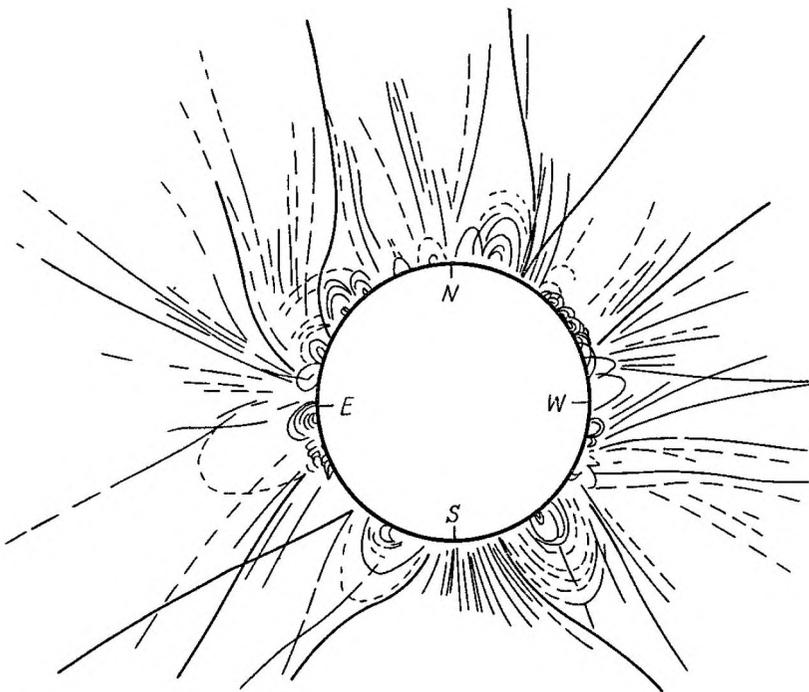


Рис. 10. Структура короны 10 июля 1968 г. Максимум солнечной активности (по В. И. Иванчуку).

дорфа) автором этих строк и особенно детально А. Т. Несмяновичем (Киев), составившим каталог структурных форм короны. Эти работы дают возможность прогнозировать (примерно за 1—0,5 месяца) общий вид короны, а также расположение отдельных крупных лучей, используя в качестве исходных данных положение пятен и устойчивых спокойных протуберанцев.

**Корпускулярные потоки.** В 1941—1946 гг., анализируя результаты исследования структурных форм короны затмения 1936 г., С. К. Всехсвятский пришел к выводу о том, что корональные лучи представляют собой корпускулярные потоки. Этот вывод основывался на сопоставлении данных о хромосферной активности Солнца (связанной с корональными лучами) с данными о геомагнитных возмущениях. В это время господствовало представление о короне как о квазистатическом образовании, т. е. предполагалось отсутствие в короне всякого движения, кроме теплового для частиц газа. Нужно сказать, что такое представление в свое время оказалось достаточно прогрессивным, так как оно позволило выяснить ряд основных физических свойств коронального газа (см. предыдущую главу).

Каковы были возражения против концепции динамической короны? Обычно считали, что поскольку необходимы большие скорости истечения, во внешней короне достигающие сотен километров в секунду, то в случае их существования движение было бы замечено. Для обнаружения движения необходимо, чтобы оно имело макроскопический характер, т. е. двигались бы отдельные сгустки, детали. При наблюдениях короны не обнаруживается, как правило, движений со скоростями, превышающими 10 км/с. Однако можно допустить, что в лучах движение носит микроскопический характер, т. е. оно не приводит к видимым изменениям корональных форм. Такое движение, так же как и тепловое, не будет заметным. В отличие от теплового, «хаотического», такое движение направлено вдоль лучей. В последнем случае должны соблюдаться условия.

- 1) монотонность изменения плотности вдоль луча и
- 2) выполнение уравнения непрерывности<sup>1</sup>. Следствием

---

<sup>1</sup> Уравнение непрерывности означает постоянство величины произведения плотности коронального газа на его скорость и на поперечное сечение луча

второго условия является ускорение вещества с удалением от Солнца, так как плотность в этом направлении весьма быстро падает, а поперечное сечение луча меняется мало.

В 1944 г. английский астрофизик Аллен сопоставил геомагнитные возмущения типа  $M$  (один из самых распространенных видов возмущений, повторяющихся с периодом вращения Солнца) с большими хромосферными волокнами. Хорошо известно, что над такими волокнами (спокойными протуберанцами) почти всегда располагаются корональные лучи типа «опахал». Отсюда и был сделан вывод об отождествлении корональных лучей с геоактивными устойчивыми потоками корпускул. По существу, работа Аллена сходна с вышеупомянутой работой Всехсвятского.

Представления о динамической короне в 1950-х годах развивались киевской школой исследователей короны. В частности, было установлено, что плотность коронального газа в лучах на больших расстояниях от Солнца (5—10 солнечных радиусов) практически не меняется. Если считать луч статическим образованием, то такой факт трудно понять; но в рамках концепции динамической короны ему находится естественное объяснение: скорость истечения вещества в луче на больших расстояниях от Солнца должна быть практически постоянной. Даже без фотометрических исследований короны наличие далеко простирающихся лучей (по наблюдениям автора с самолета — до 20 солнечных радиусов, а по наблюдениям английского астронома Блэквелла — еще дальше) заставляет считать лучи динамическими образованиями, так как трудно представить себе подобный статический газовый «столб-луч», находящийся в гравитационном поле Солнца.

Теория динамической короны была развита Е. А. Пономаревым. (Киевский университет) в 1954—1957 гг. В этой теории существенно предположение о наличии преимущественного направления в распределении скоростей частиц коронального газа, т. е. кроме теплового «хаотического» движения, предполагается существование еще направленного движения причем доля охватываемых им частиц тем больше, чем ближе это направление к радиальному.

Рассматривая истечение газа из короны, Е. А. Пономарев показал, что, взаимодействуя с общим магнитным

полем Солнца, электропроводящий газ меняет вид поля, первоначально похожего на поле диполя (равномерно намагниченной сферы). В результате получаются силовые линии, близкие к очертанию «опахал»; вдоль этих силовых линий и происходит движение вещества. В последнее время вопрос о форме лучей короны был рассмотрен более строго московскими физиками С. И. Сыроватским и Б. Сомовым, однако для нас существенно то, что теория Сыроватского и Сомова описывает корональные лучи как потоки вещества. В этой теории существенным моментом является наличие вдоль оси луча (в той области, где луч становится прямолинейным) токового слоя, возникающего в области малой толщины с антипараллельным направлением магнитного поля.

**Тепловая диссипация.** Вернемся теперь к вопросу о тепловой диссипации короны (см. первую главу). Представим себе нагретый газ, находящийся в поле силы тяжести. На любой элементарный объем газа будут действовать две противоположно направленные силы: давление — тепловая сила, приводящая к расширению газа и, следовательно, к его подъему над фотосферой (или поверхностью Солнца), и гравитационная сила, притягивающая частицы газа «вниз», к фотосфере. Баланс этих двух сил приводит к установлению некоторого распределения плотности газа с высотой  $h$ , описываемого показательным законом  $\exp(-h/h_0)$ , где параметр  $h_0$  зависит от значений температуры газа и силы гравитации. В короне, в среднем, распределение плотности частиц можно описать весьма приближенно температурой около 1 000 000 градусов и полем солнечной гравитации. Как говорилось выше, распределение скоростей атомов газа в короне «хаотично», однако величины скоростей различны: хотя подавляющее большинство атомов и имеет скорости, близкие к некоторой определенной величине  $v_0$ , встречаются как меньшие, так и большие величины скорости. Можно найти атомы со скоростями, существенно большими  $v_0$ , однако доля их будет малой. Если скорость таких атомов достаточно велика, то они могут преодолеть силу тяжести и покинуть Солнце. Доля таких частиц увеличивается в результате соударений между более медленными частицами.

По существу, теория Пономарева динамической короны является развитием теории Пикельнера. Пикель-

нер считал распределение атомов по скоростям равновесным (максвелловским) и, естественно, не мог получить большой величины диссипации, так как в теорию «априори» вводилась статичность короны. Вместе с тем работа Пикельнера сыграла важную роль в развитии представлений о динамической короне, дав соответствующий толчок дальнейшим исследованиям.

**«Солнечный ветер».** Как горячая гидростатическая солнечная атмосфера корона рассматривалась шведским астрофизиком Альвеном в 1941 г. Уже к этому времени было известно, что корональный газ простирается достаточно далеко. Наблюдения короны на весьма больших расстояниях от Солнца (см. вторую главу) побудили американского геофизика С. Чэпмена в 1957 г. развить теорию солнечной короны, простирающейся почти безгранично далеко. В основу теории Чэпмена легли представления о передаче энергии во внешней короне наружу за счет теплопроводности. Источники энергии, поступающей в корону, расположены, как предполагалось, во внутренних ее областях так, что поток тепла во внешней короне, проходящий через сферу любого относительно большого радиуса, постоянен, а корона не участвует во вращении вместе с Солнцем, сферически симметрична и распределение в ней следует гидростатическому закону. В дальнейшем Чэпмен учел наличие общего магнитного поля и вращение короны с Солнцем. Основные результаты таковы — температура во внешней короне падает весьма медленно, меняясь от 1 млн. градусов вблизи Солнца до 100 тыс. градусов вблизи орбиты Земли. Концентрация электронов вблизи Земли получалась завышенной: при различных предположениях о максимальной температуре внутренней короны (1—1,2 млн. градусов) от 300 до 3000 электронов в кубическом сантиметре. Согласно современным данным, концентрация составляет от единиц до десятков электронов в кубическом сантиметре (см. вторую главу).

Вскоре после опубликования работы Чэпмена (в 1958 г.) американский теоретик Э. Паркер развил теорию динамической короны. Основой теории послужили работы немецкого астрофизика Л. Бирмана, который в 1951 г. опубликовал работу, содержащую анализ поведения комет. В этой работе отмечалось, что силы светового давления недостаточно для объяснения наблюдаемых ускорений молекул газа в кометных хвостах, недоста-

точно также и интенсивности солнечного излучения для обеспечения наблюдаемой ионизации кометных, так называемых «материнских» молекул, из которых образуются молекулярные ионы. Нужно отметить, что на эти факты указывали также и другие специалисты-«кометчики», в частности советские. В качестве фактора, обеспечивающего «дополнительные» ионизацию и ускорение молекул в хвостах комет, Бирман рассмотрел непрерывное истечение корпускул из Солнца (на расстоянии Земли переносящее концентрацию порядка сотен частиц в кубическом сантиметре со скоростью 200 км/с).

Паркер, опираясь на теорию Чэпмена и анализ Бирмана, всесторонне рассмотрел проблему непрерывного истечения вещества из солнечной короны. Удачное название, предложенное Паркером, — «солнечный ветер» — сыграло не последнюю роль в том, что представление о динамической короне связывается только с его именем. Паркер обратил внимание прежде всего на несовместимость принятого Чэпменом гидростатического распределения плотности и давления среды (межзвездного газа) на «бесконечно» большом расстоянии от Солнца. По Чэпмену, это давление получалось слишком большим. Рассматривая плазму короны как сплошную среду, Паркер разделил корону на две области. В одной из них, внутренней, температура не меняется, что обуславливается наличием в этой области источников энергии, распределенных по некоторому закону. На расстояниях, больших некоторой величины (около  $0,5 R_{\odot}$ ), начинается вторая область, где истечение газа обусловлено адиабатическим расширением (без притока тепла извне), происходящим со сверхзвуковой скоростью, т. е. большей средней скорости теплового движения частиц газа. Паркер выбрал из полученного им семейства различных моделей короны следующую: скорость расширения короны вблизи фотосферы составляет 66 км/с, у орбиты Земли — 440 км/с, а концентрация электронов —  $180 \text{ см}^{-3}$ . Максимальная температура внутренней области принята равной двум миллионам градусов.

В свете современных данных о количестве газа в межпланетном пространстве (имеются в виду данные, полученные по показаниям приборов, установленных на космических аппаратах) наиболее подходящей из семейства моделей Паркера (по уточненным данным его обзо-

ра 1965 г.) будет следующая: максимальная температура составляет 1—1,5 млн. градусов, скорости расширения «в основании» короны и у орбиты Земли соответственно равны 1 км/с и 500 км/с.

Подчеркнем, что в своих теоретических исследованиях Чэпмен и Паркер для простоты рассматривали сферически симметричное корпускулярное излучение. В действительности «солнечный ветер» имеет неоднородную структуру, обусловленную сложной формой короны, определяемой, в свою очередь, магнитным полем, а также меняется в зависимости от активности Солнца.

Солнечная корона — это водородная плазма, т. е. ионизованный газ, состоящий из равных количеств протонов и электронов. Такой газ обладает довольно высокой электропроводностью, поэтому магнитные поля будут, как говорят, «вморожены» в корональную плазму. Вследствие этого «солнечный ветер» увлекает магнитное поле, вытягивая его. Крупные неоднородности в распределениях магнитного поля и мощности истечения на сравнительно небольших расстояниях от фотосферы (внутренняя и средняя короны) приводят к неоднородной структуре «солнечного ветра». Так как Солнце вращается, то радиальная скорость «ветра», складываясь с угловой скоростью вращения, образует спиральную структуру магнитного поля и плазмы, переносимых «ветром».

Такие представления о структуре «солнечного ветра» были подтверждены измерениями концентрации частиц, их скорости и напряженности магнитного поля, проведенными при помощи различных космических аппаратов.

Существует по крайней мере три типа корпускулярного излучения Солнца (это деление, разумеется, носит в какой-то степени условный характер): 1) изотропный (однородный) «солнечный ветер», охватывающий всю солнечную корону и дающий 1—10 частиц в кубическом сантиметре, движущихся со скоростями в несколько сотен километров в секунду у орбиты Земли; 2) устойчивые (существующие несколько месяцев), относительно узкие корпускулярные потоки (*M*-области), связанные, по-видимому, с большими корональными лучами (существование таких потоков особенно хорошо видно из 27-дневной повторяемости геомагнитных возмущений); 3) кратковременное (около часа), охватывающее боль-

шой телесный угол, корпускулярное излучение, связанное с хромосферными вспышками. Скорости частиц в таком излучении достигают значительных величин. Излучение состоит из частиц самых различных энергий вплоть до космических лучей (скорости частиц в которых близки к скорости света). Однако таких частиц относительно мало, и основную массу составляют частицы, движущиеся со скоростями в несколько тысяч километров в секунду.

## Методы исследования

---

**Солнечные затмения.** Важнейшие сведения о солнечной короне получены во время полных затмений Солнца — явлений, которые природа подарила человечеству, объединив два случайных обстоятельства: 1) то, что угловые размеры Луны часто бывают несколько больше угловых размеров Солнца; 2) то, что новолуния могут наступать в те моменты, когда Солнце, Луна и Земля лежат на одной прямой линии. Если бы полные солнечные затмения не происходили, то без преувеличения можно сказать, что наши знания о короне были бы более чем скудны. Полные затмения Солнца видны в узкой полосе, имеющей обычно ширину не более 200 км и протяженность в несколько тысяч километров, которую вычерчивает лунная тень на поверхности Земли. Такая полоса занимает около  $1/1000$  доли земной поверхности, чем и объясняется редкость наблюдений полных затмений людьми, специально не стремящимися в полосу полной фазы. Несмотря на сложный характер движения Луны, солнечные затмения могут быть предсказаны современной небесной механикой за 10 лет с точностью до нескольких секунд по времени и до нескольких сотен метров по положению. Большая часть (примерно  $2/3$ ) солнечных затмений — частные, т. е. для земного наблюдателя, независимо от его расположения, лунный диск закрывает лишь часть Солнца. Легко понять, что вне полосы полного затмения оно будет наблюдаться как частное.

На XX век приходится 216 солнечных затмений, т. е. в среднем немногим более двух затмений в год. Из них лишь около  $1/3$  — полные и, следовательно, пригодные для наблюдений короны. За один год может произойти

максимум пять солнечных затмений, но в этом случае они все будут частными; минимальное число солнечных затмений в году — два, и они оба могут быть полными. Два полных затмения в XX веке было в 1912 г. (17 апреля и 10 октября), они длились соответственно 1,6 с и 2 мин. Такой случай в этом веке уже не повторится. Полное затмение длится недолго, всего несколько минут. Максимальная продолжительность полного затмения может достигнуть величины, несколько большей 7 мин (в XX веке таких затмений уже было три и еще будет одно — 11 июля 1991 г.).

С начала века до настоящего времени общая продолжительность полной фазы всех затмений составляет немногим более четырех часов; до конца века эта же цифра составит чуть более одного часа. Если учесть плохую погоду (при которой оптические наблюдения невозможны) в районах расположения научных экспедиций, то время, отведенное природой на изучение короны на затмениях, уменьшится почти вдвое.

Подготовка экспедиции для наблюдения солнечного затмения прежде всего состоит в составлении программы научных исследований и в конструировании аппаратуры для наблюдений. Последовательность действий наблюдателей во время затмения рассчитывается с точностью до секунды. Наблюдения обычно ведутся под счет секунд, который предварительно записывается на магнитофон. По непредвиденным обстоятельствам — плохая прозрачность атмосферы, выход из строя деталей аппаратуры и т. п. — приходится «на ходу» менять программу, что требует от наблюдателей большого опыта и самообладания. Сплошная облачность во время полной фазы сводит на нет все усилия по подготовке наблюдений.

Несмотря на это, как говорится, «игра стоит свеч», и трудно переоценить тот прогресс в астрофизике Солнца, который связан с наблюдениями солнечных затмений. Это, видимо, уже понятно читателю, поскольку при изложении предыдущих разделов автор не раз ссылался на те или иные важные результаты, полученные на основании затменных наблюдений.

Для исследования переменных явлений в короне часто используют материалы, полученные в различных точках полосы полной фазы. Таким образом, можно провести наблюдения короны, разделенные интервалом вре-

мени в 1—2 час. Удачная попытка такого рода была осуществлена советскими астрономами во время затмения 19 июня 1936 г., полоса которого проходила в основном по территории СССР. Наблюдения, организованные С. К. Всехсвятским, Е. Я. Бугославской и А. Н. Дейчем, состояли в получении фотографий короны с помощью 6 совершенно одинаковых камер (с фокусными расстояниями в 5 м), расположенных вдоль полосы затмения так, что корону можно было наблюдать на протяжении двух часов. Изучение снимков короны, полученных в четырех пунктах, где была ясная погода, позволило установить скорости движения вещества в короне, подтвердить факт вращения короны вместе с Солнцем и сделать ряд других интересных выводов.

В последние годы с появлением сверхзвуковых самолетов, скорость которых достигает скорости движения лунной тени по земной поверхности, открылась новая возможность непрерывного наблюдения солнечной короны за полный промежуток времени попадания лунной тени на Землю.

Для неподвижного наблюдателя, находящегося в полосе полной фазы, продолжительность полного затмения определяется размерами лунной тени и скоростью ее перемещения  $v_0$ . Если наблюдатель будет двигаться вслед за тенью со скоростью  $v$ , то продолжительность полной фазы будет увеличена для него в  $v_0/(v_0 - v)$  раз. Когда  $v$  не отличается от  $v_0$ , получается «бесконечно большое» увеличение, но все-таки существует предел, который накладывается тем, что время попадания лунной тени на земную поверхность ограничено. Удачные наблюдения с борта англо-французского сверхзвукового самолета «Конкорд» были проведены во время затмения 30 июня 1973 г. Самолет пролетел вдоль большей части полосы полной фазы, и наблюдатели могли изучать корону в течение почти полутора часов (об одном из результатов этого эксперимента, проведенного Кучми, упоминалось выше). Кроме этого, преимуществом подобных наблюдений является гарантия безоблачной погоды, и особенно — темное небо, так как сверхзвуковой самолет летит в стратосфере. Есть и существенные недостатки — необходимость наблюдения сквозь стекла иллюминаторов и трудности, связанные с установкой аппаратуры на вибрирующей и меняющей ориентировку основе.

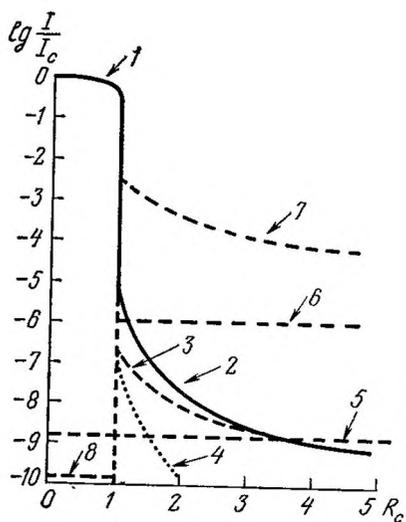


Рис. 11. Сравнительные яркости короны и неба. По оси ординат — яркость в логарифмическом масштабе, причем яркость центра солнечного диска (1) принята за единицу; 2 — яркость короны: электронная составляющая плюс фраунгоферова компонента, которая дана также отдельно (3); 4 — излучение в линиях; 5 — чистое небо в середине полной фазы солнечного затмения; 6 — идеальное голубое небо, лишь высоко в горах, при полном отсутствии пыли и влаги в воздухе, реальное небо приближается к этой идеализации; 7 — ясное небо с дымкой (с ореолом); 8 — свет от Земли, видимый во время полного затмения на диске Луны, вне затмения этот свет известен под названием «пепельного», он виден на неосвещенной Солнцем части Луны при очень узком серпе.

**Внезатменный коронограф.** Важная роль затмений в исследовании Солнца и простая геометрическая сущность этих явлений, известная человечеству со времен Гиппарха<sup>1</sup> (великого греческого астронома II века до н. э.), давно уже привели ученых к мысли об осуществлении искусственных затмений Солнца. На рис. 11 даны яркости короны и неба вне и во время полного солнечного затмения. Рассматривая этот рисунок, можно заключить, что наблюдения короны возможны и вне затмения, по крайней мере ее самых внутренних областей. Однако проблема оказалась чрезвычайно сложной. Многочисленные попытки наблюдать корону, экранируя диск Солнца искусственной «луной», помещаемой в фокальной плоскости телескопа, терпели неудачу. Решение проблемы было найдено французским ученым Лию в 1930 г. Он тщательно изучил ис-

<sup>1</sup> Любопытно, что Лукреций Кар, живший на столетие позже Гиппарха, подвергал сомнению объяснение последних затмений.

«Ибо копь может Луна от Земли загораживать Солнцу Свет и на небе главу возвышать между ним и Землею, Темный свой выставив диск навстречу лучам его жарким, Разве нельзя допустить, что на то же способно иное Тело, что может скользить, навеки лишенное света? Иль почему же нельзя, чтоб теряло огни, угасая, Солнце в положенный срок и сызнова свет возрождало ».

точники рассеянного света, создающего сильный фон в инструменте. Наблюдения прежде всего должны проводиться при исключительно ясном «безореольном» небе. Яркость неба обычно сильно возрастает с приближением к солнечному краю, т. е. имеется ореол. Этот рост обусловлен рассеянием солнечного света на пылевых частицах, водяных каплях и кристаллах льда, содержащихся в атмосфере. Выбор места наблюдений высоко в горах существенно увеличивает количество безореольных дней, в некоторые часы снижая яркость неба вблизи Солнца до нескольких миллионных долей величины яркости солнечного диска (хорошими для наблюдений короны считаются значения в десятки миллионных долей).

Лио выбрал место во французских Пиренеях на высоте 2900 м, теперь это известная обсерватория Пик-дю-Миди. Особое внимание Лио обратил на рассеяние солнечного света в объективе инструмента. Источниками рассеянного света являются: царапины, пыль на поверхностях объектива, неоднородные отклонения поверхности от заданной формы (дефекты полировки); внутренние неоднородности стекла (так называемые «свилы») и воздушные пузыри; многократные отражения света от оптических поверхностей; дифракция света на краях объектива. Для того чтобы свести к минимуму роль этих источников, Лио использовал в качестве объектива плоско-выпуклую линзу, изготовленную из однородного стекла с тщательно отполированными поверхностями, сконструировав телескоп специального типа — коронограф. Схема коронографа Лио приведена на рис. 12. Главный объектив  $O_1$  строит изображение Солнца на искусственной «луне», представляющей собой полированный металлический конус, обращенный вершиной к объективу. Диаметр основания конуса немного больше диаметра изображения Солнца. Искусственная «луна»  $M$  отражает солнечный свет так, что он не попадает назад на объектив. Непосредственно за «луной» расположена весьма существенная деталь коронографа — линза поля  $L$  с фокусным расстоянием, раз в 10 меньшим, чем у главного объектива. Линза поля строит изображение главного объектива на диафрагме  $D$ , экранирующей яркое кольцо, образованное дифрагированным светом. За диафрагмой  $D$  расположен объектив  $O_2$ , который «переносит» изображение окружающих Солнце участков неба и короны на фотографическую пластинку или щель

спектрографа. В плоскости диафрагмы можно также поместить небольшие экранчики, закрывающие светлые точки, возникающие в результате рассеяния на имеющихся пузырьках и царапинах. Лио в своей схеме помещал в центре диафрагмы небольшой экран, закрывающий яркую точку, образующуюся при отражении солнечного света от поверхностей объектива. Требования,

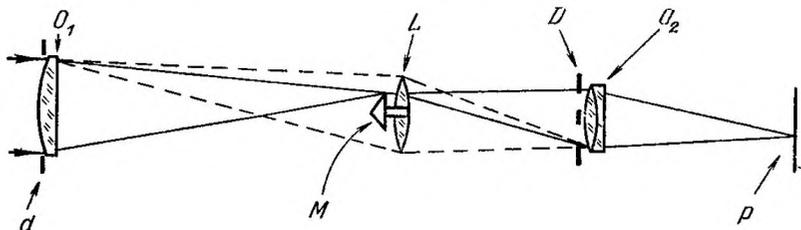


Рис. 12. Схема коронографа Лио.  $O_1$  — главный объектив, входное отверстие которого ограничено диафрагмой  $d$ ;  $M$  — искусственная «луна», представляющая собой полированный металлический конус, отражающий солнечный свет в стороны;  $L$  — линза поля, строящая изображение главного объектива в плоскости диафрагмы  $D$  (пунктиром показан ход лучей, дифрагированных на верхней части оправы объектива). Возникающее от всей оправы дифракционное кольцо задерживается диафрагмой  $D$ , в центре которой небольшой экран закрывает блик, получающийся после двукратного отражения солнечных лучей от поверхностей главного объектива. Перестраивающая линза  $O_2$  «переносит» изображение неба и короны, проходящее мимо «луны», в плоскость фотопластинки или щели спектрографа  $P$ . Ход лучей от одной из точек внутренней короны показан сплошными линиями.

предъявляемые к линзе поля и перестраивающему объективу, не высоки. Для хорошего объектива практически весь рассеянный свет определяется дифракционным кольцом, обусловленная им интенсивность фона в фокальной плоскости коронографа на расстоянии  $0,05—0,1 R_c$  от края изображения «луны» составляет примерно  $1/1000$  яркости Солнца. При особо тщательной подготовке 10-сантиметрового объектива Лио удавалось снижать яркость фона от рассеянного света до  $1—2$  миллионных долей яркости Солнца. Количество рассеянного света зависит от диаметра объектива (очевидно, что оно растет немного быстрее, чем квадрат диаметра)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> По исследованиям А. А. Сазанова и автора, 50-сантиметровый объектив большого коронографа ИЗМИРАН-ГАО дает рассеянный свет около  $6 \cdot 10^{-6}$  от яркости солнечного диска.

Однолинзовый объектив обладает значительной хроматической аберрацией, т. е. его фокусные расстояния для излучения разных длин волн различны. Это не является препятствием для наблюдений короны, так как наблюдения для увеличения контрастности проводятся в свете одной из наиболее ярких корональных линий (обычно зеленой или красной), т. е. практически в монохроматическом свете (излучении в одной длине волны). Вблизи края Солнца эквивалентная ширина зеленой корональной линии составляет десятки и может достигать сотен ангстрем. Это значит, что применение узкого монохроматического фильтра с шириной полосы пропускания в  $1-2\text{\AA}$  (напомним, что ширина зеленой линии около  $1\text{\AA}$ ) может повысить контрастность наблюдаемого излучения короны по отношению к фону неба в десятки раз. Конструкция такого фильтра была изобретена Лио, а сам фильтр изготовлен независимо друг от друга тремя исследователями — Лио, Эманом и Эвансом<sup>1</sup>.

Внезапные наблюдения короны в непрерывном спектре со времени Лио никому не удавалось провести; Лио несколько раз (в 1931 г.) получал фотографии короны через широкий красный фильтр, что до сих пор вызывает восхищение исследователей короны. К сожалению, Лио постигла преждевременная кончина после проведения им наблюдений солнечного затмения 25 февраля 1952 г., при которых Лио получил блестящие спектрограммы короны, содержащие массу новых корональных линий.

В 1966 г. в СССР был изготовлен самый крупный в мире внезапный коронограф, имеющий 53-сантиметровый объектив с фокусом 8 м. Оптическая схема и основы механической конструкции инструмента разработаны автором совместно с А. А. Сазановым. Коронограф установлен на Горной астрономической станции Пулковской обсерватории, и наблюдения проводятся сотрудниками Горной станции и лаборатории солнечной активности ИЗМИРАН.

К настоящему времени изготовлено еще 6 аналогичных инструментов: два установлены в Мондах (Саяны), в Иркутской обсерватории, и по одному близ Алма-Аты

---

<sup>1</sup> В СССР подобный «интерференционно-поляризационный» фильтр впервые был изготовлен А. Б. Гильваргом и А. Б. Северным.

(Горная обсерватория Астрофизического института), в Венгрии (Дебреценская обсерватория на уровне моря), в Абастуманской обсерватории Грузинской академии наук (высота 1600 м), а также один инструмент будет установлен в горах Азербайджана (солнечная станция Азербайджанской академии наук). Два крупных коронографа с объективами диаметром 40 см и фокусными расстояниями 8 м имеются в США: горные обсерватории Клаймакс и Сакраменто-Пик.

Крупные коронографы дают возможность детально исследовать особенности внутренней короны и хромосферы при большой пространственной разрешающей способности (одна секунда дуги и лучше). В настоящее время решение многих вопросов солнечной короны требует изучения ее тонкой структуры.

Еще в 1930-годах Лио удавалось наблюдать линии излучения короны и на уровне моря (в Медонской обсерватории, расположенной в пригороде Парижа). При этом главным источником рассеянного света являлось небо, со значительным околосолнечным ореолом, каким оно всегда бывает на уровне моря. Ясно, что для таких наблюдений уже не предъявляется исключительно высоких требований к коронографу. В связи с этим советскому астроному И. А. Прокофьевой начиная с 1956 г. удалось получать спектры красной и зеленой корональных линий в Пулковской обсерватории (близ Ленинграда). И. А. Прокофьева упростила схему Лио, исключив линзу поля и перестраивающий объектив. Роль «луны» в ее коронографе выполняла щель спектрографа, одна из полированных щечек которой отражала яркий свет солнечного диска. Вместо линзы поля использовалось зеркало спектрографа (так называемое коллиматорное зеркало), превращающее расходящийся из щели пучок света в параллельный. Диафрагмой Лио служила оправа дифракционной решетки, которая в спектрографе служит для разложения белого света в спектр. Преимуществом коронографа Прокофьевой является уменьшение числа оптических деталей по сравнению с коронографом Лио, а недостатком — существенно большее количество рассеянного света, возникающее, главным образом, из-за невозможности полного экранирования «дифракционного кольца» в изображении объектива. Дело в том, что после прохождения через узкую щель спектрографа пучков света от объектива, вследствие

дифракции изображение объектива становится не резким, размытым, и полное экранирование «дифракционного кольца» невозможно без существенных потерь количества света. Специальное исследование, проведенное А. А. Сазановым и автором, показало справедливость этих замечаний.

В 1959 г. коронограф типа Прокофьевой с некоторыми модификациями оптики и механики (Г. С. Иванов-Холодный и автор) был построен и успешно применен для наблюдений короны и, главным образом, хромосферы и протуберанцев. Инструмент был установлен в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн под Москвой.

Очевидно, что коронографы типа Прокофьевой нецелесообразно применять в условиях хорошего неба при его яркости вблизи Солнца, меньшей  $10^{-4} - 10^{-5}$  (в относительных единицах яркости Солнца). Инструменты такого типа, однако, из-за своей относительно простой конструкции удобны для наблюдений спектров самых нижних слоев солнечной атмосферы — хромосферы, протуберанцев и, особенно, ярких эмиссионных линий короны. В этом отношении они значительно лучше солнечных зеркальных телескопов. Заметим, что коронографы упрощенной схемы могут применяться только для наблюдений спектров, а в том случае, когда необходимо исследовать изображение короны, нужен классический коронограф Лио.

**Коронограф с «внешним затмением».** В коронографе Лио искусственное затмение осуществляется внутри инструмента, после построения изображения Солнца. Если поместить перед объективом телескопа непрозрачный диск, чтобы он «затенил» объектив от прямых солнечных лучей, то можно существенно снизить рассеянный свет. Однако при этом свет, идущий из точек, расположенных на малом угловом расстоянии от Солнца, попадает лишь на небольшую часть объектива, представляющую собой кольцо вдоль оправы. Относительная ширина этого кольца определяется угловым расстоянием исследуемой области короны от Солнца, линейным расстоянием диска от объектива  $l$  и диаметром последнего  $d$ . Весь объектив будет освещаться излучением, идущим от точки, удаленной на угол  $\alpha$  от края Солнца, причем  $\alpha \approx d/l$ . На объектив попадет также солнечный

свет, дифрагированный на краю внешнего диска. Интенсивность дифрагированного излучения будет составлять около  $10^{-3}$  по отношению к яркости солнечного света, падающего на диск вблизи края объектива. Используем теперь в качестве телескопа коронограф Лио, рассеянный свет в котором может составлять  $10^{-6}$ — $10^{-5}$  от яркости освещающего объектив источника. Таким образом, мы будем иметь коронограф, в котором рассеянный свет весьма мал, около  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  (в относительных единицах). Вспомним, что эта величина в 1000 раз меньше яркости идеального горного неба. Подобный коронограф с «внешним затмением» был предложен Лио, а в 1964 г. сконструирован в США Ньюкиркком и Болином. Для того чтобы уменьшить количество света, дифрагированного на внешнем диске, использовались несколько дисков, стоящих один за другим. Расчеты показывают, что ставить более трех дисков не имеет смысла, так как дальнейшее увеличение их числа не уменьшает интенсивность дифрагированного света, попадающего на объектив. Кроме того, были применены различные методы так называемой «апподизации», т. е. уменьшения количества дифрагированного света. Например, если край диска сделать зубчатым (зубцы, конечно, делаются достаточно мелкими по сравнению с размерами диска), то направление дифрагированных лучей меняется так, что часть их проходит мимо объектива.

Столь малый инструментальный рассеянный свет в коронографе «с внешним затмением» делает целесообразным его применение для наблюдений короны с борта космических аппаратов или аэростатов, т. е. при малой интенсивности излучения неба. Наблюдения с аэростата производились французским астрономом Дольфюссом с его сотрудниками (1971 г.), а в космосе — американскими исследователями с борта орбитальной обсерватории «Скайлэб». Существенным недостатком коронографа «с внешним затмением» являются малые по необходимости размеры объектива (малые диаметр и фокусное расстояние), снижающие его разрешающую способность. Это связано с тем, что при допустимых размерах всего прибора в целом расстояние затмевающих дисков до объектива должно быть существенно большим по сравнению с его фокусным расстоянием. Коронограф «с внешним затмением», сконструированный Ньюкиркком и Болином, имел главный объектив диаметром 33 мм и фо-

кусным расстоянием, равным 35 см, расстояние «луны» до объектива составляло 2,3 м.

Проблема дальнейшего усовершенствования коронографов с весьма малым рассеянным светом в настоящее время особенно важна в связи с развитием астрономических наблюдений в космических условиях, где яркость неба существенно ниже, чем во время полных солнечных затмений на Земле ( $<10^{-9}$  по отношению к яркости Солнца).

**Искусственное затмение в космосе.** Возможно, у читателей возник вопрос: если дифракция на внешнем диске, затмевающем объектив коронографа, играет существенную роль в создании рассеянного света, то почему дифракция на видимом краю Луны не мешает наблюдать корону во время настоящих полных затмений? Все дело в очень большом расстоянии экрана—Луны—от наблюдателя. Дифракция характеризуется некоторым количеством света, отклоняющимся на краю препятствия на определенный угол. При малом расстоянии препятствия от наблюдателя дифрагированный свет распределится на небольшую площадь, и его яркость будет ощутима; с увеличением расстояния яркость будет падать, так как ширина полосы, в которую попадает дифрагированный свет, будет расти пропорционально расстоянию.

Пользуясь этим обстоятельством, автор совместно с сотрудником Института космических исследований АН СССР А. И. Симоновым предложил эксперимент, который планируется осуществить летом 1975 г. при совместном полете американского и советского космических кораблей «Аполлон» и «Союз». Корабль «Аполлон», имеющий форму цилиндра (поперечное сечение—круг), будет играть роль Луны, а с корабля «Союз» будет производиться съемка искусственного солнечного затмения. После стыковки движущиеся вокруг Земли космические корабли перед выходом из земной тени, т. е. перед восходом Солнца для космонавтов, будут ориентированы вдоль прямой, направленной на Солнце, и начнут растыковку так, чтобы «Аполлон» удалялся от «Союза» по направлению к Солнцу, затмевая его для наблюдателей на «Союзе». Диаметр «Аполлона» около 4 м, поэтому затмение будет продолжаться при условии правильной ориентировки кораблей вплоть до расстояния в 300 м. По мере увеличения расстояния между корабля-

ми будут открываться все более внутренние части короны. Важно, что расстыковка будет производиться непосредственно перед восходом Солнца, когда почти вся видимая космонавтами поверхность Земли будет темной. В этом случае «земной свет», освещающий «Аполлон» и иллюминатор «Союза», будет слабым и не помешает наблюдениям. По расчетам, затмение продлится около 5 мин, в течение которых будет сделан ряд снимков с различными выдержками. Осуществление искусственного солнечного затмения — как и других, планирующихся при совместном полете экспериментов, — возможно лишь в результате большой работы различных ученых и специалистов.

**К-коронومتر.** Наблюдения короны в «белом» свете (в непрерывном спектре) могут осуществляться с использованием фотоэлектрических методов. Известно, что современная электроника позволяет выделять переменный (модулированный) сигнал на фоне относительно большого (большого в десятки тысяч раз) постоянного сигнала. Этот принцип был применен французскими астрономами Влериком и Акстеллом в 1957 г. для создания «К-коронметра». Этот прибор, как показывает само название, служит для измерения К-составляющей короны вне затмения, а более точно — для измерения поляризованной части К-составляющей. Влерик и Акстелл использовали то, что степень поляризации неба вблизи Солнца весьма мала, а поляризация излучения короны — высока. Модулируя поляризованную часть излучения короны специальным анализатором (электрооптическим кристаллом, меняющим под действием приложенного к нему переменного напряжения свои поляризационные свойства), Влерик и Акстелл смогли записать, регистрируя модулированный сигнал электронным фотумножителем, интенсивность поляризованной части коронального излучения вдоль концентрических Солнцу кругов на различном расстоянии в короне. Аналогичные приборы теперь работают также и в США. С помощью К-коронметра можно «видеть» корону до больших (1—2  $R_c$ ) расстояний, прослеживая структурные особенности и, что особенно важно, развитие их во времени.

**Радиальный фильтр.** Яркость свечения короны быстро падает с расстоянием, меняясь в тысячи раз при переходе от самой внутренней короны ко внешней (>4  $R_c$ ). Поэтому при наблюдениях во время затмений

нельзя на одной фотографии получить изображение короны, пригодное для фотометрического исследования в широком интервале расстояний. Обычно на негативе хорошо регистрируется изображение, яркость отдельных деталей которого отличается не более чем в 10—100 раз. Для получения изображения внутренних и внешних частей короны на одном снимке применяют так называемый радиальный нейтральный фильтр. Поглощение света таким фильтром зависит только от расстояния до его центра. Фильтр представляет собой плоское стекло (расположенное непосредственно перед фотопластинкой), на которое в вакууме «напыляется» слой алюминия переменной толщины. В центре фильтра имеется круг без «напыления», точно совмещаемый с изображением Солнца; за пределами этого круга толщина «напыленного» слоя алюминия меняется так, чтобы прошедший сквозь него свет ослабевал с приближением к краю Солнца примерно по такому же закону, по которому растет яркость короны. Изготовление подобного фильтра связано с некоторыми техническими трудностями: для того чтобы сохранялась однородность пропускания фильтра на постоянном расстоянии от его центра, приходится при «напылении» вращать его, а для получения нужного изменения пропускания с расстоянием — постепенно удалять фильтр от распылителя. На полученных через радиальный фильтр photographиях хорошо видна лучистая структура короны, так как яркость вдоль лучей падает с расстоянием медленнее, чем яркость «диффузной» короны. Радиальные фильтры использовались и в СССР (П. В. Щеглов, ГАИШ). Особенно широко их используют французские астрономы, которые впервые применили радиальные фильтры и достигли выдающихся результатов (Лафиньер, Кучми).

**Искусственное затмение близ Луны.** Все большее применение находят космические методы исследования короны. О некоторых из них упоминалось выше. Большой интерес представляют наблюдения короны с селеноцентрической (околорунной) орбиты. Для космического корабля в этом случае весьма часто будет происходить затмение Солнца — при его восходе и заходе. Совершенно темное небо позволяет наблюдать самые внешние части короны, переходящие в зодиакальный свет.

Подобные наблюдения, фотографические и визуальные, проводились американскими астронавтами на кос-

мических кораблях «Аполлон». В частности, командир «Апполлона-17» Ю. Сернан наблюдал зодиакальный свет и внешнюю корону при малых угловых погружениях Солнца за лунный горизонт. Наиболее интересное явление, отмеченное астронавтами, — наличие прямолинейных узких лучей, выходящих из-под горизонта от Солнца и проецирующихся на зодиакальный свет. Они наблюдались до расстояний в  $20^\circ$ .

По мнению автора, эти лучи относятся к чисто электронной короне и представляют собой корпускулярные потоки. Другая точка зрения состоит в том, что эти лучи отождествляются с неоднородностями зодиакального света, т. е. состоят из пыли.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Физические свойства солнечной короны</b>	3
Непрерывное излучение	3
Излучение в линиях	5
Теория спектров	6
Отождествление линий	8
Жесткое излучение короны	11
Химический состав	15
Причины образования короны	18
Температура корональных областей	21
<b>Фраунгоферова составляющая короны и зодиакальный свет</b>	23
Две составляющие непрерывного излучения короны	23
Связь короны и зодиакального света	26
Электроны во внешней короне	30
Пыль в короне?	33
Поляризация излучения короны	34
Аномальная поляризация	39
<b>Структура короны и корпускулярное излучение</b>	41
Исследования структуры	41
Корпускулярные потоки	45
Тепловая диссипация	47
«Солнечный ветер»	48
<b>Методы исследования</b>	51
Солнечные затмения	51
Внезатменный коронограф	54
Коронограф с «внешним затмением»	59
Искусственное затмение в космосе	61
К-коронометр	62
Радиальный фильтр	62
Искусственное затмение близ Луны	63

11 коп.

Индекс 70101