

кристаллическую структуру, состоящую из вертикальных цепочек пылинок. Значительная часть современных экспериментальных и теоретических работ по пылевой плазме посвящена изучению свойств этого пылевого кристалла.

В заключение отмечу, что за последнее время физика пылевой плазмы стала в значительной степени междисциплинарной наукой. Если еще несколько лет назад считалось допустимым рассматривать пылевую плазму как многокомпонентную с дополнительным сортом частиц, в настоящее время понятно, что существенную роль играют эффекты, которые традиционно изучались физикой аэрозолей и физической химией. Кроме того, в лабораторных условиях аномально большую роль, по сравнению с традиционной плазмой, играет гравитационное поле Земли. В этом отношении богатый урожай данных можно ожидать от планируемых на борту Международной космической станции экспериментов с пылевой плазмой, а также от приближающегося к Сатурну аппарата "Кассини".

Список литературы

1. Langmuir I, Found G, Ditter A *Science* **60** 392 (1924)
2. *Dusty and Dirty Plasmas, Noise, and Chaos in Space and in the Laboratory* (Ed. H Kikuchi) (New York: Plenum Press, 1994)
3. Цытович В Н *УФН* **167** 57 (1997)
4. Нефедов А П, Петров О Ф, Фортвов В Е *УФН* **167** 1215 (1997)
5. Löwen H *Phys. Rep.* **237** 249 (1994)
6. Саранин В А *УФН* **169** 453 (1999)
7. Schram P P J M, Trigger S A *Contrib. Plasma Phys.* **37** 251 (1997)
8. Игнатов А М *Физика плазмы* **22** 648 (1996)
9. LeSage G L *Neuveaux Mémoires de l'Académie Royale* (Berlin) 404 (1782)
10. Розенбергер Ф *История физики* Ч. 3, Вып. 1 (М.-Л.: ГТТИ техн. изд-во НКТП СССР, 1935)
11. Игнатов А М *Краткие сообщ. физ.* (1–2) 58 (1995)
12. Ходатаев Я К и др. *Физика плазмы* **22** 1028 (1996)
13. Tsytoich V N et al. *Comm. Plasma Phys.* **18** 281 (1998)
14. Дубинов А Е и др. *Письма ЖТФ* **25** (13) 73 (1999)
15. Vladimirov S V *Phys. Plasmas* **1** 2762 (1994)
16. Игнатов А М *Физика плазмы* **24** 731 (1998)
17. Schram P P J M et al. *Phys. Rev. E* **63** 016403 (2001)
18. Ignatov A M, Trigger S A, physics/0006072
19. Vladimirov S V, Nambu M *Phys. Rev. E* **52** R2172 (1995)
20. Melandsø F, Goree J J. *Vac. Sci. Technol. A* **14** 511 (1996)

PACS numbers: 95.75.Kk, 96.50.Dj, 96.60.Pb

Наблюдения резонансного свечения атомов в областях сублимации твердого вещества в ближнем околосолнечном пространстве

Р.А. Гуляев, П.В. Щеглов

1. Во время полного солнечного затмения 12 декабря 1871 г. Пьер Жансен впервые визуально обнаружил темные фраунгоферовы линии в спектре солнечной короны. Через 12 лет, во время затмения 1883 г., он успешно сфотографировал фраунгоферов спектр короны. Исследовав полученные спектрограммы, Жансен пришел к выводу, что в определенных областях короны присутствует вещество в форме твердых частиц, отражающих солнечный свет [1].

7 УФН, т. 171, № 2

Важную роль в исследовании фраунгоферова спектра короны сыграли спектрограммы, полученные Людендорфом во время затмения 10 сентября 1923 г. Выполнив фотометрическую обработку спектрограмм, Гротриан [2] разделил спектр короны на две составляющие: 1) непрерывный спектр без линий поглощения (К-корона) и 2) фраунгоферов спектр, полностью подобный спектру Солнца (F-корона). Через несколько лет было введено обозначение еще для одной составляющей коронального спектра: совокупность корональных эмиссионных линий стали обозначать как E-корона.

Гротриан высказал серьезные аргументы в пользу общей пылевой природы F-короны и зодиакального света. Но вызывала сомнение возможность существования твердых пылевых частиц на близких расстояниях от Солнца. В 1929 г. Рассел показал, что вследствие испарения пылевых частиц в ближнем околосолнечном пространстве вокруг Солнца должна существовать беспылевая зона с радиусом порядка $4R_{\odot}$. При наличии беспылевой зоны радиальное распределение яркости F-короны должно, очевидно, иметь максимум на некотором расстоянии от Солнца. Между тем, затменные наблюдения указывают на монотонное уменьшение яркости F-короны во всем интервале гелиоцентрических расстояний от приблизительно $1,1R_{\odot}$ до нескольких десятков R_{\odot} .

Проблема была решена Алленом [3] и Ван-де-Холстом [4], которые показали, что определяющая роль в формировании излучения F-короны принадлежит дифракции на частицах размером 10–100 мкм, расположенных в межпланетном пространстве между Солнцем и Землей. Индикатриса дифракционного рассеяния на таких частицах сильно вытянута в направлении падающего света, поэтому в формировании наблюдаемой F-короны участвует только пыль, находящаяся на расстояниях более $20R_{\odot}$ от Солнца. Отсюда следует, что самая внутренняя часть межпланетного пылевого облака ($r < 20R_{\odot}$) недоступна для наблюдений обычными, традиционными средствами, например, путем фотографирования короны в белом свете.

2. Но есть другие возможности исследования внутренних областей межпланетного пылевого облака, не зависящие от механизма рассеяния излучения. Прежде всего, это регистрация собственного теплового излучения нагретой пыли в инфракрасной области спектра. Петерсон [5] теоретически предсказал существование подобного излучения в виде эмиссионного кольца на расстоянии приблизительно $4R_{\odot}$ вокруг Солнца. Во время затмения 12 ноября 1966 г. Петерсон [6] и Мак Квин [7] действительно обнаружили пик излучения с $\lambda \approx 2,2$ мкм на расстоянии примерно $4R_{\odot}$ от Солнца. Так была открыта еще одна составляющая коронального излучения, названная T-коронной.

Впоследствии другие наблюдения как с Земли (во время затмений), так и с баллонов и ракет подтвердили наличие максимума яркости на расстоянии приблизительно $4R_{\odot}$ на различных длинах волн от 2 до 10 мкм. Отмечались также пики яркости на других гелиоцентрических расстояниях от 3,5 до $10R_{\odot}$. С другой стороны, в ряде случаев, например, во время затмений 1980 и 1991 гг. инфракрасные наблюдения не выявили никаких признаков повышенного теплового излучения на расстояниях вплоть до $15R_{\odot}$ от Солнца. Более того, во время

затмения 11 июня 1983 г. был обнаружен интенсивный пик ИК-излучения к западу от Солнца при полном отсутствии повышенного излучения в восточной части короны. Стало ясно, что мы имеем дело с дискретными нестационарными пылевыми образованиями в ближнем околосолнечном пространстве. Кучми и Лами [8] высказали предположение, что F-корона представляет собой суперпозицию квазистационарной "далекой" короны (в соответствии с теорией Аллена и Ван-де-Холста) и переменной "локальной" короны. При этом переменность "локальной короны" может быть связана, например, с кометами, близко приближающимися к Солнцу.

3. Очень перспективным представляется другой путь исследований самых внутренних областей межпланетного пылевого облака, пока еще не получивший широкого распространения. Это регистрация резонансного излучения атомов и низкозарядных ионов, освобождающихся при сублимации пылевых частиц. Именно резонансные линии могут быть наиболее надежными индикаторами процесса сублимации твердого вещества вблизи Солнца. По-видимому, впервые на это обратила внимание Шестакова [9]. Она рассчитала ожидаемые интенсивности ряда резонансных линий металлов на гелиоцентрическом расстоянии $6R_{\odot}$ и нашла, что наиболее предпочтительными для первых поисковых наблюдений являются линии ионизованного кальция *H* и *K*.

Вообще, присутствие в спектре короны эмиссионных линий *H* и *K* неоднократно отмечалось многими наблюдателями, начиная с затмения 17 мая 1882 г. (наблюдения А. Шустера). Но эти линии совпадали по λ с соответствующими хромосферными линиями, т.е. не имели доплеровского смещения. В большинстве случаев они были обусловлены рассеянием излучения хромосферы и протуберанцев в земной атмосфере. Для линий же, связанных с сублимацией пыли, следует ожидать значительных доплеровских смещений, вызываемых движением пылевых частиц вдоль луча зрения. Действительно, кеплеровская скорость кругового орбитального движения составляет, например, около 140 км/с на расстоянии $10R_{\odot}$ и приблизительно 200 км/с — на расстоянии $5R_{\odot}$ от Солнца. При таких скоростях вдоль луча зрения доплеровские смещения в области линий *H* и *K* равны 2 \AA и 3 \AA соответственно.

Для поиска резонансных эмиссий Ca II во время солнечных затмений в ГАИШ МГУ была разработана и изготовлена портативная интерферометрическая установка на базе эталона Фабри–Перо. Установка позволяет фотографировать околосолнечный участок неба диаметром до 20° (приблизительно $80R_{\odot}$) в области резонансной линии *K* [10]. Во время затмения 26 февраля 1998 г. мы провели первые успешные наблюдения с этим прибором [11].

Анализ интерферограммы, полученной во время затмения, показал следующее. Все рабочее поле кадра покрыто интерференционными полосами, соответствующими интерферограмме дневного неба. Такая картина обусловлена свечением неба, связанным с рассеянием солнечного света из полутени затмения. На этом фоне видны эмиссионные детали (фрагменты колец), соответствующие линии *K* с доплеровским смещением. Эмиссионные детали присутствуют в интервале гелиоцентрических расстояний от 5 до $20R_{\odot}$. На рисунке 1 показана схема их расположения на небесной сфере (сплошные

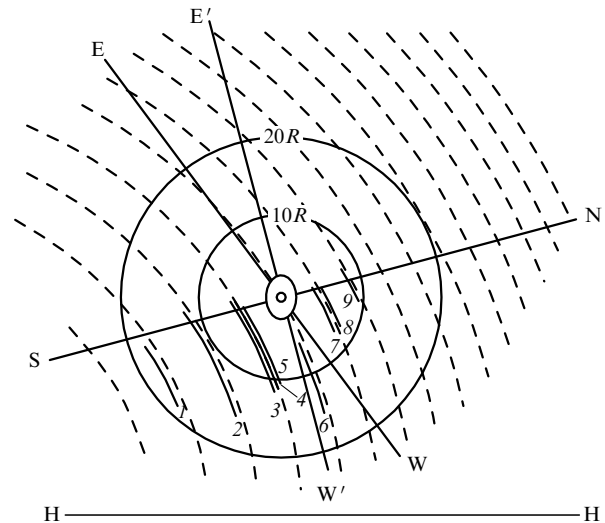


Рис. 1. Расположение эмиссионных деталей на интерферограмме затменного неба 26 февраля 1998 г. Центральный овал соответствует изображению солнечной короны. Штриховые дуги относятся к несмещенной линии *K* в рассеянном свете неба. Короткие сплошные дуги, пронумерованные от 1 до 9, суть эмиссионные детали. NS — направление оси вращения Солнца; EW — суточная параллель; E'W' — направление эклиптики; HN — альмукантарат (линия, параллельная горизонту). Две концентрические окружности соответствуют гелиоцентрическим расстояниям 10 и 20 радиусов Солнца.

короткие дуги, пронумерованные от 1 до 9). Штриховые дуги, пересекающие все поле, относятся к несмещенной линии *K* на интерферограмме дневного неба.

Смещения линии *K* составляют $2,2 - 3,7 \text{ \AA}$, что соответствует лучевой скорости от 170 до 280 км/с с вероятной ошибкой ± 20 км/с (деталь № 4 не смещена). Полученные скорости несколько выше кеплеровских скоростей кругового орбитального движения для рассматриваемой области расстояний; знак доплеровского смещения большинства эмиссионных деталей соответствует направлению орбитального движения планет Солнечной системы.

Наличие больших доплеровских смещений является убедительным аргументом в пользу того, что выявленные спектральные образования суть искомые эмиссии, связанные с сублимацией движущейся пыли. Подобное явление зарегистрировано впервые. По-видимому, можно констатировать обнаружение новой составляющей излучения солнечной короны в дополнение к уже известным K-, E-, F- и T-составляющим. Мы предложили назвать ее S-коронной (от слова sublimation) [12].

Наблюдения, проведенные во время следующего затмения 11 августа 1999 г., подтвердили результаты 1998 г. [13]. На снимке 1999 г. области сублимационного излучения более компактны, чем в 1998 г., а доплеровские смещения соответствуют значительно более высоким лучевым скоростям (порядка 500 км/с). Отмечены как положительный, так и отрицательный знаки доплеровского смещения. Соответствующая схема представлена на рис. 2.

4. Результаты наблюдений солнечных затмений 1998 и 1999 гг. позволяют сделать вывод, что резонансное свечение Ca II с большим доплеровским смещением

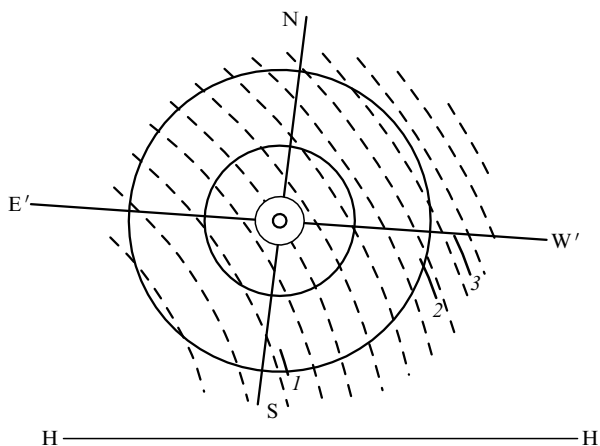


Рис. 2. Расположение эмиссионных деталей на интерферограмме затмленного неба 11 августа 1999 г. Обозначения те же, что и на рис. 1.

(S-корона) не распределено изотропно вокруг Солнца, а локализовано в отдельных, более или менее компактных областях. По-видимому, на гелиоцентрических расстояниях меньше $20R_{\odot}$ однородно распределенная пыль (внутренняя часть зодиакального пылевого облака) практически отсутствует. Вместо этого наблюдаются дискретные спорадические образования, которые могут быть связаны с потоками метеороидов и/или кометами типа *sungrazing*. Такой вывод хорошо согласуется с упомянутым выше предположением Кучми и Лами относительно T-короны.

Недавно Шестакова [14] построила теоретическую модель движения ионов Ca II после их отрыва от родительского тела при сублимации. Наиболее вероятным, согласно [14], является следующий сценарий. В ближнюю околосолнечную область вторгаются каменно-пылевые потоки (метеороиды, миникометы), движущиеся по вытянутым орбитам. В области сублимации образуется газовое облако, которое под действием светового давления отрывается от исходной орбиты и быстро удаляется от Солнца, оставляя область сублимации далеко позади. Следствия из этой модели хорошо согласуются с результатами наших наблюдений [11, 13].

Что касается малых комет типа *sungrazing* (дословно: "задевающие Солнце"), то сейчас известно, что их много. По наблюдениям с космической обсерватории SOHO, находящейся в первой лагранжевой точке либрации на расстоянии 1,4 млн км от Земли и функционирующей с 1996 г., обнаруживается до 50 подобных комет ежегодно. Но на снимках внешней короны, полученных с SOHO в дни затмений 26 февраля 1998 г. и 11 августа 1999 г., кометы, которые могли бы соответствовать нашим эмиссионным образованиям, отсутствуют. По-видимому, в линии кальция мы обнаруживаем более слабые

объекты, чем миникометы, наблюдаемые с SOHO в белом свете. Количество подобных объектов должно быть весьма велико.

5. В настоящее время наблюдательные данные по S-короне ограничиваются только нашими результатами, полученными по одной линии K Ca II. Естественно, наблюдения должны быть распространены на резонансные линии других элементов. Это прежде всего линии Na I D_1 и D_2 и линии Fe I $\lambda = 3720 \text{ \AA}$ и $\lambda = 3860 \text{ \AA}$. Поскольку в метеоритах обычно очень высоко содержание кремния, следует пытаться обнаружить линии этого элемента, например, известную линию Si I $\lambda = 3905 \text{ \AA}$. Далее, фрагменты твердого вещества в межпланетном пространстве должны быть насыщены гелием благодаря захвату α -частиц из солнечного ветра и солнечных космических лучей. Поэтому представляют большой интерес наблюдения линий гелия D_3 ($\lambda = 5876 \text{ \AA}$) и $\lambda = 10830 \text{ \AA}$. Все перечисленные линии доступны для наземных наблюдений в условиях полных солнечных затмений. Очень заманчива задача наблюдений резонансных линий магния, содержание которого на порядок превышает содержание кальция. Это линия Mg I $\lambda = 2852 \text{ \AA}$ и дублет Mg II $\lambda_1 = 2795 \text{ \AA}$ и $\lambda_2 = 2802 \text{ \AA}$. Поскольку область спектра $\lambda \approx 2800 \text{ \AA}$ недоступна для наблюдений с Земли, требуется вынос аппаратуры за пределы земной атмосферы.

Наблюдения эмиссионных линий разных химических элементов дадут, в частности, возможность прямого изучения минералогического состава межпланетной пыли в непосредственной близости от Солнца.

Список литературы

1. Janssen P J C *CR Acad. Sci.* **97** 586 (1883)
2. Grotrian W Z. *Astrophys.* **8** 124 (1934)
3. Allen C W *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **106** 137 (1946)
4. Van de Hulst H C *Astrophys. J.* **105** 471 (1947)
5. Peterson A W *Astrophys. J.* **138** 1218 (1963)
6. Peterson A W *Astrophys. J.* **148** L37 (1967)
7. MacQueen R M *Astrophys. J.* **154** 1059 (1968)
8. Koutchmy S, Lamy P L, in *Properties and Interactions of Interplanetary Dust: Proc. of the 85th Colloq. of the IAU, France, 1984* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 119, Eds R H Giese, P L Lamy) (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1985) p. 63
9. Шестакова Л И *Письма в Астрон. ж.* **16** 550 (1990)
10. Gulyaev R A, Shcheglov P V *ASP Conf. Ser.* **155** 413 (1998)
11. Гуляев Р А, Щеглов П В *Доклады РАН* **366** 199 (1999)
12. Gulyaev R A, Shcheglov P V *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso* **28** 237 (1999)
13. Гуляев Р А и др., в сб. *Структура и динамика солнечной короны: Междунар. конф. по физике Солнца* (Ред. Б П Филиппов) (Троицк: ИЗМИРАН, 1999) с. 56
14. Шестакова Л И, в сб. *Структура и динамика солнечной короны: Междунар. конф. по физике Солнца* (Ред. Б П Филиппов) (Троицк: ИЗМИРАН, 1999) с. 179