Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. (2008) 99–101

УДК 523.62

К ПОИСКУ ОБЛАСТЕЙ СУБЛИМАЦИИ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Р.А. Гуляев

ON THE SEARCH OF SUBLIMATION REGIONS IN THE INTERPLANETARY MEDIUM

R.A. Gulyaev

В ближнем околосолнечном пространстве есть специфическая зона (до ~20 $R_\odot$), где происходят интенсивные процессы сублимации твердого вещества (межпланетная пыль, потоки метеороидов и т. п.). Существует достоверный индикатор процессов сублимации: резонансное излучение освобождающихся атомов и низкозарядных ионов. Из-за крайне малой интенсивности подобного излучения обнаружение областей сублимации при наземных наблюдениях возможно только во время полных солнечных затмений. Такие наблюдения мы проводили во время пяти солнечных затмений, начиная с 1997 г. Излагаются основные результаты наблюдений, обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

In the nearest solar space, there is a specific region (up to ~ 20 $R_\odot$), where intensive processes of sublimation of solid substance (interplanetary dust, meteoroid streams, etc.) take place. The resonance radiation of releasing atoms and low-charge ions is a reliable indicator of sublimation processes. Sublimation regions in ground-based observations can be detected only during total solar eclipses, because of extremely low intensity of such a radiation. These observations have been conducted during five solar eclipses since 1997. Here we present the main findings of the observations and discuss prospects of further investigations.

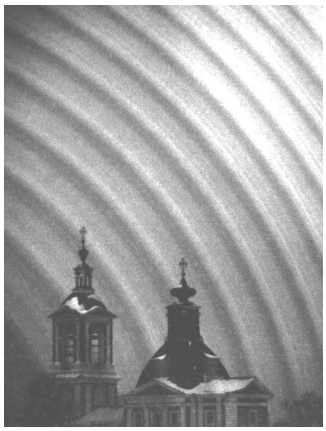
Во время полного солнечного затмения 12 декабря 1871 г. Пьер Жансен впервые обнаружил фраунгоферовы линии поглощения в спектре солнечной короны [1]. Он же первым высказал предположение, что имеет место рассеяние солнечного излучения на твердых частицах, вероятно, присутствующих в некоторых областях солнечной короны. Важную роль в исследовании фраунгоферова спектра короны сыграла спектрограмма, полученная Людендорфом во время затмения 10 сентября 1923 г. В 1934 г. Гротриан [2], обработав эту спектрограмму, разделил спектр короны на две составляющие: 1) непрерывный спектр без линий поглощения (K-корона) и 2) фраунгоферов спектр, в котором линии поглощения имеют такую же глубину, как и в спектре Солнца (F-корона).

Гротриан впервые высказал серьезные аргументы в пользу общей пылевой природы F-короны и зодиакального света. За несколько лет до этого Рассел [3] показал, что все пылевые частицы должны испариться на некотором определенном расстоянии от Солнца, следовательно, вокруг Солнца должна существовать беспылевая зона. Радиус беспылевой зоны обычно принимают равным 4 $R_\odot$, что, согласно Расселу, соответствует температуре испарения ≥2000 K. Очевидно, что на бóльших расстояниях от Солнца должна существовать переходная зона, где происходят интенсивные процессы сублимации твердого вещества и присутствуют как твердые частицы, так и продукты сублимации – атомы и низкозарядные ионы.

Присутствие твердых частиц может быть обнаружено по тепловому излучению в инфракрасной области спектра (T-корона). Подобные наблюдения проводились во время нескольких полных солнечных затмений, начиная с затмения 12 ноября 1966 г. (Peterson [4]; MacQueen [5]). Что касается продуктов сублимации, то надежным индикатором их присутствия должно быть резонансное излучение соответствующих атомов и ионов. Впервые на это обратила внимание Л.И. Шестакова [6]. Она показала, что наиболее предпочтительными для наблюдений являются линии H и K CaII. Отметим, что эмиссионные линии H и K в спектре внутренней короны неоднократно отмечались разными наблюдателями начиная с затмения 17 мая 1882 г. (наблюдения А. Шустера). Но эти линии не имели заметного доплеровского смещения, следовательно, относились к собственно короне или имели инструментальное или атмосферное происхождение. Спектральные линии атомов, освобождающихся при сублимации твердых частиц, должны обладать значительным доплеровским смещением, соответствующим кеплеровским скоростям орбитального движения частиц.

Для поиска резонансного свечения продуктов сублимации П.В. Щеглов (ГАИШ МГУ) предложил использовать интерферометр Фабри–Перо, позволяющий исследовать как спектральные свойства искомых эмиссий, так и пространственное распределение излучающих областей. Им была разработана и изготовлена портативная установка на базе эталона Фабри–Перо для поиска резонансных эмиссий CaII во время солнечных затмений. Установка позволяет фотографировать участок неба диаметром до 20° (~80 $R_\odot$) в области резонансной линии K [7] (см. рисунок).

Во время затмения 26 февраля 1998 г. на острове Гваделупа автор настоящей статьи провел первые успешные наблюдения с этим прибором [8]. Наиболее важные детали на полученной интерферограмме – эмиссионные образования (фрагменты колец), соответствующие линии K с доплеровским смещением. Они присутствуют в интервале гелиоцентрических расстояний от 5 до 20 $R_\odot$. Смещения линии K составляют 2.2–3.7 Å, что соответствует лучевой скорости от 170 до 280 км/с. Наличие больших доплеровских смещений является сильным аргументом в пользу того, что выявленные спектральные образования представляют собой искомые эмиссии, связанные с сублимацией движущейся пыли. Такое явление зарегистрировано впервые. По-видимому, можно констатировать обнаружение новой составляющей излучения солнечной короны (наряду с уже известными K-, E-, F- и T-составляющими). Мы предложили назвать ее S-короной (от слова sublimation) [9]. Интерферометрические наблюдения линии K были затем повторены во время следующих затмений 1999, 2001 и 2006 гг. Получены следующие результаты наблюдений пяти солнечных затмений.



Интерферограмма свечения дневного неба в резонансных линиях CaII.

Наблюдения показали, что резонансное свечение ионов кальция, освобождающихся в результате сублимации твердого вещества, не распределено изотропно вокруг Солнца, как можно было ожидать при экстраполяции свечения зодиакального света, а локализовано в отдельных, сравнительно компактных областях. Это свидетельствует о значительной неоднородности межпланетного пылевого облака на близких расстояниях от Солнца. Можно сказать более определенно: на гелиоцентрических расстояниях меньше ~20 $R_\odot$ однородно распределенная пыль (внутренняя часть зодиакального пылевого облака) практически отсутствует. Вместо этого наблюдаются дискретные спорадические образования (скопления твердых фрагментов).

Наблюдения теплового излучения пыли в инфракрасной области спектра (Т-корона), проводившиеся ранее другими исследователями, также выявили нерегулярный, дискретный характер излучения (см. обзор [10]). Высказывалось предположение об изменчивости состояния околосолнечной пылевой оболочки в зависимости от уровня солнечной активности [11]. Результаты наших наблюдений свидетельствуют о том, что изменчивость состояния твердотельной составляющей вещества около Солнца определяется не вариациями солнечной активности, а спорадическим характером появления потоков твердых частиц вблизи Солнца. Такие потоки могут быть связаны, например, с малыми кометами типа sungrazing, какие регулярно регистрируются приборами LASCO на космической обсерватории SOHO.

Мы получили оценки количества атомов кальция и затем общего количества вещества, подвергшегося сублимации в отдельно взятой дискретной области. Характерное значение общей массы вещества составило $\leq 10^9$ г (1000 тонн). Если рассматривать сублимирующее родительское тело как одиночный камень с плотностью 5 г/см^3, то диаметр такого камня составит $\leq$ 6 м [12].

Во время затмений 21 июня 2001 г. и 29 марта 2006 г. были предприняты попытки обнаружения сублимационного свечения резонансных линий NaI. Использовались такие же интерференционные камеры, как и при наблюдениях линии K. В наблюдениях участвовали сотрудники Астрономической обсерватории Одесского университета (2001 г.), ИЗМИРАН, ГАИШ МГУ и Института астрономии Болгарской академии наук. На полученных интерферограммах эмиссия натрия, которую можно было бы отнести к явлению сублимации, отсутствует (см., например, [13]). Отчасти это можно объяснить наличием интенсивного фона, создаваемого земной атмосферой. Но главная причина заключается в другом: атомы натрия, оторвавшись от родительского тела при сублимации, немедленно ионизуются солнечным УФ-излучением с $\lambda < 2413$ Å. Скорость вторичной фотоионизации существенно меньше, так как для этого требуются жесткие фотоны с $\lambda < 262$ Å. В результате практически весь натрий в областях сублимации оказывается в стадии однократной ионизации (NaII). К примеру, согласно расчетам Шестаковой [6], время жизни нейтральных атомов натрия на ~ 4 порядка меньше времени жизни ионов CaII. В таких условиях рассчитывать на возможность надежной регистрации излучения нейтрального натрия не приходится.

Все сказанное относится и к другим достаточно обильным металлам (магний, железо и т. д.): концентрация нейтральных атомов ничтожно мала, линии же ионов недоступны для наблюдений с Земли. Исключение составляет только кальций. Нейтральные атомы кальция, как и атомы натрия, практически отсутствуют, но зато резонансные линии ионов кальция доступны для наблюдений с Земли, и мы смогли использовать это обстоятельство. Таким образом, при наземных наблюдениях резонансное излучение CaII остается, по существу, единственным доступным источником информации о процессах сублимации в ближнем околосолнечном пространстве. Что касается внеатмосферных исследований, очень заманчива задача наблюдений резонансных линий магния, содержание которого на порядок превышает содержание кальция. Это, прежде всего, дублет MgII λ2795 и λ2802 Å.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Janssen P. J. C. Mission en Oceanie pour l'eclipse totale // Comptes Rendus. 1883. V. 97. 586 p.
2. Grotrian W. Über das Fraunhofersche Spektrum der Sonnenkorona // Zs. f. Astrophysik. 1934. V. 8. P. 124–146.
3. Russell H.N. On meteoric matter near the stars // Astrophys. J. 1929. V. 69. P. 49–71.
4. Peterson A.W. Experimental detection of thermal radiation from interplanetary dust // Ibid. 1967. V. 148. P. L37–L39.
5. MacQueen R.M. Infrared observations of the outer solar corona // Ibid. 1968. V. 154. P. 1059–1076.
6. Шестакова Л.И. Существует ли область резонансного свечения атомов и ионов вокруг Солнца? // Письма в Астрон. ж. 1990. Т. 16. С. 550–-559.
7. Gulyaev R.A., Shcheglov P.V. The search for the outer boundary of the dust-free zone around the Sun // ASP Conference Series. 1998. V. 155. P. 413–415.
8. Гуляев Р.А., Щеглов П.В. Эмиссионные образования в F-короне // Докл. РАН. 1999. Т. 366, № 2. С. 199–201.
9. Gulyaev R.A., Shcheglov P.V. Interferometric observations of emission features in the F-corona // Contrib. Astron. Observ. Skalnate Pleso. 1999. V. 28. P. 237–242.
10. Gulyaev R.A. Observations of the dust in the near circumsolar space // First Results of 1999 Total Eclipse Observations / Eds D.N.Mishev and K.J.H.Phillips. Sofia: Acad. Publ. House, 2002. P. 41–50.

11. Prasad C.D. Variability of circumsolar dust ring // Solar Phys. 1995. V. 159. P. 181–190.

12. Gulyaev R.A., Petrov N.I. Brightness of calcium emission regions associated with the solid material sublimation in the near circumsolar space // Astron. Astrophys. Transactions. 2003. V. 22. P. 617–620.

13. Делоне А.Б. и др. Поиски свечения Na в области околосолнечной сублимации межпланетной пыли во время солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Астрон. ж. 2007 (в печати).

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Троицк