

SEARCH OF THE Na IN THE REGION OF THE SUBLIMATION OF THE NEAR-SUN DUST

ПОИСКИ Na В ОБЛАСТИ СУБЛИМАЦИИ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЫЛИ

A.B. Delone¹, M.I. Divlekeev¹, E.A. Suchanov², R.A. Gulyaev³,
G.V. Yakunina¹, G.A. Porfir'eva¹

¹ Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University

University prospect, 13, Moscow 119992 Russia, *yakunina@sai.msu.ru*

² Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

Leninsky prospect, 55, Moscow Russia

³ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences

Troitsk, Moscow Region, Russia

ABSTRACT. An evaluation of the Na number in the sublimation zone of the near-Sun interplanetary dust, based on a comparison with the intensity of the radiation of the Na in the Earth atmosphere, has been obtained. The abundance of the Na in the column along the line of sight is less than $2 \times 10^8 \text{ atom cm}^{-2}$. This result is compared with the values, determined on the base of the brightness of the zodiacal light, F-corona and by direct measurements of the dust density with space experiments.

Key words: Sun; zodiacal light; interplanetary dust.

1. Введение

Межпланетная пыль, образующаяся при распаде астероидов и метеороидов, движется по кеплеровским орбитам вокруг Солнца, приближаясь к нему под действием эффекта Пойнтинга-Робертсона. Ее присутствие в околосолнечном пространстве очевидно. Мы наблюдаем рассеянный ею солнечный свет в виде зодиакального света, а около самого Солнца - F-короны - фраунгоферовой составляющей свечения внешней короны Солнца. Эффект Пойнтинга-Робертсона состоит в потере орбитального углового момента частицей, движущейся по орбите вокруг тела, являющегося источником электромагнитного излучения. Потеря импульса превращает круговую орбиту в скручивающуюся спираль. Пылинки, приближаясь к Солнцу, нагреваются и испаряются. При приближении к области сублимации наблюдается дополнительное ИК излучение на-

гретой, но еще не испаряющейся пыли.

Лами (Lamy, 1974) рассчитал для частиц ангезита и обсидиана, составляющих каменных метеоритов, расстояние от Солнца, где происходит сублимация таких пылинок (сферических, диаметром в 1 микрон) и получил $10 R_{\odot}$ и $4 R_{\odot}$ соответственно. Ближе к Солнцу - "пустая" зона Лами. В области сублимации следует ожидать резонансное рассеяние солнечного света атомами и ионами различных элементов, в том числе атомами натрия.

Для обнаружения этого свечения П.В.Щеглов предложил использовать интерферометрический метод во время полных солнечных затмений; за счет скорости движения пылинок вокруг Солнца интерференционные кольца рассеянного в области сублимации света смещены относительно колец фона - атмосферы Земли во время солнечного затмения. Расчет ожидаемой яркости линий Ca II 3933 Å был проведен Шестаковой (1990) и со второй попытки в 1998 г. Гуляевым были получены фрагменты колец линии K Ca II во время затмения в Гватемале на портативной установке, спроектированной и созданной Щегловым в ГАИШ (Гуляев, Щеглов, 1999).

Еще к затмению 2001 г. в ГАИШ готовили две установки для поисков свечения линий D1 и D2 натрия в области сублимации. Хотя ожидается, что линии Na будут много слабее, чем линия K Ca II, в этом случае имеется то преимущество, что натрий светится в земной атмосфере в двадцатикилометровом слое на высоте около 90 км над поверхностью Земли. Его свечение почти постоянно, не зависит от времени и места наблюдения и

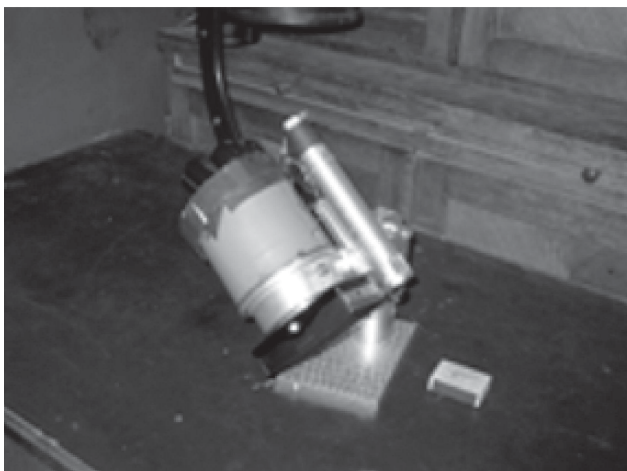


Рис. 1: Общий вид установки

может служить эталоном сравнения для определения количества атомов в окрестностях Солнца. В 2001 г. эти установки возила в Африку группа студентов Одесского университета, но интерферограммы оказались неудовлетворительного качества.

2. Наблюдения

Экспедиция ГАИШ на затмении 29 марта 2006г. базировалась в Баксане на территории лаборатории ГАИШ. Нами была предпринята попытка поиска свечения натрия в зоне сублимации околосолнечной межпланетной пыли. Проведены наблюдения с использованием интерферометрической установки с эталоном Фабри-Перо и интерференционным фильмом (ИФ) с полушириной 25 \AA центрированным на $\lambda 5890 \text{ \AA}$. Общий вид установки приведен на рис. 1, а принципиальная оптическая схема на рис. 2.

Камера с ИФ и интерферометром Фабри-Перо крепится на маленькой азимутальной установке без часового ведения. Эталон наклонен к оптической оси с тем, чтобы в поле зрения были более далекие и более часто покрывающие поле интерференционные кольца. Разделитель подобран так, чтобы с 3 по 15 кольцо не было наложения линий натрия $\lambda 5890 \text{ \AA}$ и $\lambda 5896 \text{ \AA}$ и гелия $\lambda 5876 \text{ \AA}$, пропускаемых ИФ. Приемник излучения- фотопленка в камере фотоаппарата Смена, объектив которого заменен на объектив со светосилой 1,4. Затвор демонтирован, поэтому камера служит двум целям – фокусировки объектива и перемотки пленки. Поскольку объект исследования слабый и требуется большая экспозиция, то она задается просто снятием крышки с переднего среза установки, за которым крепится интерференционный фильтр-предмонокроматор. Фокусное расстояние камеры -50 мм , диаметр Солнца на изображении составляет $0,5 \text{ мм}$.

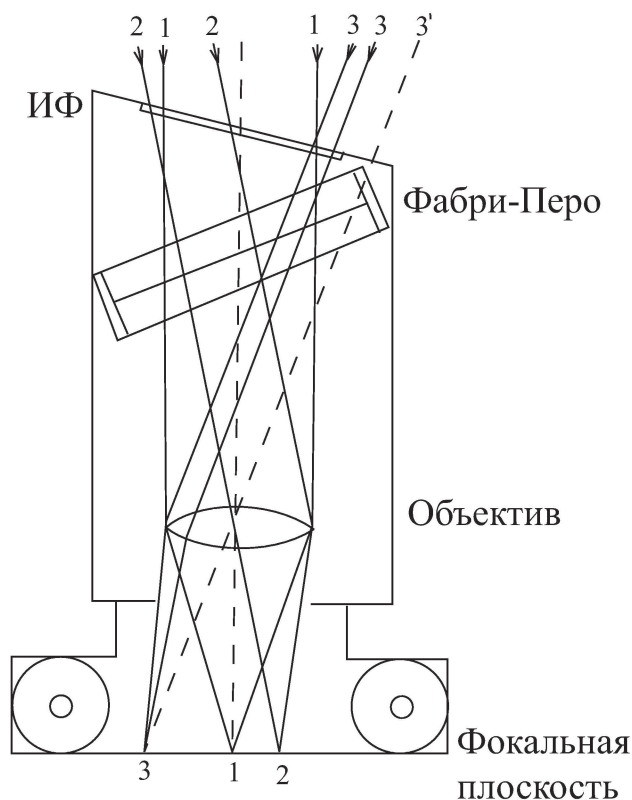


Рис. 2: Оптическая схема прибора

3. Результат наблюдения

Было сделано две экспозиции: 180 с через 5 с после второго контакта и 18 с в клнце полной фазы. На рис. 3, приведено изображение, полученное с экспозицией 180 с. По всему полю видны интерференционные кольца линии натрия земной атмосферы, но отсутствуют кольца околосолнечного Na, которые должны бы быть смещены в результате больших скоростей движения испаряющейся пыли в зоне сублимации. Если изображение Солнца расположить в центре кадра, блика не будет видно, но если есть связанная с бликом паразитная система колец, ее не удастся учесть при обработке негатива. Итак, натрия около Солнца мы не обнаружили.

Опираясь на знание о количестве атомов Na в земной атмосфере, равное $5 \times 10^9 \text{ атомов} \cdot \text{см}^{-2}$, можно оценить верхний предел числа атомов Na в зоне сублимации. Плотность на негативе, которую мы могли бы еще выявить по характеристической кривой использованной пленки (тип 38), соответствует освещенности в 12 раз слабее, чем для колец атмосферного Na, т. е. если бы содержание Na в земной атмосфере составляло $4 \times 10^8 \text{ атомов} \cdot \text{см}^{-2}$, то такое излучение от них можно было бы обнаружить.

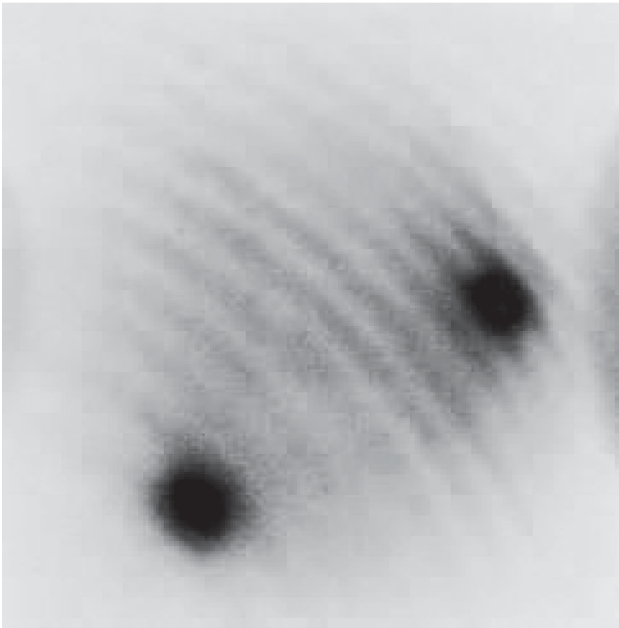


Рис. 3: Интерферограмма в линии Na, полученная во время затмения. Темное пятно слева внизу – это передержанная внутренняя корона, а справа сверху – блик от нее, возникающий из-за взаимных наклонов ИФ и эталона.

4. Методика определения числа атомов натрия в области сублимации

Какому числу атомов в зоне сублимации соответствует это излучение? Поток излучения, регистрируемый наблюдателем, обратно пропорционален квадрату расстояния от источника. Слой атмосферного Na находится на расстоянии $r_a \approx 90$ км, а область сублимации – на расстоянии $r_s = 150$ млн. км от объектива прибора и $10 R_\odot$ от Солнца. Следовательно $(r_s/r_a)^2 \approx 2 \times 10^{12}$. Механизм излучения Na – резонансное рассеяние. Время жизни на возбужденном уровне доли секунды. Околосолнечный Na возбуждается прямым излучением Солнца, а атмосферный Na во время затмения рассеянным светом из области вне полосы тени. Яркость неба при этом составляет 10^{-4} от яркости неба при прямом освещении Солнцем, а она в 10^6 раз слабее, чем солнечная.

Тогда отношение потока излучения атомов Na в земной атмосфере (I_a) к потоку излучения атомов Na в зоне сублимации (I_s) можно записать в следующем виде:

$$I_a/I_s = (N_a/N_s) \times (r_s/r_a)^2 \times (10/215)^2 \times 10^{-4} \times 10^{-6},$$
 где N_a и N_s соответственно количество атомов Na в земной атмосфере и около Солнца. При $I_s = I_a$, получаем $N_s = 1/2 N_a$, т.е. 2×10^8 атомов \cdot см $^{-2}$ на луче зрения в области сублимации. Много это или мало?

5. Оценка количества натрия около Солнца

В монографии Дивари "Зодиакальный свет" (2003) приводятся объемные плотности (d) пылевых частиц на расстояния 1 а. е. от Солнца по измерениям на КА Пионер-8 и 9 (Gieze, 1976) и Гелиос (Leinert, Pitz, 1989), по исследованиям F-короны (Hulst, 1947), микрократеров на Луне (следах ударов пылевых частиц) (Gieze, 1976) и яркости зодиакального света.

По расчетам Фесенкова (1947) и наблюдениям на Пионере-10 концентрация пыли вблизи Солнца обратно пропорциональна расстоянию до него, т.е. на $10 R_\odot$ ее должно быть в 20 раз больше, чем на 1 а.е. Содержание Na в пылинках, образующихся при дроблении каменных метеороидов, составляет 0,8 процента по весу. Вес атома натрия равен 3.8×10^{-23} г. Нами была сделана выборка по данным об объемной плотности пылевых частиц, приводимым в табл. 6.6 (Дивари, 2003). Опираясь на расчеты Лами (Lamy, 1974) мы полагаем, что наиболее вероятными являются частицы пыли размером в 1 мк, и вычислили средние величины объемной плотности для таких частиц. Затем было рассчитано число атомов (n) Na в см 3 .

Таблица 1: Число атомов Na на луче зрения в области сублимации

Объемная плотность d , г см $^{-3}$	Число атомов на луче зрения N_s , см $^{-2}$	Ссылки
5×10^{-21}	3×10^{13}	Van de Hulst Behr, Siedentopf (1953)
10^{-23}	6×10^{10}	
$5,1 \times 10^{-24}$	3×10^{10}	Ingham (1961)
$3,3 \times 10^{-25}$	2×10^9	Ingham (1961)
$6,6 \times 10^{-27}$	7×10^7	Дивари (1967)
3×10^{-23}	3×10^{11}	Дивари (1967)
$1,3 \times 10^{-22}$	10^{12}	D'Hendecourt, Lamy (1980)
	$\leq 2 \times 10^8$	Авторы (2007)

где d -объемная плотность г см $^{-3}$ на 1 а.е. от Солнца. N_s -число атомов натрия в зоне сублимации на луче зрения над см 2 .

Для земной атмосферы мы имеем полное число атомов Na в столбе с основанием см 2 . А все данные в таблице 6.6 (Дивари, 2003) – это объемные плотности, т.е. количество граммов пыли в см 3 . Поэтому для сопоставления величин надо принять длину оптического пути в околосолнечном пространстве,

чтобы получить число атомов Na на луче зрения в зоне сублимации (на $10R_{\odot}$ от Солнца). Этот путь оценен как $20R_{\odot}$ по изофотам близкого зодиакального света полученным Макквином (Дивари 2003 стр. 51). Наблюдения F короны дают 3×10^{13} (Hulst, 1947) и 6×10^{10} (Behr, Siedentopf, 1953), счет частиц на КА 3×10^{10} и 2×10^9 (Ingham, 1961), наблюдения яркости зодиакального света – от 7×10^7 до 3×10^{11} (Дивари, 1967) микрократеры $\sim 10^{12}$ (Gieze, 1976). Наша мажорирующая оценка – 2×10^8 (см. Таблицу).

Казалось бы, что поскольку мы принимаем во внимание данные, относящиеся к частицам одного размера, разногласия в окончательных величинах N_{Na} не должны быть большими. Между тем разброс определенного по ним числа атомов очень велик.

6. Обсуждение результатов

Расчет объемной плотности исходя из яркости зодиакального света требует знания его структуры. Использование разных моделей приводит к максимальному различию результатов, полученных по яркости зодиакального света. Но и данные по прямому измерению частиц на КА и концентрации пылевых частиц по данным о лунных микрократерах отличаются почти на три порядка.

Возможные причины такого разброса результатов рассмотрены Дивари (Дивари, 2003, стр. 57-65). Изменения яркости зодиакального света могут быть вызваны изменениями в атмосфере Земли, если наблюдения проводились не с помощью КА. Но и наблюдения со спутников D2A Tournesol и OSO-5, проведенным одновременно, привели к разным результатам, что как мы теперь понимаем, связано с учетом спектральной чувствительности приемников радиации. Таким образом, основанное на данных OSO-5 предположение, что метеорные потоки не влияют на наблюдаемую яркость зодиакального света, неверно.

Однако также есть связь яркости зодиакального света с солнечной активностью. В пяти случаях аномальной яркости зодиакального света было отмечено, что четверем из них предшествовали магнитные бури. Наблюдалось усиление яркости зодиакального света после вспышки и последовавшей за ней магнитной бурей. Обнаружена корреляция между яркостью зодиакального света и геомагнитной активностью, характеризующейся магнитным индексом K_p . Но есть и другие наблюдения, отрицающие рассматриваемые взаимосвязи. Так что требуется продолжение исследований переменности количества пыли в околосолнечном пространстве и возможных ее причинах.

Следует помнить, что нас интересует изменение

количества пыли а изменение яркости зодиакального света может быть вызвано другой причиной – ростом потоков электронов. Поэтому существенный вклад в рассмотрение этой проблемы вносит исследование темных колец в окрестностях Солнца (Debiprasad, 1995), наблюдаемых в инфракрасной (ИК) области спектра. Это свечение нагретой пыли при приближении к области сублимации. В $\lambda 2,2$ мк на $4R_{\odot}$ большинство удачных выявлений ИК деталей получено только в минимуме солнечной активности. Явление переменности со временем. Природа переменности эмиссии на $2,2$ мк говорит в пользу модели, предполагающей, что типичными являются частицы размером в 1 мк. Это указывает на разумность нашей выборки величин в таблице 6.6 (Дивари, 2003).

Во всяком случае, при такой неопределенности знания количества атомов Na на луче зрения на расстоянии $10R_{\odot}$ от Солнца, полученная нами оценка, весьма полезна. Отметим, что март 2006 г. приходится на фазу спада солнечной активности.

Литература

- Behr A., Siedentopf H.: 1953, *Untersuchungen über Zodiakallicht und Gegenschein nach lichtelektrischen Messungen am Jungfrauch* Zeitschrift für Astrophys., **32**, N 1, 19.
- Gieser R.H., Grun E.: 1976, *Lect. Not. Phys.*, **48**, Interplanetary Dust and Zodiakal light, 135.
- Gieser R.H., Siedentopf H.: 1962, *Zeitschr. für Astrophys.*, **54**, 200.
- Гуляев Р.А., Щеглов П.В.: 1999, *Докл. Акад. Наук*, **366**, N 2, 199.
- Debiprasad C.: 1995, *Solar Phys.*, **159**, 181.
- Дивари Н.Б.: 1967, *АЖ*, **44**, N 6, 1309.
- Дивари Б.Н.: 2003, *Зодиакальный свет*, Одесса, Астропринт.
- D'Hendecourt, le Sergeant, L.B., Lamy Ph.: 1980, *Icarus*, **43**, 350.
- Hulst H.C. van de.: 1947, *A. J.*, **105**, 471.
- Lamy Ph.L.: 1974, *Astron. Astrophys.*, **33**, 191.
- Ingham M.F.: 1961, *MN*, **122**, N 2, 157.
- Leinert Ch., Pitz E.: 1989, *Astron. Astrophys.*, **210**, N 1-2, 399.
- Фесенков В.Г.: 1947, *Метеорная материя в межпланетном пространстве*, М.-Л. Изд. АН ССР, 194 с.
- Шестакова Л.И.: 1990, *Письма в АЖ*, **16**, N 6, 550.