

УДК 524.57

ПЛАНКОВСКИЕ СРЕДНИЕ СЕЧЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ДАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ПЫЛИНОК. II

Н. В. ВОЩИННИКОВ, В. Б. ИЛЬИН

Поступила 20 апреля 1982

Принята к печати 27 января 1983

Рассчитаны планковские средние сечения лучевого давления для динамически ориентированных цилиндрических пылинок, состоящих из графита, чистого и загрязненного железа, льда, силикатов (обсидиан и базальт) и карбида кремния. Считалось, что частицы полностью ориентированы механизмом типа Дэвиса—Гринстейна. Рассматривались пылинки с радиусами от 0.001 до 1 мкм и четыре значения эффективной температуры: 3300, 5770, 15500 и 40000 К. Найдено, что планковские средние сечения слабо зависят от угла между направлениями ориентации и падающего излучения.

1. *Введение.* В предыдущей работе авторов [1] были рассмотрены планковские средние сечения лучевого давления для статически ориентированных пылинок, имеющих форму бесконечных круговых цилиндров. В реальных условиях (межзвездная и межпланетная среда, околозвездные оболочки) несферические пылинки, как правило, вращаются с большими угловыми скоростями, а магнитное поле, потоки газа или излучения ориентируют их угловые моменты [2—4]. Считается, что межзвездная поляризация возникает при частичном поглощении неполяризованного излучения звезд такими динамически ориентированными пылинками. При полной ориентации, определяемой магнитным полем, межзвездные частицы вращаются вокруг осей, относительно которых момент инерции максимален, а угловые моменты направлены вдоль магнитного поля (полная ориентация типа Дэвиса—Гринстейна, ДГ-ориентация [5, 6]). Направление ориентации задается магнитным полем и в тех случаях, когда его сила невелика, а на ориентацию частиц существенно влияют анизотропные газовые или световые потоки [3].

В данной работе приведены результаты расчетов планковских средних сечений лучевого давления для цилиндрических пылинок при полной ДГ-ориентации.

Заметим, что наличие компонента силы лучевого давления, направленного перпендикулярно падающему излучению [1], мало повлияет на сте-

пень и направление ориентации пылинок, поскольку ориентация, в основном, происходит под действием спина, а не импульса фотонов [3, 7],

2. *Планковские средние сечения.* Рассмотрим цилиндрическую частицу радиуса  $a$ , вращающуюся с постоянной угловой скоростью вокруг перпендикуляра к ее оси, направление которого составляет угол  $\theta$  с направлением падающего неполяризованного излучения. В этом случае выражение для планковских средних сечений лучевого давления записывается следующим образом:

$$\bar{C}_{pr}(a, \theta, T) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} [\bar{C}_{pr}^E(a, a, T) + \bar{C}_{pr}^H(a, a, T)] d\varphi, \quad (1)$$

где  $T$  — температура, а  $\bar{C}_{pr}^{E, H}$  — планковские средние сечения лучевого давления для статически ориентированных частиц, определяемые формулой (8) в [1]. Индексы  $E$  и  $H$  соответствуют случаям, когда ось цилиндра параллельна электрическому и магнитному вектору падающего излучения соответственно. Угол  $\alpha$  представляет собой угол между перпендикуляром к оси цилиндра и направлением падающего излучения; он связан с  $\theta$  и  $\varphi$  (углом в плоскости вращения) соотношением

$$\cos^2 \alpha = \cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi. \quad (2)$$

Выражение (1) можно переписать, используя геометрическое сечение частицы  $G$

$$\bar{C}_{pr}(a, \theta, T) = G \cdot \bar{Q}_{pr}(a, \theta, T). \quad (3)$$

Здесь

$$\bar{Q}_{pr}(a, \theta, T) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} [\bar{Q}_{pr}^E(a, a, T) + \bar{Q}_{pr}^H(a, a, T)] d\varphi \quad (4)$$

— нормированный планковский средний фактор лучевого давления для динамически ориентированных пылинок, а  $\bar{Q}_{pr}^{E, H}$  — аналогичные факторы для статически ориентированных частиц (см. формулу (9) в [1]). Интегрирование в (4) проведено тем же способом, что и при нахождении  $\bar{Q}_{pr}^{E, H}$ ; относительная погрешность составляла  $\leq 10^{-4}$ .

3. *Результаты и обсуждение.* На основе полученных в работе [1] величин  $\bar{Q}_{pr}^{E, H}(a, a, T)$  мы провели расчеты факторов  $\bar{Q}_{pr}(a, \theta, T)$  для цилиндрических частиц с радиусами от 0.001 до 1 мкм, семи значений  $\theta = 0^\circ$  ( $15^\circ$ )  $90^\circ$  и четырех температур: 3300, 5770, 15500, 40000 К. Рас-

считались пылинки, состоящие из веществ с металлическими (чистое (Fe 1) и загрязненное (Fe 2) железо, графит) и диэлектрическими (лед, силикаты (обсидиан и базальт) и карбид кремния) свойствами. Сведения о показателях преломления использованных веществ приведены в работе [1]. Напомним, что при вычислениях планковских средних сечений факторов  $\bar{Q}_{pr}(\alpha, \alpha, T)$  мы использовали факторы эффективности лучевого давления  $Q_{pr1}$ , то есть рассматривали лишь компонент силы лучевого давления, направленный параллельно падающему излучению. Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Для частиц из данного вещества зависимость  $\bar{Q}_{pr}$  от  $\theta$  определяется, в основном, величиной  $d = a \cdot T$ . При малых значениях  $d (\leq 20 \text{ мкм} \cdot \text{К})$  на значительной части промежутка интегрирования при нахождении  $\bar{Q}_{pr}$  можно воспользоваться рэлеевскими формулами для факторов эффективности лучевого давления, найденными в работе [1]. После подстановки в (4) для металлических частиц получим

$$\bar{Q}_{pr}(\alpha, \theta, T) \approx A - B \sin^2 \theta, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  — некоторые положительные постоянные при данном значении  $d$ . Для диэлектриков зависимость  $\bar{Q}_{pr}$  от  $\theta$  сложнее, но мало отличается от постоянной.

Из вычислений, проведенных нами, следует, что при  $d \geq 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$  сумма  $\bar{Q}_{pr}^E(\alpha, \alpha, T) + \bar{Q}_{pr}^H(\alpha, \alpha, T) \sim \cos \alpha$ . Тогда

$$\bar{Q}_{pr}(\alpha, \theta, T) \sim E(\sin \theta), \quad (6)$$

где  $E(\sin \theta)$  — полный эллиптический интеграл второго рода.

Расчеты показали, что у металлических частиц, во-первых, зависимости (5) и (6) близки друг к другу, поскольку  $B/A \approx 0.4$ , и, во-вторых, при промежуточных значениях  $d$  зависимости  $\bar{Q}_{pr}$  от  $\theta$  мало отличаются от предельных (рис. 1). Подобное поведение нормированных зависимостей  $r(\theta) = \bar{Q}_{pr}(\alpha, \theta, T) / \bar{Q}_{pr}(\alpha, 0, T)$  наблюдается для частиц из Fe1, Fe2 и карбида кремния, а также графита (за исключением тех размеров, для которых факторы  $\bar{Q}_{pr}(\alpha, 0, T)$  имеют максимум).

Для диэлектрических пылинок (лед, силикаты) и малых  $d$  факторы  $\bar{Q}_{pr}$  практически не зависят от  $\theta$ , а для больших  $d$  появляется зависимость типа (6) (рис. 1). Кроме того, кривые не столь гладкие, как для металлов. Это обстоятельство иллюстрирует рис. 2, на котором показаны отношения  $r(\theta)$  для льда и обсидиана при  $T = 3300 \text{ К}$ . Интересно, что при  $a \geq 0.2 \text{ мкм}$  кривые имеют максимум при  $\theta \approx 30^\circ \div 45^\circ$ .

Заметим попутно, что слабая зависимость планковских средних сечений лучевого давления от угла между направлениями ориентации и падаю-

НОРМИРОВАННЫЕ ПЛАНКОВСКИЕ СРЕДНИЕ ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛУЧЕВОГО ДАВЛЕНИЯ  $\bar{Q}_{pr}$   
 ДЛЯ ПЫЛИНОК С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Вещество	T, K	3300		5770		15500		40000	
	$\theta$	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
	$\alpha$ , мкм	1	2	3	4	5	6	7	8
Графит	0.001	5.33-2	2.76-2	6.82-2	3.62-2	9.37-2	6.06-2	1.69-1	1.48-1
	0.005	2.69-1	1.39-1	3.45-1	1.84-1	4.59-1	3.04-1	7.69-1	6.13-1
	0.01	5.42-1	2.81-1	6.83-1	3.71-1	8.44-1	5.84-1	1.17	8.66-1
	0.05	1.69	1.09	1.70	1.22	1.55	1.11	1.33	8.72-1
	0.1	1.82	1.32	1.73	1.24	1.46	9.74-1	1.26	7.84-1
	0.2	1.70	1.19	1.56	1.05	1.33	8.44-1	1.19	7.18-1
	0.3	1.58	1.07	1.46	9.53-1	1.28	7.89-1	1.17	6.90-1
	0.5	1.46	9.48-1	1.36	8.60-1	1.22	7.38-1	1.13	6.62-1
	1.0	1.35	3.36-1	1.27	7.75-1	1.17	6.91-1	1.10	6.39-1
FeI	0.001	1.34-1	6.77-2	1.74-1	8.84-2	2.92-1	1.51-1	5.96-1	3.21-1
	0.005	6.30-1	3.22-1	7.74-1	4.02-1	9.68-1	5.50-1	1.27	8.46-1
	0.01	1.08	5.70-1	1.21	6.55-1	1.28	8.11-1	1.52	1.05
	0.05	1.63	1.04	1.62	1.10	1.60	1.06	1.46	9.06-1
	0.1	1.65	1.08	1.63	1.07	1.50	9.41-1	1.39	8.28-1
	0.2	1.61	1.01	1.53	9.61-1	1.41	8.47-1	1.33	7.70-1
	0.3	1.55	9.51-1	1.46	8.96-1	1.37	8.07-1	1.31	7.45-1
	0.5	1.47	8.77-1	1.40	8.36-1	1.33	7.68-1	1.29	7.20-1
	1.0	1.39	8.03-1	1.34	7.75-1	1.29	7.29-1	1.26	6.95-1

F <sub>02</sub>	0.001	5.77—2	3.06—2	5.58—2
	0.005	2.86—1	1.52—1	2.74—1
	0.01	5.55—1	2.98—1	5.28—1
	0.05	1.56	1.02	1.48
	0.1	1.72	1.24	1.65
	0.2	1.67	1.15	1.55
	0.3	1.58	1.05	1.47
	0.5	1.47	9.41—1	1.37
	1.0	1.37	8.35—1	1.29

3.36—2	8.77—2	6.71—2	2.13—1	1.71—1
1.67—1	4.15—1	3.36—1	8.79—1	7.64—1
3.29—1	7.56—1	6.38—1	1.30	1.04
1.09	1.53	1.10	1.42	9.24—1
1.19	1.48	9.80—1	1.31	8.09—1
1.04	1.35	8.50—1	1.22	7.28—1
9.49—1	1.29	7.90—1	1.18	6.95—1
8.59—1	1.23	7.34—1	1.14	6.66—1
7.73—1	1.16	6.83—1	1.10	6.41—1

НОРМИРОВАННЫЕ ПЛАНКОВСКИЕ СРЕДНИЕ ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛУЧЕВОГО ДАВЛЕНИЯ  $\bar{Q}_p$   
 ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЫЛИНОК

Вещество	T, K	3300			5770			15500			40000		
	$\theta$	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
	$\alpha$ , мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Л о л	0.001	2.02-4	1.99-4	1.80-4	3.14-4	2.90-4	2.53-4	1.07-2	9.75-3	8.37-3	5.45-2	4.98-2	4.31-2
	0.005	1.02-3	1.00-3	9.10-4	1.68-3	1.52-3	1.32-3	5.61-2	5.10-2	4.44-2	2.95-1	2.72-1	2.41-1
	0.01	2.16-3	2.08-3	1.89-3	4.01-3	3.47-3	2.97-3	1.15-1	1.06-1	9.35-2	5.42-1	5.20-1	4.68-1
	0.05	2.53-2	1.99-2	1.74-2	6.98-2	5.71-2	5.11-2	3.64-1	3.47-1	3.06-1	1.00	9.04-1	7.00-1
	0.1	8.44-2	6.90-2	6.31-2	1.49-1	1.45-1	1.44-1	4.55-1	4.46-1	3.76-1	9.97-1	8.84-1	6.61-1
	0.2	1.69-1	1.68-1	1.69-1	2.42-1	2.54-1	2.44-1	5.50-1	5.26-1	4.14-1	9.76-1	8.47-1	6.25-1
	0.3	2.07-1	2.32-1	2.28-1	3.08-1	3.26-1	2.93-1	6.00-1	5.57-1	4.31-1	9.66-1	8.34-1	6.11-1
	0.5	3.09-1	3.23-1	2.90-1	3.99-1	4.09-1	3.39-1	6.58-1	5.97-1	4.53-1	9.56-1	8.23-1	6.00-1
	1.0	4.20-1	4.34-1	3.55-1	5.33-1	5.06-1	3.94-1	7.54-1	6.67-1	4.97-1	9.36-1	8.06-1	5.87-1
Обсидиан	0.001	1.11-5	1.01-5	8.75-6	1.74-5	1.44-5	1.16-5	1.26-2	1.08-2	8.67-3	1.01-1	9.91-2	9.09-2
	0.005	9.74-5	7.56-5	6.18-5	3.75-4	2.46-4	1.84-4	7.40-2	6.14-2	4.97-2	4.90-1	4.57-1	3.95-1
	0.01	4.61-4	3.12-4	2.40-4	2.50-3	1.54-3	1.13-3	1.77-1	1.44-1	1.18-1	8.36-1	7.58-1	6.29-1
	0.05	4.14-2	2.66-2	2.05-2	1.38-1	1.04-1	8.75-2	5.81-1	5.46-1	4.52-1	1.12	9.86-1	7.44-1
	0.1	1.56-1	1.23-1	1.07-1	2.78-1	2.62-1	2.38-1	6.90-1	6.47-1	5.04-1	1.04	9.20-1	6.74-1
	0.2	2.84-1	2.78-1	2.53-1	4.09-1	4.16-1	3.49-1	7.25-1	6.55-1	4.84-1	1.03	8.74-1	6.30-1
	0.3	3.58-1	3.66-1	3.18-1	4.75-1	4.73-1	3.69-1	7.15-1	6.28-1	4.58-1	1.09	8.50-1	6.10-1
	0.5	4.45-1	4.48-1	3.55-1	5.14-1	4.80-1	3.52-1	6.85-1	5.97-1	4.32-1	9.83-1	8.39-1	5.94-1
	1.0	4.89-1	4.52-1	3.33-1	4.64-1	4.09-1	2.94-1	6.57-1	5.65-1	4.06-1	9.72-1	8.17-1	5.81-1

Базадыт	0.001	3.82-5	3.38-5	2.83-5	1.27-4	1.11-4	9.12-5	1.40-2	1.23-2	1.01-2	7.24-2	6.83-2	6.08-2
	0.005	2.42-4	1.99-4	1.63-4	9.50-4	7.45-4	5.96-4	7.83-2	6.74-2	5.60-2	3.54-1	3.32-1	2.92-1
	0.01	8.08-4	5.92-4	4.66-4	3.84-3	2.67-3	2.06-3	1.79-1	1.53-1	1.29-1	6.44-1	6.03-1	5.21-1
	0.05	5.21-2	3.35-2	2.57-2	1.65-1	1.23-1	1.03-1	6.48-1	6.08-1	5.11-1	1.10	9.89-1	7.63-1
	0.1	1.91-1	1.50-1	1.28-1	3.27-1	3.06-1	2.73-1	7.96-1	7.50-1	5.94-1	1.11	9.68-1	7.20-1
	0.2	3.48-1	3.35-1	2.98-1	4.83-1	4.84-1	3.97-1	8.69-1	7.52-1	5.79-1	1.07	9.22-1	6.71-1
	0.3	4.38-1	4.40-1	3.71-1	5.57-1	5.43-1	4.17-1	8.62-1	7.52-1	5.53-1	1.05	8.94-1	6.49-1
	0.5	5.38-1	5.28-1	4.10-1	5.92-1	5.35-1	3.95-1	8.15-1	7.00-1	5.03-1	1.01	8.59-1	6.21-1
	1.0	5.76-1	5.22-1	3.83-1	5.32-1	4.68-1	3.39-1	7.70-1	6.60-1	4.78-1	9.85-1	8.48-1	6.09-1
Карбин кремния	0.001	1.30-5	8.09-6	5.39-6	1.20-3	8.93-4	6.04-4	1.12-1	8.72-2	6.18-2	—	—	—
	0.005	1.06-3	5.68-4	3.69-4	1.78-2	1.09-2	7.15-3	6.10-1	4.64-1	3.35-1	1.27	1.12	8.94-1
	0.01	9.54-3	5.00-3	3.23-3	1.06-1	6.08-2	3.96-2	1.18	9.07-1	6.74-1	1.95	1.59	1.22
	0.05	7.75-1	5.04-1	3.38-1	1.39	1.07	7.55-1	1.70	1.41	1.03	1.59	1.28	9.23-1
	0.1	1.40	1.11	7.93-1	1.66	1.35	9.67-1	1.46	1.22	8.78-1	1.43	1.14	8.06-1
	0.2	1.62	1.32	9.38-1	1.47	1.14	7.98-1	1.27	1.03	7.35-1	1.34	1.06	7.36-1
	0.3	1.51	1.21	8.49-1	1.28	1.00	6.99-1	1.20	9.70-1	6.90-1	1.31	1.03	7.11-1
	0.5	1.27	9.91-1	6.86-1	1.10	8.70-1	6.00-1	1.14	9.20-1	6.49-1	1.28	9.97-1	6.87-1
	1.0	1.04	8.12-1	5.57-1	9.68-1	7.57-1	5.18-1	1.09	8.78-1	6.14-1	1.24	9.76-1	6.69-1

щего излучения свидетельствует, что эффект неполной ДГ-ориентации пылинок мало скажется на величине силы лучевого давления.

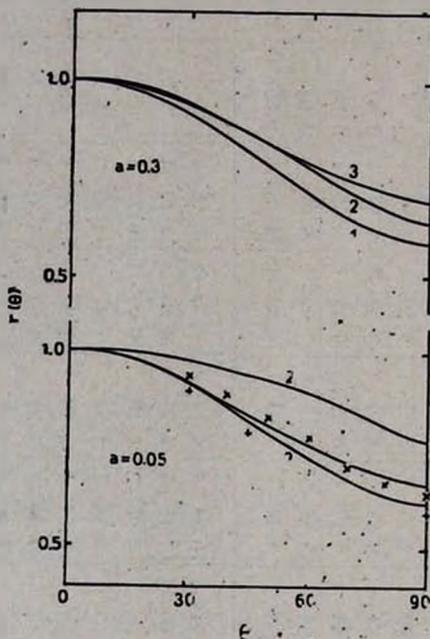


Рис 1. Нормированные зависимости  $r(\theta) = \bar{Q}_{pr}(a, \theta, 15500) / \bar{Q}_{pr}(a, 0, 15500)$  для цилиндрических пылинок (1 — частицы из FeI; 2 — частицы из обсидиана; 3 — частицы из SiC; + —  $\bar{Q}_{pr} \approx 1 - 0.4 \sin^2 \theta$ ; × —  $\bar{Q}_{pr} \sim E(\sin \theta)$ ).

При изменениях радиуса пылинок поведение планковских средних факторов лучевого давления для динамически ориентированных частиц аналогично найденному в работе [1] для статически ориентированных частиц. При этом положение максимума на кривых  $\bar{Q}_{pr}(a, \theta, T)$  смещается в сторону меньших  $a$  при увеличении  $T$ , а его величина уменьшается для металлов и растет для диэлектриков (табл. 1, 2). Отметим, что при  $T = 3300$  К и  $a \leq 0.5$  мкм  $\bar{Q}_{pr}$  для диэлектриков значительно меньше, чем для металлов. С увеличением температуры различия уменьшаются и при  $T = 40000$  К зависимости  $\bar{Q}_{pr}$  для различных веществ имеют примерно одинаковый вид при всех  $\theta$  (рис. 3, табл. 1, 2). Поэтому можно утверждать, что разные по химическому составу пылинки будут примерно одинаково выметаться излучением очень горячих звезд.

Наконец укажем, что зависимость от  $a$  планковских средних сечений лучевого давления для динамически ориентированных пылинок приближенно можно представить следующим образом:

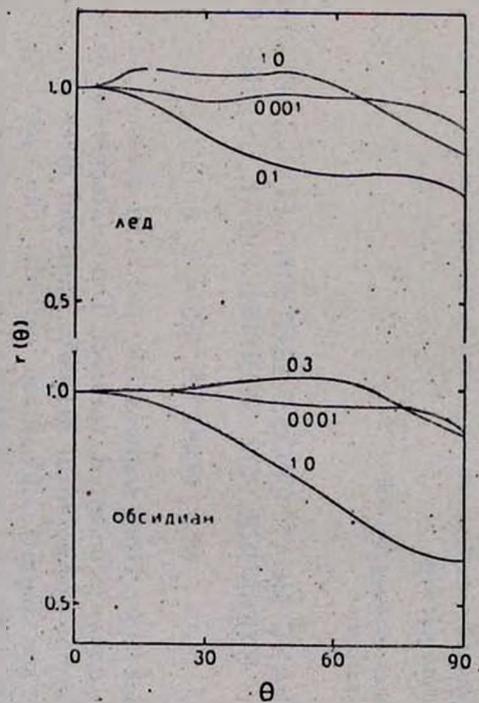


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для  $T=3300$  К (числа около кривых — значения  $a$  в мкм).

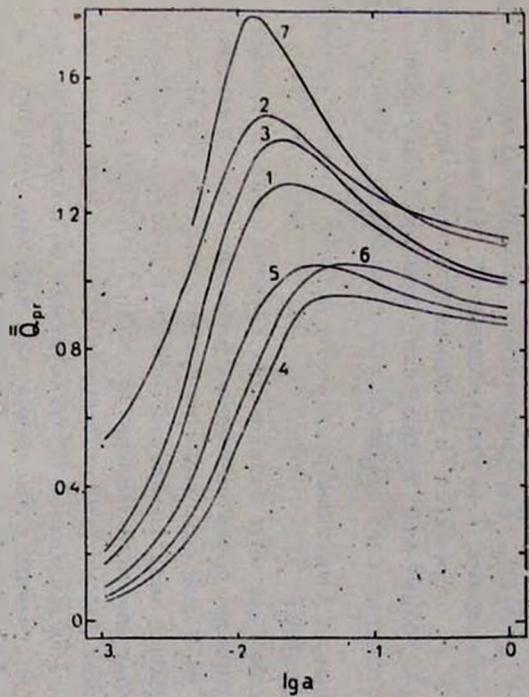


Рис. 3. Нормированные планковские средние факторы лучевого давления  $\bar{Q}_{pr}(\alpha, 30^\circ, 40000)$  (1 — графит; 2 — Fe1; 3 — Fe2; 4 — лед; 5 — обсидиан; 6 — базальт; 7 — SiC).

$$\bar{Q}_{pr}(a, \theta, T) \approx \begin{cases} F_1(\theta, T) \cdot a & \text{при } a < a_1 \\ F_2(\theta, T) & \text{при } a > a_2 \end{cases} \quad (7)$$

где  $F_1(\theta, T)$  и  $F_2(\theta, T)$  — некоторые положительные функции.  $F_2$  убывает с уменьшением  $T$  и увеличением  $\theta$ . Кроме того, при малых  $\theta$  с ростом  $T$   $F_2$  стремится к единице (так же, как и отношение  $a_1/a_2$ ). Похожее поведение планковских средних факторов лучевого давления для сферических пылинок было отмечено в работе [8].

4. *Заключение.* Основные результаты работы можно резюмировать следующим образом:

а) Проведены расчеты планковских средних сечений лучевого давления для динамически ориентированных цилиндрических пылинок с радиусами от 0.001 до 1 мкм, состоящих из графита, чистого (Fe 1) и загрязненного (Fe 2) железа, льда, силикатов (обсидиан и базальт) и карбида кремния, для четырех значений температур: 3300, 5770, 15500 и 40000 К.

б) Для всех рассмотренных веществ и температур планковские средние сечения слабо зависят от  $\theta$  — угла между направлениями ориентации и падающего излучения. Эти сечения, как правило, убывают с ростом  $\theta$ , однако для льда и обсидиана при  $T = 3300$  К и  $a \geq 0.2$  мкм они имеют максимум при  $\theta \approx 30^\circ - 45^\circ$ .

в) Зависимости планковских средних сечений лучевого давления для динамически ориентированных пылинок от размера частиц похожи на соответствующие зависимости для статически ориентированных пылинок, найденные в работе [1]. Для очень горячих звезд планковские средние сечения для динамически ориентированных пылинок мало зависят от химического состава частиц.

Ленинградский государственный  
университет

## PLANK MEAN CROSS SECTIONS FOR RADIATION PRESSURE FOR NONSPHERICAL GRAINS. II

N. V. VOSHCINNIKOV, V. B. IL'IN

Planck mean cross sections for radiation pressure have been computed for dynamic oriented (perfect Davis-Greenstein orientation) cylindrical grains composed of graphite, pure and dirty iron, ice, silicates (obsidian and basalt) and silicon carbide. The cylindrical grains radii range from 0.001 to 1  $\mu\text{m}$  and the effective temperatures used are 3300, 5770, 15500 and 40000 K. It has been found that the dependence of Planck mean cross sections from the angle between the directions of the orientation and the incident radiation is weak.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Воиновичов, В. Б. Ильин, *Астрофизика*, 18, 616, 1982.
2. J. M. Greenberg, *Cosmic Dust*, ed. J. A. M. McDonnell. Wiley, 1978, p. 187.
3. А. Э. Долинов, Ю. Н. Гнедин, Н. А. Силантьев, *Распространение и поляризация излучения в космической среде*, Наука, М., 1979.
4. Л. Спитцер, *Физические процессы в межзвездной среде*, Мир, М., 1981.
5. L. Davis, J. L. Greenstein, *Ap. J.*, 114, 206, 1951.
6. R. C. Jones, L. Spitzer, *Ap. J.*, 147, 943, 1967.
7. P. G. Martin, *M. N. RAS*, 155, 283, 1972.
8. I. C. Simpson, S. Simons, I. P. Williams, *Astrophys. Space. Sci.*, 71, 3, 1980.