

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Унжина Марина

Сила давления плазмы солнечного ветра,
действующая на сферическую частицу

ХВОСТА КОМЕТЫ

(Докад)

Научный руководитель:
педагог дополнительного
образования по астрономии
Снеткова Юлия Анатольевна^a

^aE-mail: selenia@land.ru

Унжина Марина, Самарская областная физико-математическая школа

План доклада

1. Введение
2. Сила и потенциал давления плазмы солнечного ветра
3. Результаты вычислений и их анализ
4. Заключение

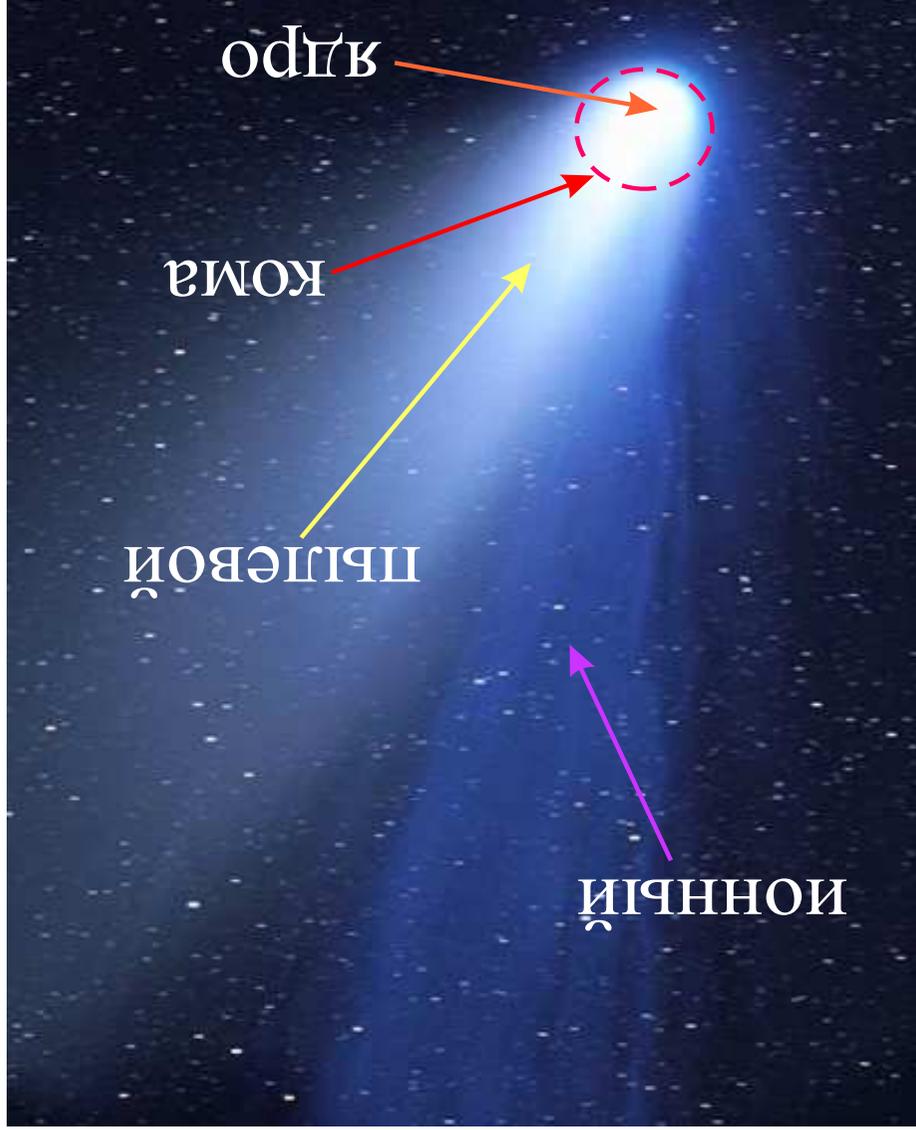
1. Введение

✓ **Кометы** – это малые тела Солнечной системы, движущиеся, как правило, по сильно вытянутым, произвольно ориентированным в пространстве орбитам различных размеров, и резко меняющие свой вид с приближением к Солнцу.

✓ Традиционно в структуре кометы можно выделить 3 основных элемента: **ядро, кому и хвост.**

✓ **Ядро** – центральное тело, состоящее из льдов замерзших газов и космической пыли.

✓ **Кому** – газопылевая оболочка, окружающая ядро.



- ✓ **Хвост** – разряженное газопылевое облако, имеющее, как правило, большую протяженность и направленное от Солнца.
- ✓ По своему составу хвосты комет подразделяются на 2 основных вида:
 - ионные и пылевые.**
- ✓ Принципиальным вопросом для исследователей комет на протяжении нескольких столетий являлся **вопрос о природе отталкивающей силы Солнца.**
- ✓ Возможность объяснить природу данной силы появилась после открытия русским физиком **П.Н. Лебедевым** в 1900 году **явления светового давления.**
- ✓ Опытные исследования показали, что световое давление играет ключевую роль в формировании пылевых хвостов комет.
- ✓ **Попытка объяснить большие ускорения потоков частиц в ионном хвосте лишь с помощью светового давления оказалась несостоятельной.**

Согласно экспериментальным исследованиям, средняя концентрация плазмы солнечного ветра может увеличиваться в **10–100 раз** в период солнечной активности. Указанный факт свидетельствует о том, что давление плазмы солнечного ветра становится сравнимым по величине со световым давлением.

✓ **Л. Бирман (1951)** – предположение о том, что большие ускорения частиц ионного хвоста достигаются взаимодействием потоками плазмы, испускаемыми Солнцем, – *солнечным ветром*.

✓ **Альвен (50-ые гг. XX в.)** – важная роль межпланетного магнитного поля в формировании ионного хвоста.



**Прецизионный расчет силы давления плазмы
солнечного ветра необходим, потому что:**

✓ данная характеристика играет ключевую роль в описании эволюции комет;

✓ в конце 20-ого столетия стали возможными прямые космические исследования кометной материи, в связи с чем резко возросла необходимость в точном определении законов движения ядра и частиц хвоста кометы;

✓ исследование кинематики хвостов комет позволит получить информацию о межпланетном магнитном поле, солнечной активности, электрическом поле Солнца и других физических процессах и явлениях в областях, далеких от Земли и от плоскости эклиптики.

Цель данной работы – построение алгоритма расчета силы давления плазмы солнечного ветра в случае сферической иликатной частицы пылевого хвоста кометы.

Основные задачи данной работы:

1. Вычисление и анализ силы давления плазмы солнечного ветра на сферическую иликатную частицу в рамках предложенной модели.
2. Вычисление и анализ эффективного давления плазмы на пылевую частицу.
3. Построение механического потенциала давления плазмы по аналогии с гравитационным потенциалом Солнца.
4. Сравнительный анализ давления плазмы солнечного ветра со световым давлением, действующим на частицу хвоста кометы.

2. Сила и потенциал давления плазмы солнечного ветра

2.1. Модель физической системы:

1. Основные переносчики импульса в солнечном ветре – **протоны** ($i = 1$) и α -**частицы** ($i = 2$). Средние температуры радиального дрейфа данных частиц на расстоянии 1 а.е. $T_p = 9.1 \cdot 10^6$ К, $T_\alpha = 3.64 \cdot 10^7$ К, средние концентрации $n_p = 7$ ($1/\text{см}^3$), $n_\alpha = 0.35$ ($1/\text{см}^3$). Вкладом электронов и тяжелых ионов будем пренебрегать.

2. Потoki солнечного ветра изотропны и характеризуются для i -го сорта частиц спектральной плотностью потока $j_i^?(E)$:

$$j_i^?(E) = \left(\frac{a}{r_p}\right)^2 \sqrt{\frac{2}{n_i E}} \frac{\pi m (kT_i)^{2/3}}{2} e^{-\frac{kT_i}{E}} \quad (1)$$

Импульсы всех частиц сопоставлены с осью OZ .

4. Силикатная частица хвоста кометы – шар радиуса R_p из оптически однородной среды с показателем преломления n .

3. Энергия протонов и α -частиц заключена в интервалах:

$$(2) \quad \left\{ \begin{array}{l} 0.052(\text{кэВ}) \leq E_p \leq 5.222(\text{кэВ}) \\ 0.207(\text{кэВ}) \leq E_\alpha \leq 20.710(\text{кэВ}) \end{array} \right.$$

2.2. Расчет силы и потенциала давления солнечного ветра

Согласно второму и третьему законам Ньютона

$$(3) \quad \vec{F} = - \sum_{i=1}^2 \frac{\Delta \vec{P}_i}{\Delta t},$$

где $\Delta \vec{P}_i$ – изменение импульса, претерпеваемое системой частиц i -го сорта, падающих на силовую поверхность и поглощаемых последней за промежуток времени Δt .

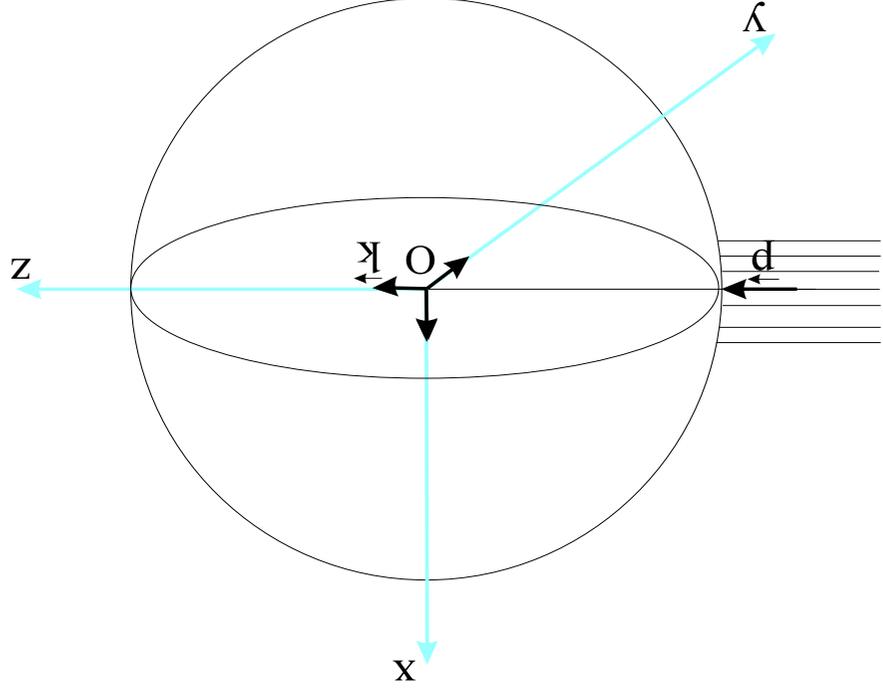
Перепишем выражение (3) в проекциях на координатные оси:

$$(4) \quad \left\{ \begin{array}{l} OX: F_x = - \sum_{i=1}^2 \frac{\Delta P_{x_i}}{\Delta t} \\ OY: F_y = - \sum_{i=1}^2 \frac{\Delta P_{y_i}}{\Delta t} \\ OZ: F_z = - \sum_{i=1}^2 \frac{\Delta P_{z_i}}{\Delta t} \end{array} \right.$$

где $\Delta P_{\{x,y,z\}_i}$ – проекции изменения импульса системы частиц i -го сорта, падающих на силовую поверхность хвоста кометы и поглощаемых последней за промежуток времени Δt .

Рассмотрим процесс падения частицы i -го сорта на площадь S , где S – площадь геометрического

сечения частицы.



Проекция изменения импульса частицы i -го сорта, прошедшей через границу "вакуум-среда", определяется соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{x_i} = p'_{x_i} - p_{x_i} = 0 \\ \Delta p_{y_i} = p'_{y_i} - p_{y_i} = 0 \\ \Delta p_{z_i} = p'_{z_i} - p_{z_i} = -p_i \end{array} \right.$$

где $p_i = \sqrt{2m_i E_i}$ – начальный импульс заряженной частицы, m_i – масса частицы i -го сорта, E_i – энергия частицы i -го сорта, $p'_{\{x,y,z\}_i} = 0$ – импульс заряженной частицы в среде частицы хвоста кометы.

Спектральный поток частиц i -го сорта через площадку S

$$d\Phi_i(E) = j_i(E) S dE.$$

(9)

(5)

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{x_i} &= \Delta t \int dP_{x_i} = 0 \\ \Delta P_{y_i} &= \Delta t \int dP_{y_i} = 0 \\ \Delta P_{z_i} &= \Delta t \int dP_{z_i} = \Delta t \int (-p_i) j_i(E) S dE = \\ &= -\pi R_P^2 \Delta t \int p_i j_i(E) dE = -\pi R_P^2 \sqrt{2m_i} \Delta t \int \sqrt{E_i} j_i(E) dE \end{aligned} \right\} .$$

выражем:

Следовательно, изменение импульса, создаваемое системой частиц i -го сорта, падающих на площадку S за единицу времени с энергией $(E, E + dE)$ и прошедших через границу "вакуум-среда", определяется

$$\left. \begin{aligned} dP_{x_i} &= d\Phi_i(E) \Delta p_{x_i} = 0 \\ dP_{y_i} &= d\Phi_i(E) \Delta p_{y_i} = 0 \\ dP_{z_i} &= d\Phi_i(E) \Delta p_{z_i} = -p_i j_i(E) S dE \end{aligned} \right\} .$$

(7)

гамма-тонова формализмов.

использован при поиске закона движения силкатной частицы хвоста кометы в рамках лагранжева и где r_P – гелиоцентрическое расстояние частицы хвоста кометы. Данный потенциал может быть

$$U_{SW}^{eff} = r_P \cdot F, \quad (10)$$

Эффективная потенциальная энергия действия плазмы солнечного ветра на частицу:

$$F_i = -\frac{\Delta P_{z_i}}{\Delta t} = \pi R_P^2 \frac{\sqrt{\pi}}{4} \left(\frac{a}{r_P}\right)^2 n_i \int_{E_i^{min}}^{E_i^{max}} \frac{E_i^{\frac{2}{3}}}{2} e^{-\frac{E_i}{kT_i}} dE. \quad (9)$$

где

$$F = \sum_{i=1}^2 F_i, \quad (8)$$

В итоге сила давления плазмы солнечного ветра с учетом (1) представляется в виде:

Частичное давление заряженных частиц i -го сорта на сферическую частицу хвоста кометы определяется выражением:

$$P_{SW}^i = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{r_p}{a} \right)^2 \frac{n_i (kT_i)^{3/2}}{2} \int_{E_i^{min}}^{E_i^{max}} E_i^{2/3} e^{-\frac{kT_i}{E_i}} dE. \quad (11)$$

Полное давление плазмы солнечного ветра на силикатную частицу представляется в виде:

$$P_{SW} = \sum_{i=1}^z P_{SW}^i = P_{SW}^d + P_{SW}^a. \quad (12)$$

3. Результаты вычислений и их анализ

3.1. Сила давления плазмы солнечного ветра

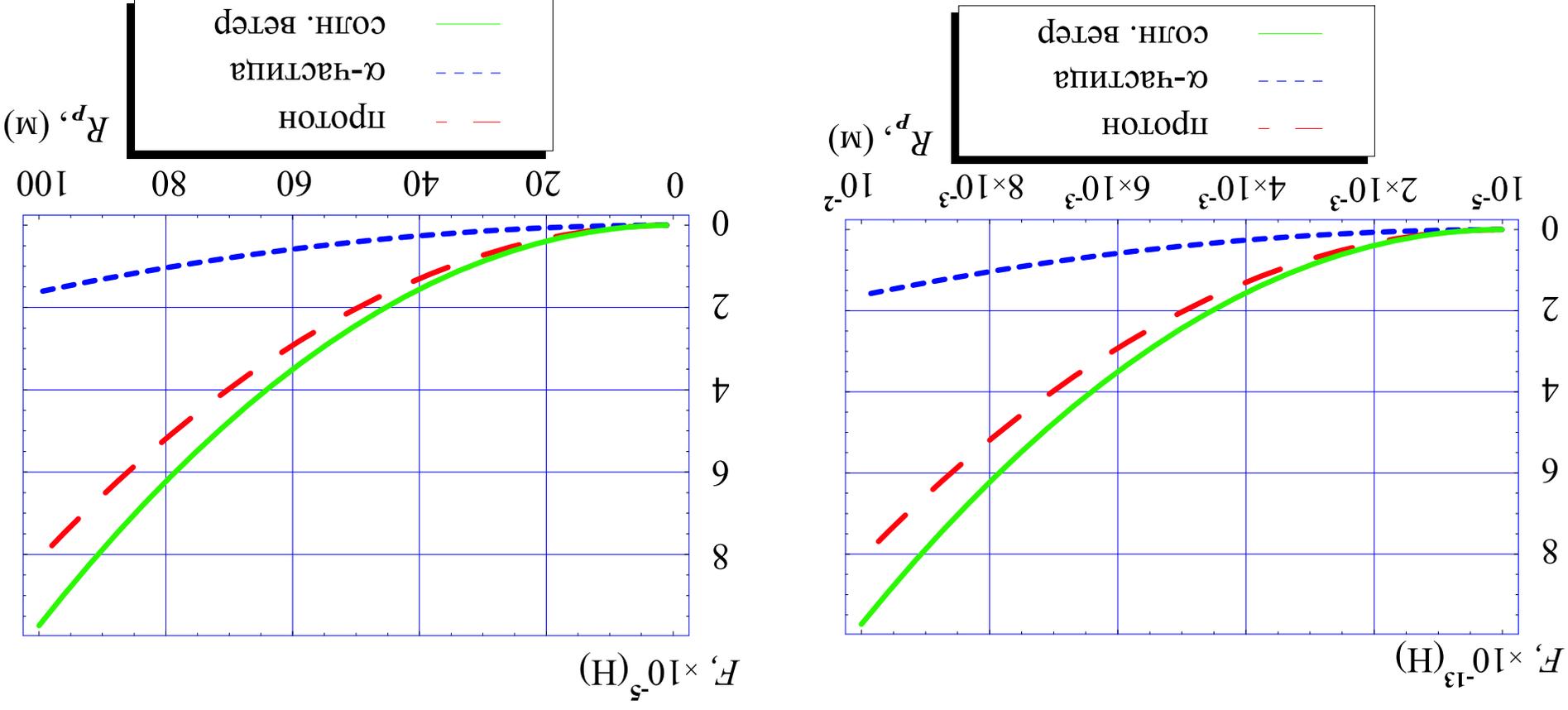


Рис. 1: Зависимость силы давления солнечного ветра от радиуса частицы R_p для значений параметров, определенных в модели

3.2. Эффективное давление плазмы солнечного ветра

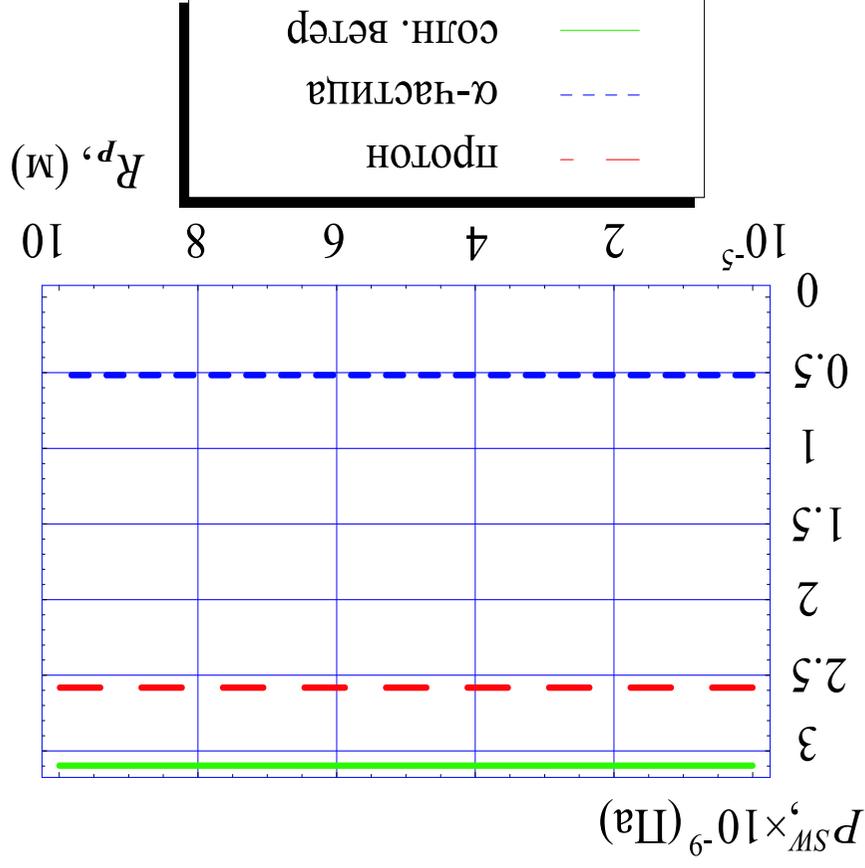


Рис. 2: Зависимость полного и частичных давлений солнечного ветра от радиуса частицы R_p для значений параметров, определенных в модели

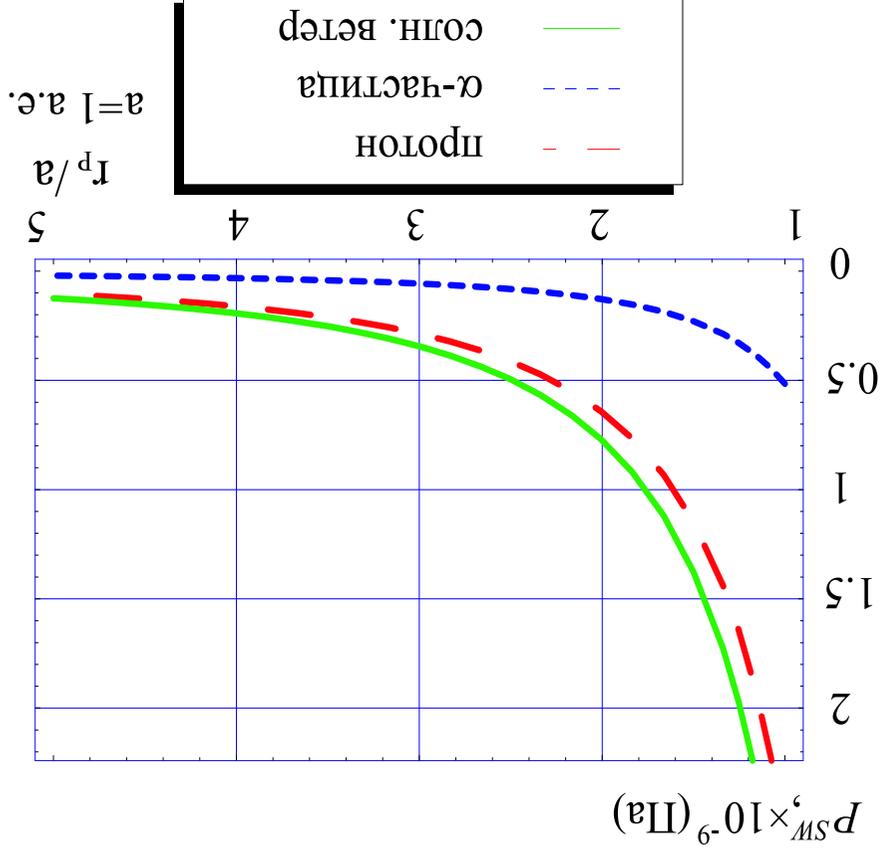
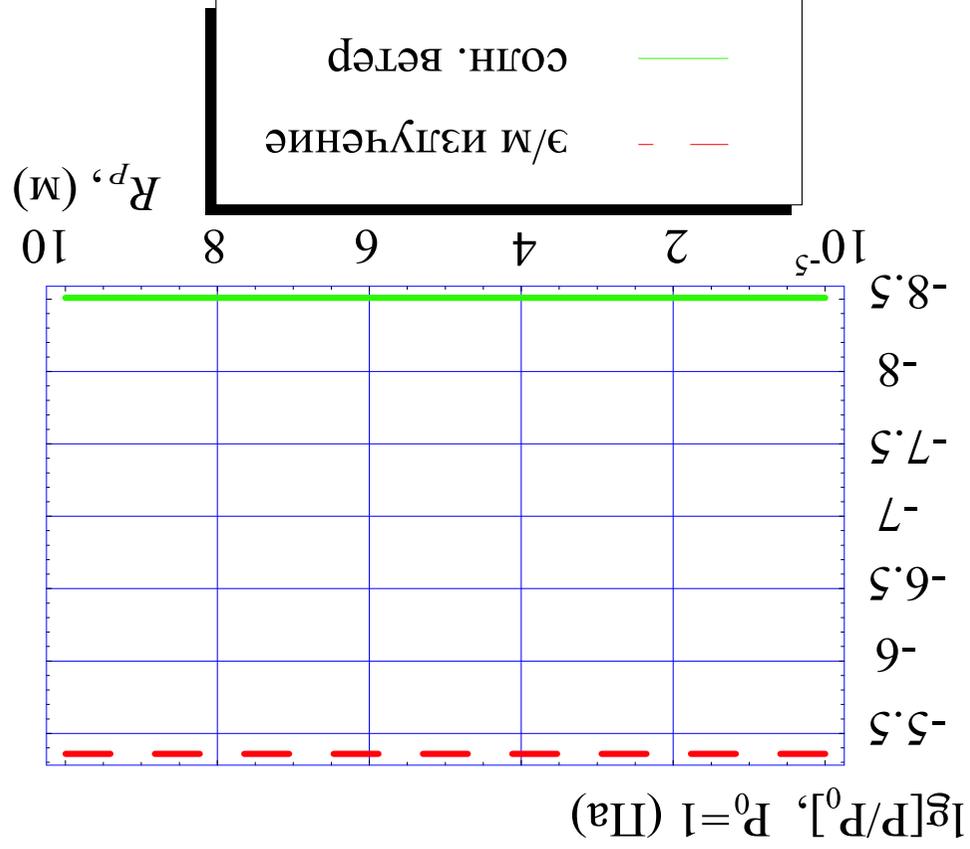


Рис. 3: Зависимость полного и частичных давлений солнечного ветра от радиуса частицы r_p для значений параметров, определенных в модели

деленных в модели

Рис. 4: Зависимость эффективного светового давления и давления солнечного ветра от радиуса частицы R_p для случая $n = 1.577$, $r_p = 1 \text{ a.e.}$, $T_{sun} = 5777.11 \text{ K}$ и значений параметров, определенных в модели



На рис. 4 представлена зависимость давления плазмы солнечного ветра для сферической частицы из пироксена от радиуса последней в сравнении с эффективным световым давлением, действующим на данную частицу, для $r_p = 1 \text{ a.e.}$ Очевидно, что давление плазмы почти на три порядка меньше светового давления, и, следовательно, нет необходимости его сравнивать с силой притяжения Солнца. На разных гелиоцентрических расстояниях для любых радиусов частиц отношение светового давления к давлению солнечного ветра остается постоянным и составляет **1414 раз**. Это подтверждает факт о том, что ключевую роль в формировании пылевых хвостов комет играет исключительно световое давление.

4. Заключение

В данной работе:

- Проведен прецизионный расчет силы давления плазмы солнечного ветра и соответствующего эффективного давления на пылевые частицы хвоста кометы на основе **разработанных модели**.
- Данная сила и соответствующее эффективное давление исследованы на примере зависимостей от радиуса и гелиоцентрического расстояния частицы. Проведен сравнительный анализ давления солнечного ветра со световым давлением, действующим на силикатную частицу хвоста кометы, находящейся на гелиоцентрическом расстоянии 1 а.е.
- По аналогии с потенциалом центрального поля сил тяготения тела со сферически-симметричным распределением массы построен механический потенциал давления солнечного ветра.
- Явно определена спектральная плотность потока заряженных частиц солнечного ветра.
- Полученные результаты могут быть использованы при высокоточном вычислении законов движения частицы хвоста кометы, исследовании физических характеристик как самой кометы, так и близких окрестностей Солнца и Солнечной системы.

Мы выражаем **большую благодарность** за подготовленные дискуссии и ценные критические замечания преподавателям кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета, в особенности доктору физико-математических наук **Башкирову Евгению Константиновичу**.

Благодарности