

Кафедра общей и теоретической физики

Ю. Снеткова<sup>1</sup>

## **Критический радиус частиц хвоста кометы как один из ключевых параметров в описании эволюции кометы**

(научно-исследовательская работа)

### **Аннотация**

В данной работе получено аналитическое выражение для критического радиуса сферической частицы, находящейся под действием сил тяготения Солнца, ядра кометы и силы светового давления. Представлен численный анализ полученного результата с использованием данных для кометы Галлея. Получены законы движения ядра и частицы хвоста кометы Галлея при рассмотрении плоской ограниченной задачи трех тел. Продемонстрирована на конкретных примерах возможность образования хвостов кометы различных типов. Представлен аналитический результат для радиуса "сферы испарения" кометного вещества. Исследована зависимость полученного результата от массы ядра кометы. Дан сравнительный анализ значений радиуса "сферы испарения" кометного вещества, полученных как для Солнца, так и для других звезд на примере кометы Галлея.

Комментарии: работа выполнена под научным руководством ассистента кафедры общей и теоретической физики СамГУ, Филиппова Ю.П.<sup>2</sup> и представлена на Всероссийском конкурсе студенческих исследовательских работ по астрономии "Astronet-2004" (работа отмечена дипломом первой степени победителя конкурса).



Работа выставлена на **ASTRODROME**: 28.01.2008

---

<sup>1</sup>E-mail: [JSnet@mail.ru](mailto:JSnet@mail.ru)

<sup>2</sup>E-mail: [yuphil@ssu.samara.ru](mailto:yuphil@ssu.samara.ru)

# Оглавление

<b>Введение: история создания и развития теории кометных форм</b>	<b>3</b>
<b>1 Модель физической системы</b>	<b>8</b>
1.1 Постановка задачи. Модель физической системы . . . . .	8
1.2 Сила светового давления для сферической частицы . . . . .	10
1.3 Лагранжев подход в описании движения тел рассматриваемой модели . . . . .	14
<b>2 Критический радиус частицы хвоста кометы</b>	<b>19</b>
2.1 Вычисление критического радиуса частицы хвоста кометы . . . . .	19
2.2 Численные результаты и анализ . . . . .	22
<b>3 Плоская ограниченная задача трех тел</b>	<b>26</b>
3.1 Плоская ограниченная задача трех тел. Уравнения движения системы 'ядро кометы - частица' . . . . .	26
3.2 Численные результаты и анализ . . . . .	27
<b>4 Определение радиуса "сферы испарения" для Солнца и других звезд</b>	<b>33</b>
<b>Заключение</b>	<b>36</b>
<b>Литература</b>	<b>39</b>
<b>Приложения</b>	<b>41</b>
A. Вычисление параметра $A_0$ . . . . .	41
B. Вычисление параметра $\rho(\theta)$ . . . . .	43
C. Вычисление интегралов $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2$ . . . . .	47
D. Аналитическое решение для уравнений движения ядра кометы . . . . .	50

# Введение: история создания и развития теории кометных форм

Начало наблюдений комет восходит к глубокой древности: они наблюдались еще в Древнем Египте и Китае. Первые наблюдения, по которым впоследствии оказалось возможным определить приближенные орбиты, были сделаны в середине первого тысячелетия до нашей эры. Тихо Браге окончательно доказал космическую природу комет на примере кометы 1577 года, параллакс которой оказался значительно меньше лунного. Первая орбита кометы была вычислена Галлеем вскоре после появления ньютоновской небесной механики. Данный факт стал одним из самых веских доказательств того, что механика Ньютона имеет право носить статус науки.



Рис. 1. Комета Хэйла-Боппа в марте 1997 г. Комета имеет два хвоста: I-го типа (более слабый, голубого цвета, состоящий из ионизованного вещества) и II-го типа (яркий газопылевой).

Однако пытливость человеческого разума в постижении окружающего мира не знает границ. Многие исследователи комет того времени не остановились на достигнутом - они задавали новые вопросы, на которые пытались получить ответы. В силу каких причин при сближении с Солнцем комета меняет свой облик: появляется голова и хвост? Почему, как правило, хвост кометы направлен от Солнца? Что образует хвост кометы?

Рассуждая о природе комет, Иоганн Кеплер впервые делает предположение, что кометные хвосты представляют собой поток частиц, отбрасываемых действием света прочь от Солнца по мере сближения кометы с Солнцем.

Кеплер в 1619 году писал: "Грязная материя сгущивается, образуя голову кометы. Солнечные лучи, падая на нее и проникая через ее толщу, вновь преобразуют ее в тончайшее вещество эфира и, выходя из нее, образуют по

другую сторону световую полосу, которую мы называем кометным хвостом. Таким образом, комета, выбрасывая из себя хвост, тем самым разрушает себя и уничтожается"[1]. Кеплер был первым, кто глубоко осознал и указал на существенную роль солнечного излучения в эволюции тел Солнечной системы, в частности, комет.



Рис. 2. Комета Икея-Секи (C/1965 S1). Яркий пример образования хвоста II рода (Фото с 4-минутной выдержкой получил Roger Lynds 29 октября 1965 года в Kitt Peak).

В начале XIX столетия были сделаны первые попытки определения по наблюдениям комет отталкивательной силы Солнца (Ольберс, Брунс и другие).

В 1836 году Бесселем была опубликована работа, ставшая классической, о движении частиц кометы под действием силы притяжения Солнца и его отталкивательной силы. Последняя, как априорно предполагалось, изменяется (подобно силе притяжения) как  $\frac{1}{r^2}$ , где  $r$  - расстояние от геометрического центра Солнца до точки наблюдения.

Предполагая наличие выбросов заряженной материи из головы кометы в направлении на Солнце, Бессель предложил рецепт вычисления закона движения частиц кометы в зависимости от принятой величины отталкивательной силы, а также разработал методику сопоставления теоретических результатов с результатами наблюдений.

Задача была весьма сложной, поскольку необходимо было учесть, что комета может проецироваться на небо-

свод (картинную плоскость) любым образом в зависимости от расположения ее орбиты по отношению к Земле и положения кометы на орбите, а также изменение условий проецирования. Несмотря на то, что метод Бесселя был приближенным, в рамках последнего в зависимости от принятого значения отталкивательной силы можно было теоретически получать различные формы хвостов и сравнивать с данными наблюдений.

Дальнейшее развитие механическая теория кометных форм получила в работах известного московского астронома, впоследствии академика, Ф.А. Бредихина (1831-1904). Бредихин, совершенствуя теорию Бесселя, исправил в

ней ряд неточностей, при поддержке московских ученых нашел закон движения частицы при различных физических условиях и провел детальный анализ результатов наблюдений комет как прошлых лет, так и всех ярких комет XIX столетия. На основе данного анализа Бредихиным в 1878 году была предложена классификация хвостов комет. Им было выделено три основных типа в зависимости от среднего значения отталкивательной силы, действующей на частицы, составляющие данные хвосты.



Рис. 3. Комета West (C/1975 V1). Комета также имеет два типа хвостов: хвост I типа определяется синим ионным газовым свечением; хвост II типа есть яркий белый пылевой "шлейф".

В хвостах III типа действует еще меньшая отталкивательная сила (0-0.3 от силы притяжения); частицы движутся под действием ослабленного притяжения к Солнцу. Эти хвосты обычно короткие, расположенные под значительным углом к продолжению радиуса-вектора ядра кометы. Особый интерес в рассмотрении вызывают "аномальные хвосты", направленные не от Солнца, а к Солнцу! Такие хвосты наблюдались у некоторых комет (комета 1910 года, комета 1957 III).

Ф.А. Бредихин первым разработал методы непосредственного определения отталкивательной силы не по кривизне хвоста, а по движению облачных масс в кометах. На основе данных методов были впервые экспериментально

В хвостах I типа, обычно тонких прямолинейных, сила отталкивания в 10 - 100 раз больше силы притяжения [2]. Вследствие этого ось хвоста расположена почти вдоль продолжения радиуса-вектора ядра кометы (смотри рис. 1).

Хвосты II типа - часто яркие, широкие и кривящиеся образуются под действием отталкивательной силы, равной или несколько большей силы притяжения (0.5-2.5 раза). Ось хвоста II типа на малых расстояниях от головы почти прямолинейна и направлена почти вдоль продолжения радиуса-вектора ядра, как и хвост I типа. Однако, уже на расстояниях в несколько градусов от головы кометы становится заметной кривизна хвоста, который отклоняется в сторону, противоположную направлению движения кометы (смотри рис. 2-3).

обнаружены силы отталкивания, в несколько (десятки) раз превосходящие силы тяготения. Были сделаны попытки объяснения образования различных сложных структур - потоков и лучей, наблюдавшихся в головах и хвостах комет, в частности, системы прямолинейных полос в хвостах II типа, которые Бредихин назвал "синхронами", т.е. образованными частицами, одновременно выброшенными из ядра ("хронос" - время).

Дальнейшее развитие механической теории кометных форм привело к необходимости поиска ответа на вопрос: какова природа отталкивательных сил Солнца?

Так еще Г.В. Ольберс, исследуя комету 1811 года, счел необходимым для объяснения искривления хвоста ввести действие на его частицы некоторой отталкивательной силы Солнца помимо ньютоновского притяжения. Он же высказал предположение об электрической природе данной силы.

Целльнер имел еще более "радикальный" ответ на данный вопрос. Он предполагал, что Солнце обладает гигантским электрическим зарядом, порождающим электрическое поле. Последнее действует на частицы хвоста кометы, которые приобрели электрический заряд в силу их взаимных столкновений и трения [3]. Ф.А. Бредихин тоже склонялся к данной точке зрения. Но впоследствии выяснилось, что Солнце не может обладать столь большим электрическим зарядом, какой требовался в данной гипотезе.

Новые возможности в объяснении природы данных сил появились после того, как было предсказано, а затем на опыте подтверждено действие света (как частного проявления электромагнитного поля) на материальные тела. Еще Максвелл в середине XIX столетия показал, что свет должен производить давление на поверхность, поставленную на пути светового потока. Опыты, подтвердившие предсказание Максвелла, были проделаны в 1900 году русским физиком П.Н. Лебедевым.

На основе многочисленных исследований хвостов комет был установлен важный факт: с уменьшением радиуса частицы хвоста кометы  $R$  отношение силы светового давления, действующей на частицу, к силе притяжения Солнцем возрастает, ибо с уменьшением радиуса частицы притяжение уменьшается как куб радиуса (объем), а отталкивание как квадрат радиуса (площадь поверхности).

Для частиц с радиусом, меньшим некоторого критического значения  $R_c$  (критический радиус), преобладание силы отталкивания над силой притяжения будет наблюдаться на любом расстоянии от Солнца, ибо как плотность излучения, так и гравитационное действие одинаково изменяются с расстоянием как  $\frac{1}{r^2}$ , следовательно, масса кометы с каждым проходом перигелия (в случае периодических комет) уменьшается (см. рис. 4). На основе указанного факта нетрудно прийти к выводу, что частицы, образующие хвосты

разных типов, отличаются как по химическому составу, так и по размерам. Детальные исследования хвостов комет, разработку новых методов определения отталкивательных сил после Бредихина проводили Р.Е. Герман, К.Д. Покровский, А.Я. Орлов, И.Ф. Полак и главным образом С.В. Орлов, создавший в Москве школу исследователей комет, в которую входили Н.Д. Моисеев, Б.А. Воронцов-Вельяминов, С.К. Всехсвятский, Ю.В. Филиппов и другие.

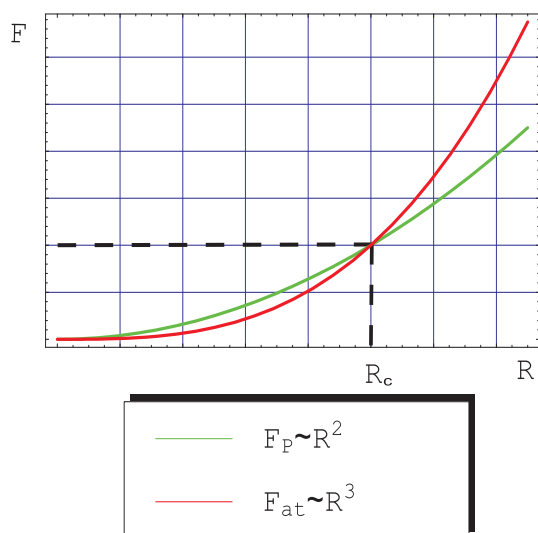


Рис. 4. Зависимость сил притяжения и светового давления от радиуса частицы  $R$ .

Важно отметить, что наиболее последовательное и логически обоснованное объяснение явления светового давления было дано лишь в рамках квантовой теории, на основе корпускулярных представлений об электромагнитном излучении. Именно здесь удастся получить явное аналитическое выражение для силы светового давления, действующей на частицу хвоста кометы, опираясь на ряд базисных принципов и соотношений квантовой теории, и избежать применения феноменологических методик расчета.

Так, современная теория светового давления в газах была разработана Бааде и Паули в 1927 году на основе квантово-механических представлений и применена к описанию кометных форм Вурмом в 1934 году [2].

В результате активной и плодотворной работы Московской кометной группы были не только усовершенствованы методы проецирования кометных хвостов, но были рассмотрены и другие вопросы механической теории, важнейшие задачи космогонии комет, начаты широкие исследования в области спектроскопии и фотометрии комет. Позднее усовершенствование механической теории и сложных методов обработки кометных наблюдений разрабатывались в Киеве (кафедра астрономии КГУ и ГАО АН УССР), а также в Душанбе, в группе исследователей комет О.В. Добровольского.