

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КОРПУСКУЛЯРНОГО  
АНАЛОГА ЭФФЕКТА РОБЕРТСОНА-ПОЙНТИНГА**

(научно-исследовательская работа)

**Выполнила:**

Макеева Мария,  
10 класс СОФМШ

---

**Научный руководитель:**

Филиппов Юрий Петрович,  
к.ф.-м.н., старший препода-  
ватель кафедры общей и  
теоретической физики  
Самарского государствен-  
ного университета

---

Самара, 2011 г.

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эффект Робертсона-Пойнтинга и природа солнечного ветра</b>	<b>7</b>
1.1 Вывод силы Пойнтинга-Робертсона . . . . .	7
1.2 Основные свойства солнечного ветра . . . . .	11
1.3 Спектральная плотность потока частиц солнечного ветра . . . . .	14
1.4 Физические свойства метеороидов . . . . .	15
<b>2 Простейшая модель корпускулярного аналога эффекта Пойнтинга-Робертсона</b>	<b>20</b>
2.1 Определение модели физической системы . . . . .	20
2.2 Расчет силы давления корпускулярного излучения Солнца для неподвижной сферической частицы . . . . .	21
2.3 Расчет скорости падения частицы на Солнце . . . . .	25
2.4 Определение законов эволюции параметров орбиты частицы. Оценка ее времени жизни . . . . .	27
2.5 Численные результаты и анализ . . . . .	29
<b>Заключение</b>	<b>34</b>
<b>Литература</b>	<b>36</b>

# Введение

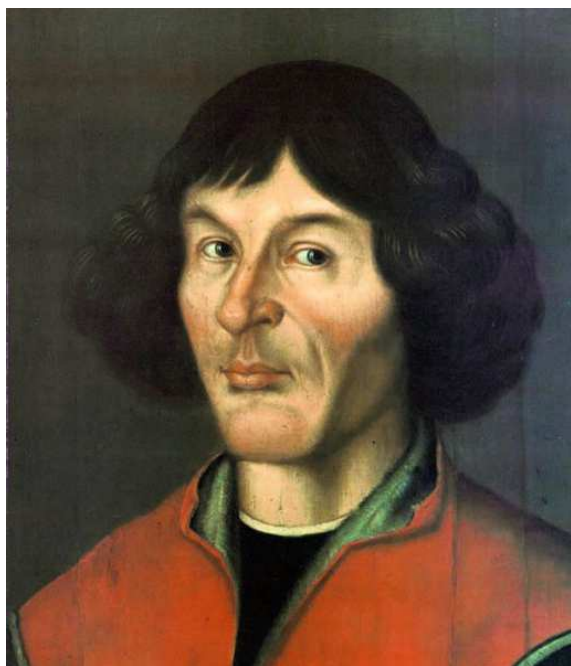


Рис. 1. Николай Коперник.

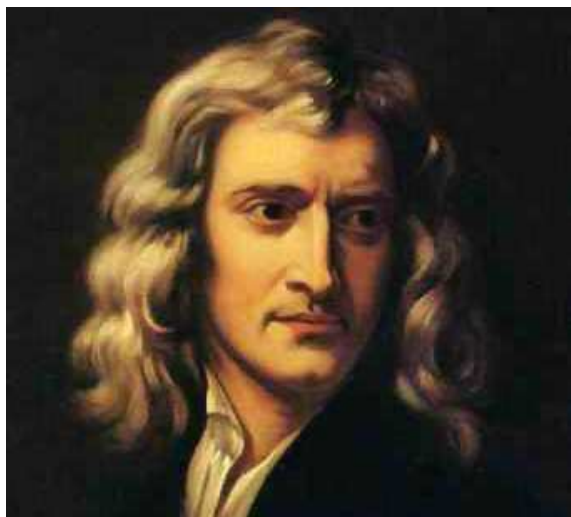


Рис. 2. Исаак Ньютон.

Актуальность работы. Сегодня хорошо известно каждому, что Солнце является самым массивным телом, силовым центром и основным источником энергии в Солнечной системе. Первым, кто постулировал движение всех известных (на тот момент) тел Солнечной системы вокруг Солнца был отец гелиоцентрической системы – Николай Коперник [1] (см. рис. 1). Однако, он не задавался физической причиной этого феномена, полагая, что это продиктовано свыше.

Впервые физическое объяснение данному виду движения дал Исаак Ньютон. В своем основном труде «Математические начала натуральной философии» (труд издан в 1687 году) И. Ньютон (см. рис. 2) вывел **закон всемирного тяготения**, основываясь на эмпирических законах Кеплера, известных к тому времени. Он показал, что: наблюдаемые движения планет свидетельствуют о наличии центральной силы; наоборот, центральная сила притяжения приводит к эллиптическим (или гиперболическим) орбитам.

Ньютон опубликовал не просто предполагаемую формулу закона всемирного тяготения, но фактически предложил целостную математическую модель: 1) закон тяготения; 2) закон движения (второй закон Ньютона); 3) систему методов для математического исследования физических систем. В совокупности

эта триада достаточна для полного исследования самых сложных движений небесных тел, тем самым создавая основы небесной механики.

Опыт применения законов Ньютона показал, что закон всемирного тяготения позволяет с огромной точностью объяснить и предсказать движения небесных тел, и он стал рассматриваться как фундаментальный. В то же время ньютоновская теория содержала ряд трудностей. Главная из них – необъяснимое дальное действие: оставалось непонятным как сила притяжения передавалась через совершенно пустое пространство, причем бесконечно быстро. В конце XIX века обнаружилась еще одна проблема: расхождение теоретического и наблюдаемого смещения перигелия Меркурия (последняя нашла адекватное объяснение лишь в общей теории относительности Эйнштейна).



Как оказалось, одного закона всемирного тяготения не достаточно для объяснения всего многообразия всех небесных явлений. В частности, в теории комет оставались совершенно непонятными причины по которым хвост кометы (см. рис. 3) почти всегда направлен от Солнца?

Рассуждая о природе комет, Иоганн Кеплер впервые делает правильное предположение, что кометные хвосты представляют собой поток частиц, отбрасываемых действием света прочь от Солнца по мере сближения кометы с Солнцем. Кеплер был первым, кто глубоко осознал и указал на существенную роль солнечного излучения в эволюции тел Солнечной системы, в частности, комет [2].

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

В 1836 году Ф.В. 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. Именно Бесселя можно считать основоположником теории негравитационных эффектов.

Однако, оставалось непонятной природа отталкивательной силы Солнца. Так еще Г.В. Ольберс, исследуя комету 1811 года, 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]. 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.

Точный аналитический результат для силы давления электромагнитного излучения Солнца на сферическую частицу впервые было получено П. Дебаем в 1909 году на основе точной теории электродинамики Максвелла [4].

Принимая во внимание конечность скорости распространения электромагнитных волн и феномен абберации света для движущихся объектов, Дж. Пойнтинг в работе [5] впервые предложил идею о потере орбитального углового момента телом (обычно малой частицей) при движении по орбите вокруг другого тела (Солнца), являющегося источником электромагнитного излучения [6]. Данный эффект получил название *эффекта Пойнтинга-Робертсона*. Однако, предложенное описание являлось нерелятивистским и содержало ряд ошибок. Строгую релятивистскую теорию данного эффекта с исправлением ошибок предшественника представил Х. Робертсон в 1937 году [7].

Опыт показывает, что световое давление играет ключевую роль в формировании пылевых хвостов. Попытка объяснить большие ускорения потоков частиц в ионном хвосте лишь с помощью светового давления оказалась несостоятельной. Решение указанной проблемы нашел немецкий астрофизик Л. Бирман в 1951 г [8]. Он предположил, что большие ускорения частиц ионного хвоста достигаются взаимодействием последних с потоками плазмы, испускаемыми Солнцем, впоследствии названными *солнечным ветром*. Впоследствии эту гипотеза получила строгое теоретическое обоснование у Ю. Паркера в 1958 году.

Исходя из аналогии между корпускулярным и электромагнитным излучением Солнца, японские физики Т. Мукай и Т. Ямамото в 1982 году в работе [9] предложили модель *корпускулярного аналога эффекта Пойнтинга-Робертсона*. Пользуясь численными оценками для параметров модели они показали, что данный эффект является нелидирующим и не может давать вклад больше 26% в полное значение наблюдаемой величины, предсказываемой обычным эффектом Пойнтинга-Робертсона. Однако, Г. Рябовой в работе

[10] было показано, что данный эффект может быть намного существеннее, нежели это предсказывали японские ученые и он должен быть принят во внимание в прецизионных расчетах.

Однако, сложность математического аппарата и громоздкость итоговых результатов работы [10] не позволяет использовать последние для быстрой эффективной оценки времени жизни метеороидных роев с учетом данного эффекта.

В связи со сказанным, главной целью настоящей работы является построение простейшей нерелятивистской модели корпускулярного аналога эффекта Пойнтинга-Робертсона и построение компактных аналитических результатов для силы Пойнтинга-Робертсона корпускулярного излучения Солнца и времени жизни метеороидов.

Согласно сформулированной цели, основными задачами настоящей работы являются следующие положения:

1. Расчет силы давления корпускулярного излучения Солнца, действующей на неподвижную сферическую частицу, с использованием метода геометрической оптики. Вычисление силы торможения, отвечающей корпускулярному аналогу эффекта Пойнтинга-Робертсона.
2. Расчет скорости падения сферической пылевой частицы массы  $m$  и радиуса  $R$  на Солнце с учетом электромагнитного и корпускулярного эффектов Пойнтинга-Робертсона.
3. Оценка времени жизни частицы. Определение законов эволюции параметров орбиты частицы.
4. Численный анализ полученных результатов на примере метеороидов, принадлежащих главным метеорным потокам.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Метод геометрической оптики.
2. Методы интегро-дифференциального исчисления.

Данная работа имеет следующую структуру.

**Первая глава** посвящена теоретическим основам эффекта Робертсона-Пойнтинга и современным представлениям о метеороидах и корпускулярном солнечном излучении.

Во **второй главе** подробно представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.

# Глава 1

## Эффект Робертсона-Пойнтинга и природа солнечного ветра

В настоящей главе будут подробно изложены теоретические основы эффекта Робертсона-Пойнтинга, основные физические свойства солнечного ветра и метеороидов.

### 1.1 Вывод силы Пойнтинга-Робертсона

*Эффект Пойнтинга - Робертсона* – это процесс, благодаря которому в Солнечной системе пылевые частицы медленно падают по спирали в направлении Солнца. Эффект был впервые описан в 1903 Джоном Генри Пойнтингом, который объяснил его в рамках эфирной теории электромагнетизма. Правильное объяснение эффекта с точки зрения общей теории относительности дал Говард Перси Робертсон в 1937 году.

Рассмотрим простейшую модель данного процесса. Ради простоты вычислений будем полагать, что пылевая частица имеет форму шара, плотность вещества в каждой точке которого, есть величина постоянная. Частица движется по круговой орбите вокруг Солнца. Взаимодействие пылевой частицы с электромагнитным излучением Солнца можно равнозначно описывать в двух системах отсчёта (см. рис. 4):

- а) в системе отсчёта, связанной с пылевой частицей, в результате аберрации света<sup>1</sup> солнечное излучение слегка наклонено против движения частицы (см. рис. 4.а). Предполагая, что частица имеет столь малые размеры, что можно считать, что её температура постоянна по всей поверхности, поэтому тепловое излучение можно считать изотропным;

---

<sup>1</sup> *Аберрация света* – изменение направления светового луча, идущего от небесного светила, вследствие конечности скорости света и движения наблюдателя относительно светила. А. с. вызывает смещение видимого положения светила на небесной сфере.