

# Моделирование перераспределения вещества между облаками частиц ПротоПланета и ПротоСпутник

## Место данной модели в истории образования системы Планета-Спутник

Исходное пылевое облако, обладая моментом импульса и начальной энергией, приходит в гравитационно-неустойчивое состояние. В результате в теле облака при определенных условиях возникают два сгустка пыли. Они вращаются вокруг общего центра масс. Вращение необходимо, чтобы два сгустка не слились в один из-за гравитационного взаимодействия друг с другом. Этот этап истории был исследован Питерской группой.

Далее наступает следующее состояние системы, которое можно моделировать более простыми средствами, чем пользовалась Питерская группа. Содержание данного этапа сводится к тому, что два сгустка пыли взаимодействуют как друг с другом, так и с остатком исходного пылевого облака. Результат этого взаимодействия состоит в том, что при неодинаковых размерах и массах двух сгустков происходит перераспределение вещества, как между сгустками, так и между остатком первичного облака. При этом больший сгусток наращивает размеры и массу, а меньший сгусток уменьшается. Данный этап длится до тех пор, пока два сгустка не перестают взаимодействовать друг с другом. Остаются процессы в отдельных облаках, которые теперь являются ПротоПланетой (ПП) и ПротоСпутником (ПС). К этому добавляются только процессы поглощения вещества обоими протооблаками из остаточного исходного облака.

Принципиальная возможность упростить модель и вычисления на этом этапе определяется тем, что симметричные свойства строительного вещества в этот период истории несравнимы со свойствами самого первого этапа. На первом этапе первоначальная высокая симметрия исходного облака нарушается из-за выделения тепловой энергии, появления газовых потоков и сочетания механических процессов с газодинамическими. Наблюдается сложнейшие процессы, которые Пьер Кюри охарактеризовал крылатым афоризмом «*Диссимметрия творит явление*». Никакая простая модель здесь не работает.

На втором этапе развития системы Планета – Спутник появляется осевая симметрия, которая позволяет существенно упростить модель и вычисления. Изложению техники моделирования данного этапа истории посвящен нижеследующий текст. Цель смены техники моделирования состоит в резком ускорении вычислительных экспериментов, что позволит с меньшей задержкой времени задавать вопросы модели и получать ответы на эти вопросы.

Затем можно перейти к новому этапу истории и еще раз сменить модель. Она была описана в тексте *Моделирование сбора вещества из космического облака*.

## **Модель взаимодействия облаков ПП и ПС**

На данном этапе истории полагаем, что будущие облака ПП и ПС уже разделились, но продолжают обмениваться строительным материалом. Окружающее их исходное облако также воздействует на них, как гравитацией, так веществом. Рабочая модель изображена на рисунке 1.

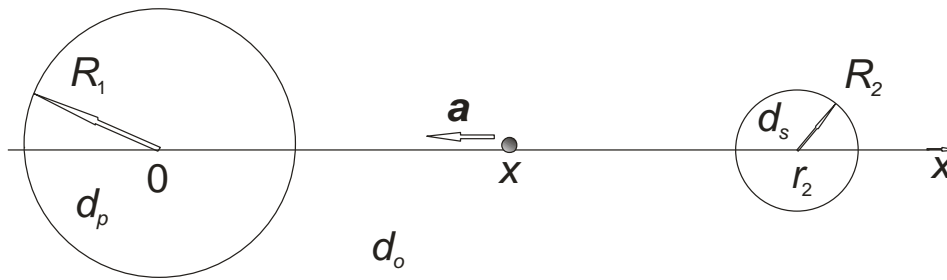


Рис. 1. Облако ПротоПланета радиуса  $R_1$  равномерно заполнено веществом с плотностью  $d_p$  (P for Planet). Облако ПротоСпутник радиуса  $R_2$  равномерно заполнено веществом с плотностью  $d_s$  (S for Satellite). Остальное пространство равномерно заполнено веществом с плотностью  $d_o$  (O for Outer Space). Начало координатной оси  $x$  совпадает с центром облака ПП. Центр облака ПС находится в точке с координатой  $r_2$ .

Модель обладает осевой симметрией, причем ось  $x$  совпадает с осью симметрии бесконечного порядка. В пространстве с такой симметрией любая частица, взаимодействующая с системой ПП – ПС, может участвовать только в двух независимых движениях. Одна ее степень свободы связана с движением вдоль оси  $x$ , а две другие степени свободы – с двумя вырожденными колебательными движениями, перпендикулярными оси  $x$ .

Колебательные движения частиц при их столкновениях могут и должны приводить к выделению тепла. Это интересно с космохимической точки зрения, однако в данном тексте не обсуждается, поскольку техника моделирования этих явлений уже описана в тексте *Моделирование сбора вещества из космического облака*.

В этом тексте мы сосредоточимся на явлениях перераспределения вещества в системе. Эти явления могут быть связаны только с движениями частиц вдоль оси  $x$ . Ясно, что это большое упрощение процесса моделирования и всех вычислений.

Получим выражения для расчета сил, действующих на частицу массы  $m = 1$ , находящуюся на оси  $x$ . Численно такая сила представляет собой ускорение  $a_x$  частицы, или напряженность  $g_x$  гравитационного поля, действующего на частицу со стороны облаков ПП, ПС и окружающего систему исходного облака. Такое представление силы удобно тем, что в полученные выражения можно будет легко внести поправки на вращение системы и на вязкое трение при элементарном учете газодинамики.

Перейдем в неинерциальную систему координат, связанную с вращением системы как целого. Тогда для частицы гравитация ослаблена:  $g_{\text{эффективное}} = g_{\text{инерциальное}} - a_{\text{центростремительное}}$ . Если не учитывать сил Кориолиса, то в неинерциальной системе можно заниматься только анализом движений частиц в поле  $g_{\text{эффективное}}(x)$ . Практически это потребует введения эффективной величины гравитационной постоянной  $G$  вместо универсальной постоянной.

Исследуемое пространство распадается на три части:

1. В пределах облака ПП  $-R_1 < x < R_1$ .
2. Между облаками ПП и ПС  $R_1 < x < r_2 - R_2$ .
3. В пределах облака ПС  $r_2 - R_2 < x < r_2 + R_2$ .

В области 1 на частицу действует гравитационная сила  $F_1$  со стороны облака ПП и сила  $F_2$  со стороны облака ПС. Как показано в тексте *Моделирование сбора вещества...*,

$$F_1 = -G \frac{M_1}{R_1^3} x.$$

Выразим массу  $M_1$  через плотность  $d_p$  вещества в облаке ПП.

$$F_1 = -G \frac{4}{3} \pi d_p x. \quad (1)$$

Со стороны облака ПС на частицу действует гравитационная сила  $F_2$

$$F_2 = \frac{GM_2}{r_2 - x} = G \frac{4}{3} \pi \frac{R_2^3 d_s}{r_2 - x}.$$

Суммарная сила  $F = F_1 + F_2$

$$F = -G \frac{4}{3} \pi \left( d_p x - \frac{R_2^3}{r_2 - x} d_s \right). \quad (2)$$

Учтем теперь, что частица взаимодействует и с веществом исходного облака. Будем считать в грубом приближении, что исходное облако имеет бесконечную протяженность и равномерно заполнено веществом с плотностью  $d_o$ . Можно показать, что учет этого взаимодействия в (2) сводится к уменьшению плотности облаков ПП и ПС на  $d_o$ . Идея состоит в следующем. Представим себе бесконечное пространство с плотностью  $d_o$ . В таком пространстве на частицу не действует никакая сила. Образует в нем две твердые пустые сферические полости разных размеров. Частица будет устремляться из положения между пустотами в ту точку пространства, где средняя плотность вещества больше. А это центр меньшей полости. Для наблюдателя это похоже на отталкивание частицы меньшей полостью. Формально можно положить, что частица находится в пустом пространстве, а в полостях находится вещество с отрицательной плотностью, численно равной  $d_o$ . Поэтому смешаем в облаках ПП и ПС их плотности с отрицательной плотностью окружающего пространства. Тогда не придется интегрировать силу гравитационного взаимодействия частицы по всему окружающему пространству. Вычислительная схема упрощается. Окончательно для области 1 получаем

$$F = -G \frac{4}{3} \pi \left( d_p - d_o \right) x - \frac{R_2^3}{r_2 - x} (d_s - d_o). \quad (3)$$

Проводя аналогичные выкладки, для областей 2 и 3 получим, соответственно

$$F = -G \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_p - d_o}{x^2} R_1^3 - \frac{d_s - d_o}{r_2 - x} R_2^3 \right). \quad (4)$$

$$F = -G \frac{4}{3} \pi \left( d_s - d_o \right) (x - r_2) + \frac{d_p - d_o}{x^2} R_1^3. \quad (5)$$

Полученные формулы (3 – 5) понадобятся, если придется интегрировать дифференциальное уравнение движения частицы в системе. Это несложная задача, поскольку есть готовые процедуры, например, в вычислительной системе MatLab. Важно также, что к полученным выражениям можно легко добавлять ускорение, связанное с вязким трением, которое частица будет испытывать в образующемся при столкновениях и испарениях газе. Пробуя различные разложения силы трения в ряд Тейлора, можно будет быстро оценить влияние газодинамических эффектов на поведение системы.

Из формул (3 – 5) мало что видно на качественном уровне. Легко можно лишь убедиться, что при одинаковых плотностях во всех трех областях частица нигде на оси  $x$  не будет испытывать сил. Как и должно быть в однородном пространстве. Видно также, что при малом различии в плотностях двух сгустков и исходного облака все процессы будут протекать с малой интенсивностью. А при углублении расслоения вещества по образовавшимся в исходном облаке объектам интенсивность всех процессов будет нарастать. Это, похоже, соответствует реальной действительности. Следовательно, мы правильно учли гравитационное взаимодействие частицы с веществом исходного облака.

Построим на основе формул (3 – 5) график сил, действующих на частицу во всех интересующих нас областях оси  $x$ . Он показан на рисунке 2.

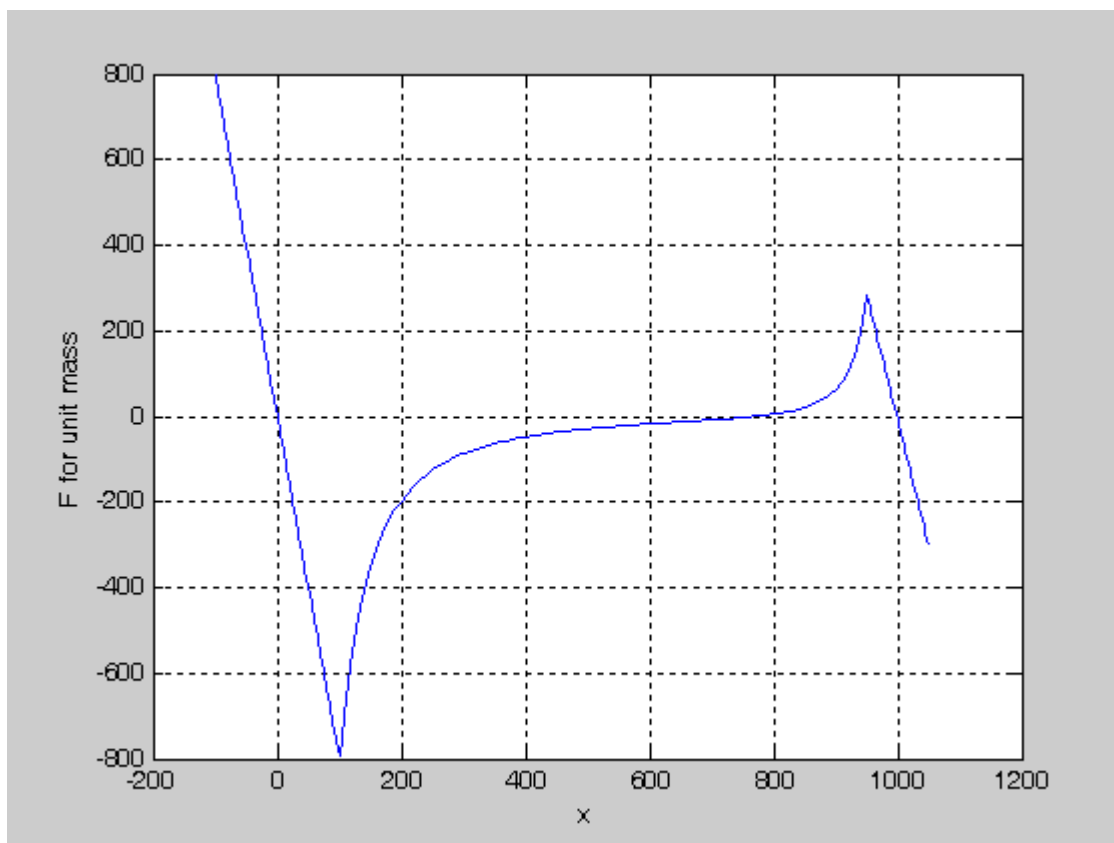


Рис. 2. Сила, действующая на частицу единичной массы. Все единицы измерения условны. Параметры системы:  $R_1 = 100$ ;  $R_2 = 50$ ;  $r_2 = 1000$ ;  $d_p = 2$ ;  $d_s = 1.5$ ;  $d_o = 0.1$ ;  $G = 1$ . Центр облака ПП находится при  $x = 0$ , центр ПС – при  $x = r_2$ .

### **Потенциальная энергия частицы в системе ПП – ПС – исходное облако**

Более наглядная картина получится, если проинтегрировать  $F(x)$  по  $x$  и, тем самым, получить зависимость потенциальной энергии  $U_{\text{um}}$  частицы единичной массы от  $x$ . Мы хорошо знаем картину поведения классической частицы в потенциальной яме любой сложной формы. Это даст нам возможность сделать ряд качественных выводов, не прибегая к решению дифференциального уравнения для движения частицы по оси  $x$ .

Вид потенциальной функции для частицы единичной массы показан на рисунке 3.

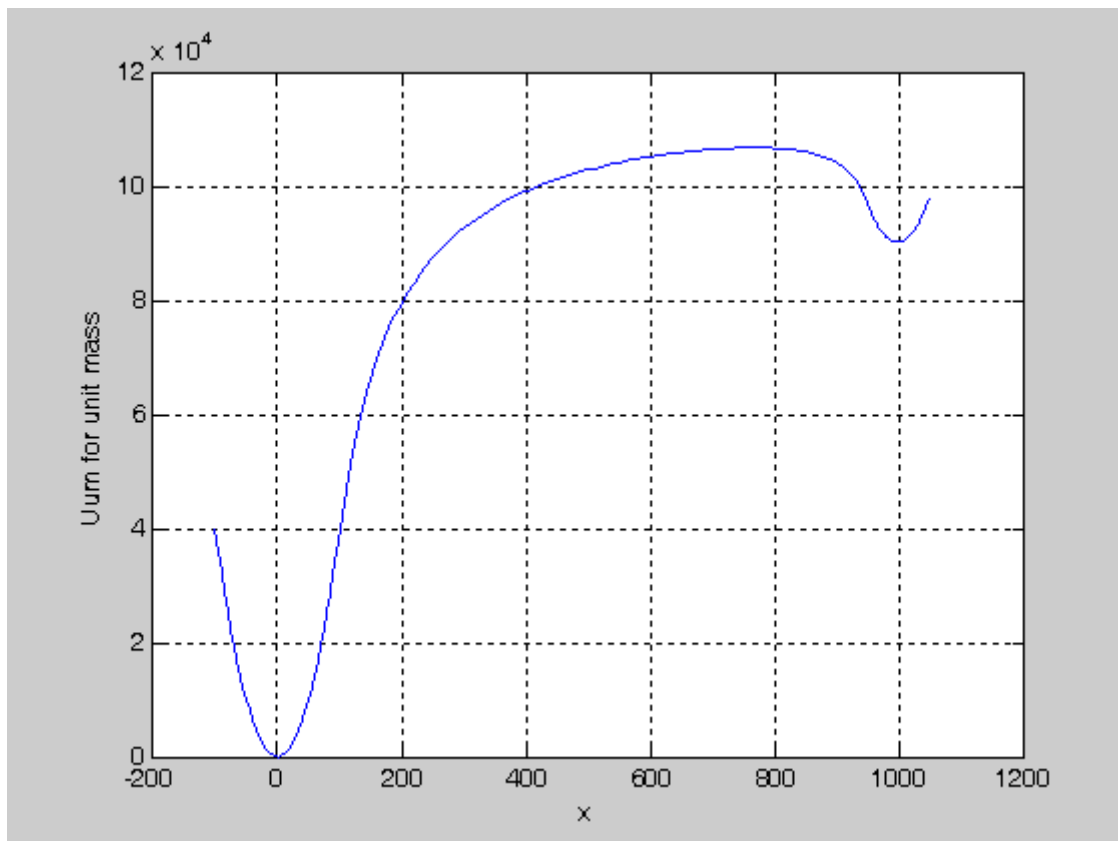


Рис. 3. Потенциальная энергия  $U_{um}$  частицы единичной массы в системе. Область определения функции ограничена слева и справа поверхностями облаков ПП и ПС. Принято, что  $U_{um} = 0$  в глубине локальной потенциальной ямы облака ПП.

Из этого графика сразу много видно. Рассмотрим поведение частицы, принадлежащей облаку ПС. Если энергия механическая частицы такова, что частица свободно движется, колеблется по оси от границы до границы своего облака, она никогда не сможет самостоятельно изменить характер своего движения. Справа ее движение ограничивает потенциальный барьер, связанный с выходом в исходное облако. Этот барьер на рисунке не показан, но его легко себе представить. Во всяком случае, этот барьер очень высок. Слева движение частицы ограничено не таким высоким барьером, но для классической частицы он непреодолим.

Что должно случиться, чтобы частица облака ПС преодолела левый барьер? Тогда она автоматически попадет в облако ПП.

Что должно случиться, чтобы частица, залетевшая в облако ПП, там и осталась?

Это простые вопросы, и модель дает на них очень простые ответы.

Что должно случиться, чтобы частица облака ПС преодолела левый барьер? Кто-то должен придать частице дополнительную скорость вдоль направления  $-x$ , дополнительную кинетическую энергию. Можно предложить два механизма.

Внутренний механизм. Облако ПС сильно разогрето, там идет интенсивное испарение и утечка газа из облака. Твердая частица может быть увлечена газодинамическими силами в направлении  $-x$ , разогнана до нужной скорости. Тогда облако ПС потеряет эту частицу, а

облако ПП ее приобретет. Разгон частицы в направлении  $x$  ничего не даст, поскольку справа имеется высокий потенциальный барьер. Он вернет частицу назад.

Внешний механизм. В облако ПС может ворваться частица из окружения, из материала исходного облака. Скорость такой частицы может быть достаточно велика, поскольку она стремится к сильному центру притяжения, к массивному облаку ПП. В объеме облака ПС внешняя быстрая частица может испытать неупругое столкновение. Возникнет более массивная частица, имеющая нужную скорость. Такая новая частица преодолит барьер и поступит во владение облака ПП. При этом масса облака ПП нарастет и за счет материала облака ПС, и за счет материала исходного облака. Весьма благоприятствующий процесс. Как росту ПП, так и похудению ПС.

Что должно случиться, чтобы частица, залетевшая в облако ПП, там и осталась? Столкнуться с собственной частицей облака ПП. Это возможно. Произойдет выделение тепловой энергии, новая частица упадет в глубокую часть ямы. А выделившаяся тепловая энергия породит процессы испарения вещества, сопряженные с теми эффектами, которыми интересуется Э.М. Галимов. А это перераспределение химических элементов из-за летучести и легкоплавкости, а также фракционирование изотопов из-за кинетических эффектов ухода пара за пределы системы.

### **Чего здесь не хватает?**

Модель пока носит качественный характер. Ее надо снабдить реалистичными параметрами. Это требует участия космохимиков. Надо провести вычислительные эксперименты, которые покажут, велик ли вклад данного этапа во всю историю перераспределения химических элементов и фракционирования изотопов в системе. Может быть, этот вклад невелик, и этим этапом можно подробно не заниматься? А если надо, то уже видно, что реализация модели и высказанных теоретических положений не требует значительных ресурсов.

Спасибо за внимание.

В. Дементьев

12.02.07

PS

Глубокоуважаемый Эрик Михайлович!

Если Вы будете отдавать этот и первый тексты на проверку некому физику (это весьма желательно), то я предварительно должен убрать введение и заключение из первого текста. Там отражен большой массив моего непонимания задачи и результатов Питерской группы. После Вашего звонка я многое уяснил. Данный текст прямо следует из Ваших разъяснений, за которые я весьма Вам признателен.

ДВА