О ПРОНИКНОВЕНИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОМУ КОМЕТЫ 67/P ЧУРУМОВА-ГЕРАСИМЕНКО

В.Б. Баранов

Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
baranov@ipmnet.ru

Аннотация. В коме комет магнитометры должны фиксировать исчезновение межпланетного магнитного поля, так как у комет собственное магнитное поле отсутствует. В физических условиях космического пространства структура (толщина) тангенциального разрыва, отделяющего кометную и межпланетную плазмы, в стационарном случае может определяться эффектом Холла [1]. Данные, полученные при помощи аппарата Rosetta вблизи кометы Чурюмова – Герасименко показывают, что граница между комой кометы и солнечным ветром имеет нестационарный характер. В докладе проводится анализ возможности определения толщины таких границ (magnetic cavities) в нестационарных условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-01-00302.

Введение

Начало исследования обтекания комет солнечным ветром при помощи приборов, устанавливаемых на космических аппаратах, относится к марту 1986 года, когда аппараты Вега-1, Вега-2, Giotto, Suissei и Sakigake прошли вблизи кометы Галлея, измеряя, в частности, плазменные параметры и магнитное поле возмущенного кометным газом солнечного ветра. Только аппарату Giotto удалось войти в кому этой кометы, что сопровождалось резким исчезновением межпланетного магнитного поля. Данные магнитометра показали, что толщина переходного слоя была равна ~ 25 км. Формула, полученная в работе (1) для стационарной комы, показала, что этот результат можно объяснить нарушением принципа «вмороженности» магнитного поля в плазму вследствие влияния токов Холла.

В 2004 году Европейским космическим агентством (ESA) был запущен аппарат Rosetta, основной целью которого было исследование физических параметров вблизи кометы Чурюмова-Герасименко (67P/CG) после его сближения в 2014 году с кометой. Маневрирование аппарата вокруг кометы в течение более двух лет дало возможность исследовать изменение этих параметров при различных гелиоцентрических расстояниях вблизи перигелия. В частности, большой резонанс вызвало обнаружение большого количества областей, в которых исчезает межпланетное магнитное поле, и эволюция этих областей со временем. При этом встречались как одиночные образования с четко выраженными границами, так и кластеры, т. е. быстрое чередование большого количества таких областей. Последнее интерпретировалось как неустойчивость тангенциального разрыва или границы комы кометы. Ниже приводятся некоторые результаты экспериментальных данных по обнаружению областей исчезновения магнитного поля (или magnetic cavities) вблизи комет Галлея (стационарная граница) и Чурюмова – Герасименко (нестационарная граница). Предпринимается попытка определения толщины переходных областей влиянием токов Холла.

К интерпретации экспериментальных данных

Чтобы оценить толщину структуры тангенциальных разрывов, образованной вследствие влияния токов Холла, в [1] использовалось следующее уравнение индукции магнитного поля в безразмерной форме

$$St\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = rot[\mathbf{V}\times\mathbf{B}] + \frac{1}{\mathrm{Re}_m}\nabla^2\mathbf{B} + \frac{\omega_e\tau_e}{\mathrm{Re}_m}\left[(rot\mathbf{B}\cdot\nabla)\mathbf{B} - (\mathbf{B}\cdot\nabla)rot\mathbf{B} + ...\right] + ..., \qquad (1)$$

где последний член справа определяет эффект Холла, который и нарушает условие «вмороженности» магнитного поля B в плазму. Здесь St - число Струхаля, определяющее влияние нестационарных процессов, Re_m - магнитное число Рейнольдса, ω_e - ларморовская частота вращения электронов, τ_e - время между их столкновениями. В физических условиях космического пространства обычно имеют место неравенства $\mathrm{Re}_m >> \omega_e\tau_e >> 1$, т.е. параметр у последнего члена мал, но он содержит смешанные вторые производные. Тогда оценки для стационарного случая дают следующую формулу для толщины тангенциального разрыва вследствие эффекта Холла (см. в [1])

$$\delta_h \sim \frac{cB_0}{4\pi e n_{e0} V_0} = 0.5\cdot 10^{19}\frac{B_0}{n_{e0}V_0}, \qquad (2)$$

где с – скорость света, е – заряд электрона, B_0 - максимальная величина магнитного поля перед тангенциальным разрывом, а n_{e0} и V_0 - экспериментальные данные по концентрации электронов и скорости

кометной плазмы. Для кометы Галлея эта формула дает величину, равную 30 км, что хорошо совпадает с данными эксперимента. На Рис. 1 приведен вход аппарата Rosetta в кластер magnetic cavities (см. [2]).

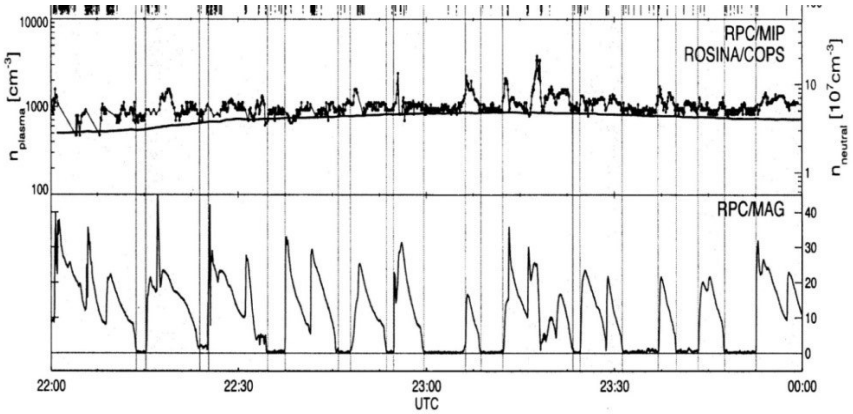

Рис. 1. Один из примеров пересечения кластера у кометы 67P/CG, (25.07.15)

При интерпретации кластерных образований у кометы Чурюмова – Герасименко обычно исходят из предположения о неустойчивости Кельвина – Гельмгольца тангенциального разрыва, т.е. границы раздела солнечного ветра и ее комы. Тогда вместо формулы (2) для нестационарной толщины структуры тангенциального разрыва получаем формулу

$$\delta_h \sim \frac{cB_0}{4\pi e n_{e0} V_0} = 0.5\cdot 10^{19} \frac{B_0}{n_{e0} V_0} (St)^{-1}. \qquad (3)$$

Если в формулу (2) для стационарной комы подставить измеряемые аппаратом значения параметров, то для толщины переходного слоя получим 25 км. Однако анализ экспериментальных данных по комете 67P/CG показывает, что порядок величины этого слоя не превосходит ~ 600 м (см, нпример, [3]). Из формулы (3) видно, что для совпадения теоретической оценки с данными эксперимента для нестационарной границы число Струхаля должно быть достаточно велико (> 40). При характерном размере комы (~50 км) период колебаний должен быть очень мал (t < 1 сек)

Заключение

В настоящее время многие экспериментальные данные, полученные при помощи аппарата Rosetta, находятся на стадии их обработки и пока еще не опубликованы. Вследствие этого практически невозможно оценить число Струхаля, а, следовательно, и толщину нестационарной границы между солнечным ветром и комой кометы Чурюмова – Герасименко.

Литература

1. Баранов В.Б., Письма в АЖ, т. 39, № 11, 2013.
2. Henri P. et al., MNRAS, v. 469, p.S372.
3. Baranov V.B., Alexashov D.B., Lebedev M.G., MNRAS, v. 482, p. 5642, 2019.