

2019г.

## Подавленная вязкость горячей межгалактической плазмы в скоплениях галактик

Е.Чуразов, А.Вихлинин

Горячий межгалактический газ в скоплениях галактик характеризуется большой длиной свободного пробега по кулоновскому рассеянию  $\sim 10\text{-}20$  кпк, на много порядков превышающей ларморовский радиус тепловых ионов  $\sim 10^{-12}$  кпк. При этом плотность энергии магнитного поля составляет около процента от тепловой энергии газа. Вопрос об эффективной теплопроводности и вязкости такой среды остается открытым. Наблюдения флуктуаций плотности газа в рентгеновском диапазоне длин волн, выполненные в работе, показали, что такие флуктуации присутствуют на масштабах, сравнимых с длиной свободного пробега. Эти результаты напрямую показывают, что, как и в солнечном ветре, вязкость газа подавлена как минимум на несколько порядков (а, возможно, и на много порядков) по сравнению с плазмой, в которой вязкость определяется чисто кулоновскими соударениями. Следовательно, широко используемые численные модели формирования и эволюции скоплений, предполагающие малую вязкость, должны давать более адекватное описание поведения газа, чем модели с вязкостью, определяемой длиной свободного пробега ионов.

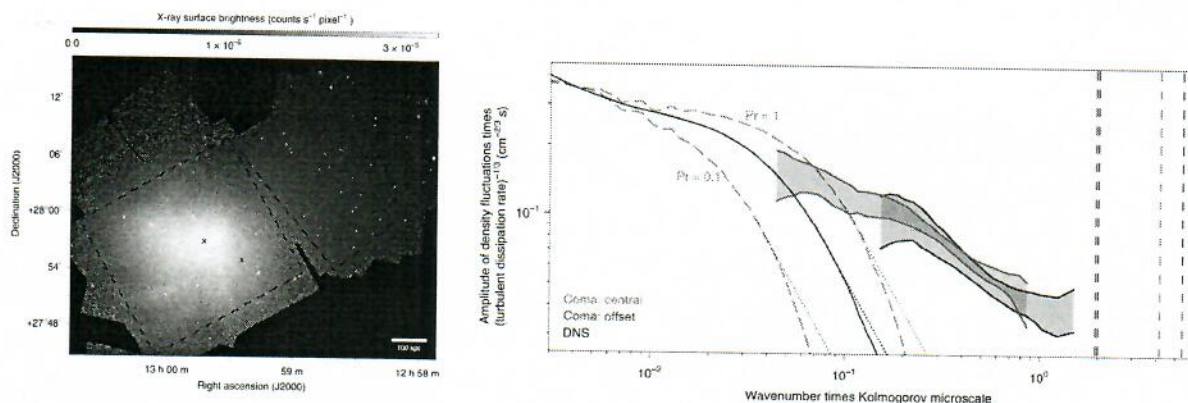


Рисунок: Слева: Изображение скопления галактик Кома в рентгеновском диапазоне. Справа: Амплитуда флуктуаций плотности как функция волнового числа (цветные кривые). Для сравнения, черная кривая показывает ожидаемую зависимость для газа без магнитного поля, в котором вязкость определяется длиной свободного пробега заряженных частиц за счет соударений.

Zhuravleva I., Churazov E., Schekochihin A. A., Allen S. W., Vikhlinin A., Werner N. "Suppressed effective viscosity in the bulk intergalactic plasma", Nature Astronomy, 3, 832 (2019)

II. Физические науки, направление 16. Номер темы в системе «Парус»: 0028-2019-0014

## Разработка методов создания приборов звездной ориентации нового поколения для обеспечения высокоточной геопривязки данных ДЗЗ

Авторы: Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Белинская Е.В., Воронков С.В., Куркина А.Н., Куделин М.И., Никитин А.В., Форш А.А.

Одной из важнейших характеристик спутниковых данных ДЗЗ является точность их геопривязки. Этот вопрос долгое время был недооценен в нашей стране, хотя без его решения не удастся обеспечить составление карт местности. Обеспечение точности геопривязки во многом определяется точностью измерения ориентации бортовыми средствами КА и точностью измерений приборов звездной ориентации. Решение этих вопросов носит комплексный характер. Необходимо бороться со случайной составляющей погрешности определения ориентации звездных датчиков, использовать несколько звездных приборов для построения равноточной ориентации и бороться с медленно меняющимися и низкочастотными ошибками, в том числе вызванными термоупругими деформациями конструкции приборов и КА. Разработанный комплекс мер позволяет создавать приборы звездной ориентации нового поколения и обеспечивать геопривязку с точностью единиц метров. Основа перечисленных методов борьбы с медленно меняющимися и низкочастотными измерениями ориентации заключается в летной фотограмметрической калибровке приборов звездной ориентации по звездам и построение термостабильной конструкции приборов и КА.

Публикации:

1. Аванесов Г.А. Звездные датчики ориентации. Еще одна профессия современного телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. Т. 1. № S3. С. 5-14
2. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Никитин А.В., Форш А.А. Вопросы обеспечения географической привязки снимков дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 59-64.
3. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д., Юматов Б.А. Базовый каталог звезд для датчиков ориентации КА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 65-74.
4. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Фотометрическая модель звездного датчика ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 75-84.
5. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Белинская Е.В., Брысин Н.Н., Воронков С.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С. Исследование и компенсация методической погрешности измерения координат звезд датчиков ориентации при летной эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. В печати.

II. Физические науки, направление 16, III. Технические науки, направление 21  
Номер темы в системе «Парус»: 0028-2019-0001

# Обнаружение сверхтонких электронных вложенных токовых слоев в хвосте магнитосферы Марса

Авторы-сотрудники ИКИ:

Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М., Шувалов С.Д., В. Н. Ермаков, Малова Х.В., Попов В.Ю.

Используя измерения магнитного поля с высоким временным разрешением на спутнике MAVEN в хвосте магнитосферы Марса впервые обнаружены вложенные сверхтонкие токовые слои (СТС) (Рис.1) толщина которых  $L \ll \rho_p$  ( $\rho_p$  – гирорадиус тепловых протонов), а в ряде случаев сопоставима с гирорадиусом тепловых электронов. Плотность тока в таких слоях составляет десятки  $\text{нА/м}^2$ , что во много раз превышает плотность ионного тока. Показано, что такие слои, часто наблюдаются в периоды прохождения быстрых плазменных потоков и могут находиться в метастабильном состоянии. Трансформация магнитной энергии запасенной в таких структурах может стать причиной ускорения и/или дополнительного нагрева плазмы в токовом слое хвоста магнитосферы Марса. Статистически показано, что наблюдаемый пространственный скейлинг СТС  $L \sim (0.03 - 0.12)\rho_p$  хорошо согласуется со скейлингом предсказываемым моделью тонкого анизотропного слоя ( $L \sim \rho_p(B_n/B_0)$ ) в хвосте магнитосферы Земли. Данный результат указывает на универсальность кинетических механизмов формирования тонких токовых структур не зависящих от происхождения магнитосферы.

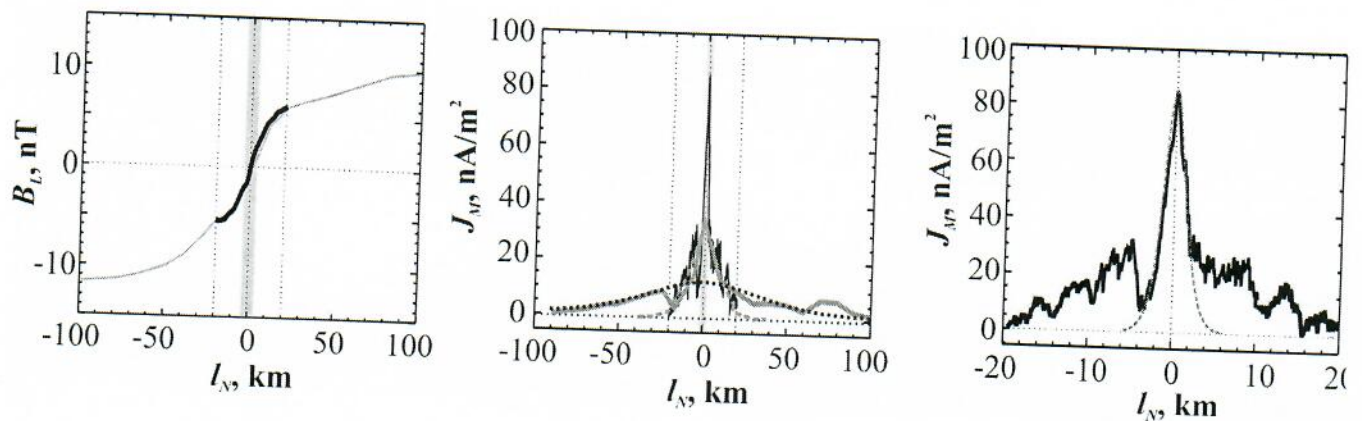


Рисунок 1. Пространственные профили  $B_L(l_N)$  (левый график), плотности тока  $J_M(l_N)$  на ионных масштабах (центральный график) и СТС на электронных масштабах (правый график). СТС на левом и центральном графиках затенен розовым. Пунктиром показаны профили Харриса наложенные на три вложенных ТС (электронный – красный пунктир на правом графике, протонный – зеленый пунктир и слой на тяжелых ионах – тёмно-синий пунктир на центральном графике).

## Публикация:

Grigorenko, E. E., Zelenyi, L. M., DiBraccio, G., Ermakov, V. N., Shuvalov, S. D., Malova, H. V., et al.(2019). Thin current sheets of sub-ion scales observed by MAVEN in the Martian magnetotail. Geophysical Research Letters, 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL082709>

II. Физические науки, направление 16. Номер темы в системе «Парус»: 0028-2019-0017

## Необычное поведение потока массы солнечного ветра в период максимума солнечной активности

О.А. Катушкина (ИКИ РАН), В.В. Измоленов (ИКИ РАН), D. Koutroumpa (LATMOS, CNRS), E. Quemerais (LATMOS, CNRS), L.K. Jian (NASA Goddard Space Flight Center)

Работа посвящена исследованию широтных вариаций потока массы солнечного ветра в различные фазы солнечного цикла. На основании анализа данных SOHO/SWAN по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению получена зависимость потока массы от времени и гелиошироты в период с 1996 по 2018 гг. (см. Рис.). Показано, что в периоды солнечных максимумов 2001-20013 и 2014-2016 гг. наблюдались характерные максимумы потока массы на средних гелиоширотах. Проведено сравнение результатов анализа данных SOHO/SWAN с результатами численного моделирования параметров солнечного ветра в рамках модели Enlil-WSA. Показано, что результаты модели качественно подтверждают наличие максимумов, обнаруженных по данным SWAN. Обсуждаются возможные физические причины образования этих максимумов, а также их связь с распределением корональных дыр на Солнце.

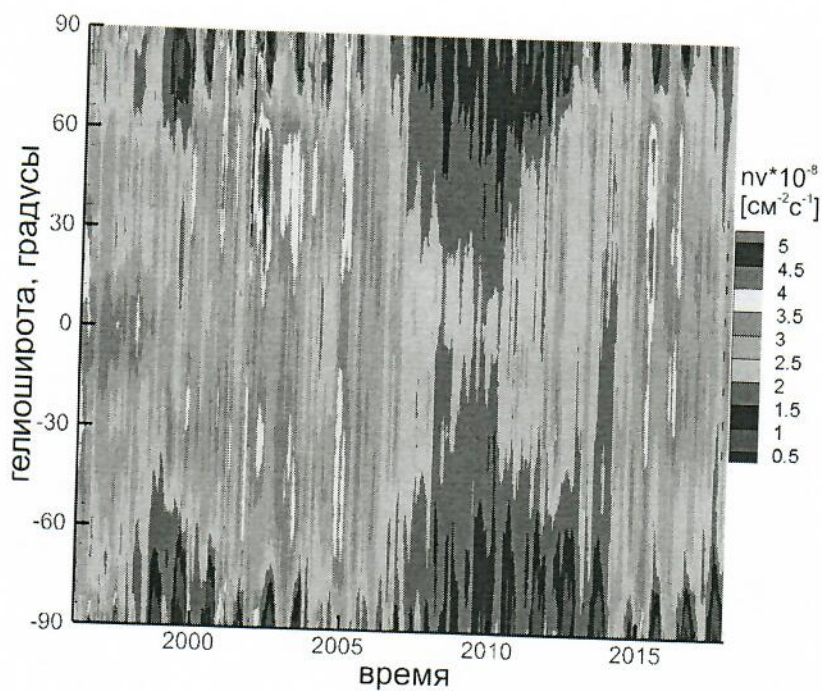


Рисунок Зависимость потока массы солнечного ветра на 1 а.е. от времени и гелиошироты. Результат анализа данных SOHO/SWAN.

Публикация: Katushkina O., Izmodenov V., Koutroumpa D., Quemerais E., Jian L., "Unexpected behavior of the solar wind mass flux during solar maxima: two peaks at middle heliolatitudes", Solar Physics, Volume 294, Issue 2, article id. 17, 2019, doi: [10.1007/s11207-018-1391-5](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1391-5)

II. Физические науки, направление 16. Номер темы в системе «Парус»: 0028-2019-0017

## Воздействие горных массивов Земли Афродиты на динамику атмосферы (очертания рельефа Земли Афродиты в поле зонального ветра на верхней границе облаков).

M. V. Patsaeva, I. V. Khatuntsev, L.V. Zasova, A. Nauchecorne, D. V. Titov, J.-L. Bertaux (2019). Solar Related Variations of the Cloud Top Circulation Above Aphrodite Terra From VMC/Venus Express Wind Fields. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 1864–1879. <https://doi.org/10.1029/2018JE005620>

Важнейшей особенностью глобальной динамики атмосферы Венеры является ее ретроградная зональная суперротация (движение атмосферных масс в направлении, противоположном обращению Венеры вокруг Солнца). При этом скорость ветра растет от 1.5 м/с у поверхности до 100 м/с на верхней границе облачного слоя (облачный слой Венеры расположен на высоте 50-70 км). Поскольку контрасты в УФ области спектра на дневной стороне Венеры в области верхней границы облачного слоя на высоте  $70 \pm 2$  км достигают 30% (для сравнения <3% в видимой области), это позволяет по перемещению облачных деталей на изображениях измерять скорости горизонтального ветра. Измерения изображений, полученных камерой VMC Venus Express, (ESA) в 2006 – 2013 гг в УФ фильтре позволили обнаружить неизвестное ранее явление: влияние рельефа подстилающей поверхности на динамику верхнего облачного слоя (65-70 км). Была выявлена обширная область торможения зонального потока в подсолнечной области (в полдень) над горными массивами Земли Афродиты (максимальная высота 4.7 км, широта  $10^\circ\text{S}$ ). Уменьшение зональной скорости ветра составляет до 15 м/с, при этом очертания «области замедления» повторяют контуры рельефа подстилающей поверхности (рис.1). Причиной этого, вероятно, являются атмосферные гравитационные волны, создаваемые горизонтальным потоком, набегающим на горные массивы. Уникальность результата в том, что впервые наблюдается баротропная стоячая волна. По-видимому, в подсолнечной области (в полдень) вблизи экватора возникают условия, при которых генерируемые вблизи поверхности волны достигают верхнего облачного слоя, сохраняя очертания рельефа поверхности. После полудня область торможения смещается на поле скоростей в направлении суперротации, деформируется и постепенно под действием суперротации размывается. Обнаруженный эффект важен для понимания динамики венерианской атмосферы.

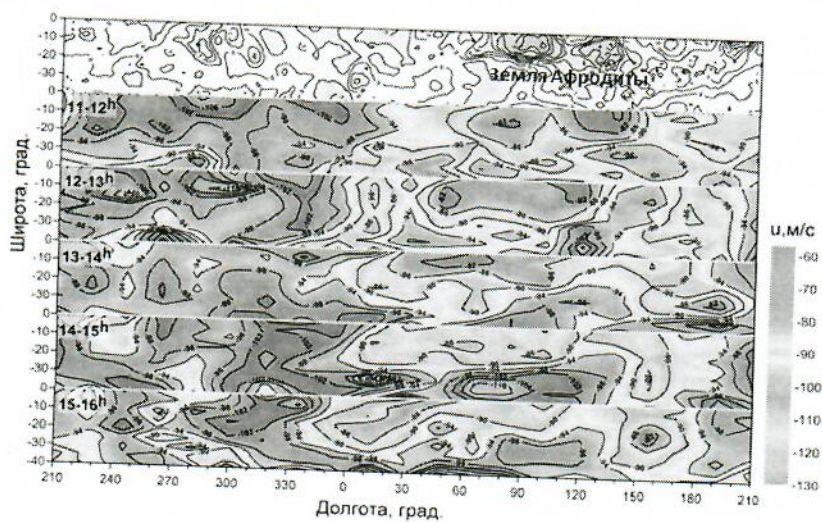


Рисунок 1. На верхней панели показана топографическая карта, составленная по данным КА Магеллан; на нижних 5 панелях приведены карты скорости зонального ветра на верхней границе облаков, полученные с интервалом 1 час местного времени (направление зональной суперротации справа налево)

II. Физические науки, направление 16. Номер темы в системе «Парус»: 0028-2019-0002

## Экспериментально подтверждена возможность трехмерной визуализации подповерхностной структуры грунта в планетарных миссиях

Литвак М.Л.<sup>1</sup>, Бармаков Ю.Н.<sup>2</sup>, Беличенко С.Г.<sup>2</sup>, Боголюбов Е.П.<sup>2</sup>, Козырев А.С.<sup>1</sup>, Митрофанов И.Г.<sup>1</sup>, Носов А.В.<sup>1</sup>, Перхов А.С.<sup>1</sup>, Самошин А.В.<sup>2</sup>, Санин А.Б.<sup>1</sup>, Шеленинов С.А.<sup>2</sup>, Швецов В.Н.<sup>3</sup>, Юрков Д.И.<sup>2</sup>, Зонтиков О.А.<sup>3</sup>, Зверев В.И.<sup>2</sup>

Были проведены наземные обработки с прототипом активного космического гамма-спектрометра, основанного на методе меченных нейтронов, и протестированы методы построения 3-D модели элементного состава подстилающей поверхности под космическим аппаратом. В рамках этого метода подстилающая поверхность под луноходом или марсоходом облучается потоком быстрых нейтронов, произведенных нейтронным генератором за счет реакции  $D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n$ . Во время нейтронного облучения регистрируется время и направление вылета альфа-частицы, что автоматически означает регистрацию времени и направления вылета нейтрона и позволяет пометить его. Таким образом можно отобрать только те нейтроны, которые облучают небольшой участок поверхности под космическим аппаратом, а времяпролетная методика позволяет уточнить, с какой глубины в гамма-детектор пришел гамма-квант, образовавшийся в результате реакции неупругого рассеяния нейтрона на ядрах порообразующих элементов.

Проведенной работой экспериментально подтверждена возможность изучения слоистой структуры грунта посредством предложенной методики. В частности, первые опыты показали, что можно достоверно обнаружить тонкий подповерхностный углеродосодержащий слой на глубине 10-20 см (что, например, важно для поиска подповерхностных залежей карбонатов на Марсе) и обедненные слои с пониженным содержанием кремния.

### Публикации:

Litvak M.L., Barmakov Y.N., Belichenko S.G., Bogolubov E.P., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Nosov A.V., Perkhov A., Samoshin A.V., Sanin A.B., Sholeninov S.E., Shvetsov V.N., Yurkov D.I., Zontikov A. O., Zverev V.I. 3-D Imaging of subsurface structure in planetary missions // Nuclear instruments and methods, submitted for publication.

Направление ПФНИ ГАН: II. Физические науки, направление 16  
Номер темы в системе «Парус»: 0028-2018-0003

### Предложен метод, позволяющий осуществить моделирование переноса нейтрона с поверхности на орбиту и учитывающий время жизни нейтрона и гравитационное поле планеты

Санин А.Б.<sup>4</sup>, Митрофанов И.Г.<sup>1</sup>, Бахтин Б.Н.<sup>1,5</sup>, Литвак М.Л.<sup>1</sup>

Эксперименты по космической ядерной планетологии играют важную роль в изучении состава поверхности планет и распределения летучих веществ. При этом, для определения концентрации летучих веществ в грунте планеты обычно необходимо выполнить модельно-зависимую интерпретацию экспериментальных данных. Используемая модель должна детально описывать условия проведения эксперимента и параметры окружающей среды, влияющие на производство и перенос нейтронов, а также учитывать такой параметр, как конечное время жизни нейтрона. Численная модель этих процессов создаётся на основе существующего в настоящее время разнообразного программного

<sup>1</sup> ИКИ РАН

<sup>2</sup> ВНИИА

<sup>3</sup> ОИЯИ

<sup>4</sup> ИКИ РАН

<sup>5</sup> ИМАШ РАН

обеспечения, позволяющего методом Монте-Карло моделировать ядерно-физические процессы в задачах со сложной геометрией, где требуется учёт времени и широкого диапазона энергий рассматриваемых частиц. Однако, такое программное обеспечение обычно не включает в себя или включает в очень упрощенном виде описание гравитационного поля, необходимого для моделирования распространения нейтронов от поверхности планеты до орбиты космического аппарата с нейтронными детекторами на борту.

В ходе проведенной работы был предложен метод, позволяющий осуществить моделирование переноса нейтрона с поверхности на орбиту и учитывающий как время жизни нейтрона, так и гравитационное поле планеты. Предложенный метод позволил изучить влияние силы тяжести и конечного времени жизни нейтрона на спектральное и угловое распределения потока нейтронов на разных высотах орбиты космического корабля. Этот метод был использован для анализа экспериментальных данных прибора ЛЕНД на борту космического аппарата НАСА LRO с целью оценить, как включение конечного времени жизни нейтрона и гравитационного поля Луны в численную модель эксперимента может повлиять на интерпретацию измерений нейтронного потока от Луны, выполненных нейтронными детекторами прибора LEND. Установлено, что влияние эффектов гравитации и конечного времени жизни нейтронов не является критичным для результатов, полученных прибором ЛЕНД, но в будущем будет полезно учитывать влияние указанных эффектов для более точной оценки полученных значений водородного эквивалента воды. Кроме того, эти эффекты должны быть тщательно рассмотрены для марсианских орбитальных нейтронных детекторов, таких как ХЭНД на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей» и ФРЕНД российско-европейского проекта «ЭкзоМарс», работающих на более высоких по сравнению с LRO орбитах – около 400 км.

Публикации:

A.B. Sanin, I.G. Mitrofanov, B.N. Bakhtin, M.L. Litvak. On the account of the Moon's gravitational field in LEND measurements // Planetary and Space Science, Volume 179, 2019, Available online 12 August 2019, 104720.

II. Физические науки, направление 16

Номер темы в системе «Парус»: 0028-2018-0003

Эти результаты исследований утверждены Учёным советом 28 ноября 2019г., протокол № 5.

Директор ИКИ РАН

чл.-корр. РАН



А.А. Петрукович

Учёный секретарь ИКИ РАН

к.ф.-м.н.



А.М. Садовский