

Тема ТЕОРИЯ Физика многомасштабных нелинейных процессов в атмосферах планет солнечной системы.

Гос.рег. №01.20.03 02941

Науч. Руководитель: к.ф.-м.н. А.С.Петросян

Предложен метод линейного форсинга для исследования сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности плазмы в инерционном интервале. В линейном форсинге предполагается, что вынуждающая сила прямо пропорциональна скорости в уравнении сохранения импульса. Так как рассматривается сжимаемая МГД турбулентность, то в систему МГД уравнений входит уравнение сохранения магнитной индукции и в этом случае вынуждающая сила пропорциональна магнитному полю в уравнении магнитной индукции. В отличие от спектрального представления внешней силы, линейная вынуждающая сила действует на все масштабы физического пространства и тем самым может более точно воспроизвести картину взаимодействия мод в сжимаемом турбулентном МГД течении. Фактически, линейный форсинг соответствует турбулентности с вынуждающей силой, вызванной средним градиентом скорости, то есть сдвигом. В уравнении магнитной индукции линейная внешняя сила может интерпретироваться как генерация магнитной энергии вследствие взаимодействия между магнитным полем и средним сдвигом. Получены выражения для внешней силы, обеспечивающие нахождение статистически стационарного режима турбулентности. Найдены выражения для линейной внешней силы, использованные для формулировки метода крупных вихрей. Изучены потенциальные возможности метода крупных вихрей воспроизвести физику изучаемого течения в статистически стационарном режиме, как для политропной, так и для теплопроводящей плазмы. Продемонстрирована эффективность метода крупных вихрей для изучения масштабно-инвариантных свойств сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности.

A. A. Chernyshov, K. V. Karelsky, A. S. Petrosyan “Forced turbulence in large eddy simulation of compressible magnetohydrodynamic turbulence”, *Physics of Plasmas*, 17, 102307, 2010
д.ф.-м.н. зав. Сектором А.С. Петросян тел. (495) 333-5478 Email: apetrosy@iki.rssi.ru

Проведено численное моделирование сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности с вынуждающей внешней силой. Показано, что для случая, когда в начальный момент времени кинетическая энергия течения намного больше магнитной энергии наблюдается спектр Колмогорова с показателем степени $-5/3$, в то же время, если в начальный момент времени магнитная энергия больше кинетической энергии имеет место спектр Ирошникова-Крайчана с показателем $k^{-3/2}$. Показано, что линейный форсинг является подходящим методом для моделирования сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности в физическом пространстве как для прямого численного моделирования, так и для метода крупных вихрей.

A. A. Chernyshov, K. V. Karelsky, A. S. Petrosyan «Novel developments in subgrid-scale modeling for space plasma. Weekly compressible turbulence in the local interstellar medium», *Physica Scripta*, принята в печать, 2010

д.ф.-м.н. зав. сектором А.С. Петросян тел. (495) 333-5478 Email: apetrosy@iki.rssi.ru

Исследованы нелинейные магнитогидродинамические течения тяжёлой жидкости, описываемые простейшими магнитогидродинамическими уравнениями мелкой воды на ровной границе в отсутствие внешних сил. Эти уравнения являются основой для создания моделей и развития теории многослойных стратифицированных магнитогидродинамических течений в приближении мелкой воды, а также для развития магнитогидродинамической теории мелкой воды при наличии внешних сил, например, вращения или гидравлического трения. Гиперболичность магнитогидродинамических уравнений мелкой воды определяет наличие не только гладких, но и разрывных решений. Даже в случае, когда начальные условия являются гладкими, нелинейный характер уравнений вместе с их гиперболичностью за конечное время может привести к разрывному решению. Изучены простые автомодельные решения: магнитогравитационные волны разрежения, магнитогравитационные ударные волны и альфвеновские волны. Такие решения являются основополагающими в исследовании нелинейных волновых явлений и позволяют найти точное решение задачи распада произвольного разрыва. Получено точное явное решение начальной задачи с кусочно-постоянными начальными условиями для уравнений магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды, впервые возникшей в газовой динамике (задача Римана). Показано, что решение представляет собой одну из пяти волновых конфигураций: «две магнитогравитационные ударные волны, две альфвеновские волны»; «левая магнитогравитационная ударная волна, правая магнитогравитационная волна разрежения, две альфвеновские волны»; «левая магнитогравитационная волна разрежения, правая магнитогравитационная ударная волна, две альфвеновские волны»; «две магнитогравитационные волны разрежения, две альфвеновские волны»; «две магнитогравитационные волны разрежения, зона вакуума». Найдены условия на начальные данные, при которых реализуется каждая конкретная конфигурация.

К.В. Карельский, А.С. Петросян, С.В. Тарасевич «Нелинейная динамика магнитогидродинамических течений тяжелой жидкости в приближении мелкой воды» ЖЭТФ, представлена в печать 2010.

к.ф.-м.н, с.н.с. К.В. Карельский тел. (495) 333-5478 Email: kkarelsk@iki.rssi.ru

Исследованы магнитогидродинамические течения тяжёлой жидкости в приближении мелкой воды на неровной границе в отсутствие внешних сил. Получена система уравнений, описывающих такие течения. Показано, что она имеет частные решения типа волн Римана только в случае, когда граница является наклонной плоскостью. Найдены частные решения исходной системы: магнитогравитационные волны сжатия и разрежения, бегущие альфвеновские волны, магнитогравитационные и альфвеновские ударные волны. Показано, что магнитогравитационные волны сжатия падают с образованием ударной волны. Найдены все автомодельные решения системы уравнений МГД в приближении мелкой воды как частный случай решений типа волн Римана. Получено точное решение задачи распада произвольного разрыва для уравнений магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды. Показано, что оно представляет собой одну из пяти волновых конфигураций. Показаны сходства и различия между решениями на ровной и неровной поверхностях. Найдены условия на начальные данные, при которых реализуется каждая конкретная

конфигурация. Найдена замена координат, позволяющая свести уравнения МГД мелкой воды на неровной границе к уравнениям на ровной поверхности.

К.В. Карельский, А.С. Петросян, С.В. Тарасевич «Нелинейная динамика магнитогидродинамических течений тяжелой жидкости над неоднородной границей в приближении мелкой воды» Physica D, представлена в печать 2010.

к.ф.-м.н, с.н.с. К.В. Карельский тел. (495) 333-5478 Email: kkarelsk@iki.rssi.ru

Разработана новая конечно-объемная схема для решения уравнения Власова с использованием сетки, ячейками которой являются ромбы. Преимуществом этой схемы является то, что при решении задачи Римана на гранях ромбов в поток через границу входят скорости для скоростей изменения обеих фазовых координат. По этой схеме написана программа, с помощью которой производится расчет тестовой задачи об ионно-звуковой неустойчивости. Также была улучшена программа, выполняющая расчеты по разработанной ранее другой конечно-объемной схеме для уравнения Власова. Теперь она может выполнять расчеты для большего количества шагов по времени и для больших пространственных сеток. Также было оптимизировано быстродействие программы, вывод данных и работа с памятью. С помощью этой программы также выполняются расчеты тестовых задач.

д.ф.-м.н. зав. сектором А.С. Петросян тел. (495) 333-5478 Email: apetrosy@iki.rssi.ru

Тема ДИАГНОСТИКА Диагностика поверхностей объектов Солнечной системы по изучению вторичных эффектов, возникающих под активным воздействием искусственного или природного происхождения
Гос.рег. № 0120.0 501195

Научный руководитель: д-ф.-м.н. Манагадзе Г.Г.

В рамках темы «Диагностика» основные работы лаборатории 504 в истекшем году были направлены на разработку, изготовление, и проведение физической отработки бортовых приборов нового поколения - ЛАЗМА и МАНАГА-Ф. Приборы предназначались для миссии Фобос-Грунт. Были выполнены и следующие научно-исследовательские работы, получены результаты, подготовлены и опубликованы статьи представленные ниже.

Научные задачи предстоящей космической миссии на Фобос были связаны с исследованиями основных геохимических характеристик реголита Фобоса с помощью лазерной времяпролетной масс-спектрометрии и масс-анализатора в потоков вторичных ионов, выбиваемых с поверхности Фобоса под воздействием водородных ионов Солнечного ветра.

Прибор ЛАЗМА являлся первой версией оригинального и нового бортового инструмента созданного в ИКИ РАН и запатентованного в России. Данный прибор предназначается для измерения изотопного и элементного состава реголита Фобоса методом лазерной времяпролетной масс-спектрометрии. Эти измерения могут подтвердить

предположения, что вещество Фобоса является той первозданной субстанцией, по составу близкой к углистым хондритам, из которой формировалась Земля. Результаты измерения способны также подтвердить и предлагаемый в работе оригинальный механизм возникновения аномального поглощения реголита Фобоса. Полученные результаты об элементном составе реголита могут содержать информацию об условиях формирования Фобоса, его происхождении и эволюции, а также дать сведения о его возрасте.

Сценарий измерения заключается в следующем: после установки пробы реголита на вращающемся диске на заданном расстоянии, отвечающем фокусному расстоянию лазерного излучателя, на нее производится импульсное воздействие длительностью 7 нс и с плотностью мощности $\sim 10^9$ Вт/см². Такое воздействие вызывает полную атомизацию и ионизацию вещества пробы, а сильный перегрев, выброс образованных ионов находящихся в составе мишени в виде плазменного факела. Высокоскоростные ионы эмитируемые из образовавшейся плазмы в режиме свободного разлета попадают во времяпролетный масс-анализатор, где разделяются по времени пролета, что позволяет определить их массовый и изотопный состав.

. После регистрации и обработки спектра по соотношению основных или матричных элементов, можно с хорошей достоверностью определить, к какому типу метеоритов можно отнести Фобос, и насколько он по составу близок к протопланетному облаку или насколько он «стар». Далее из анализа соотношений интенсивности массовых пиков отдельных элементов, по соответствующим данным предварительных калибровок включённых в библиотеку спектров, можно определить от какого минерала мог быть получен зарегистрированный прибором массовый спектр, то есть, определить его минералогический состав.

Прибор позволяет исследовать вещества с произвольными физическими свойствами, в том числе находящиеся и в виде мелкодисперсного порошка. Обработка спектра после его передачи на Землю будет проводиться в автоматическом режиме по заранее разработанной программе. Использование диска с прецизионным перемещением позволит контролировать положение луча лазера, который можно будет перемещать по поверхности образца для исследования локальных неоднородностей. Прибор позволяет также проводить поверхностный анализ с разрешением 30-50 мкм. Конфигурация инструмента обеспечивает уникальную возможность послойного анализа пробы до глубины 1 мм.

На базе прибора ЛАЗМА в настоящее время также ведется разработка методики для посадочного модуля на поверхность Европы. Планируемый комплекс будет способен по соотношению основных элементов, при наличии органических соединений биологического происхождения или биомассы, выделенной из ледовой пробы спутника Юпитера, с высокой достоверностью определить основополагающие признаки, по которым можно будет сделать заключение, насколько обнаруженное вещество отвечает требованиям внеземной биомассе и является ли она подобной земной.

Важно, что миниатюризация прибора ЛАЗМА, осуществленная для проекта «Фобос-Грунт», была успешно проведена без потери основных аналитических характеристик прибора. Это открыло по настоящему широкие возможности использования этого инструмента для проведения разнообразных измерений массового и изотопного состава реголита космических объектов. Об этом свидетельствуют поданные заявки на использования прибора в программе исследования Луны в рамках национальной программы, и заинтересованность НАСА по созданию, на базе новой миниатюрной версии прибора ЛАЗМА, инструмента с автономной вакуумной откачкой для будущих

исследований Марса. Обсуждается вопрос о разработке дистанционного прибора для исследований астероидов с борта пролётного аппарата и посадочного модуля.

Как отмечалось выше, эксперимент ЛАЗМА предназначается для решения наиболее важных задач миссии Фобос - Грунт, связанных с историей происхождения этого малоизученного спутника

Задачи, решаемые с помощью прибора ЛАЗМА, могут быть существенно расширены при сопоставлении полученных результатов, с результатами полученными прибором МАНАГА-Ф, предназначенным для измерения элементного и изотопного состава потоков вторичных ионов генерируемых под воздействием Солнечного ветра. Эти измерения будут способны ответить на вопрос, не является ли Фобос частью Марса, отколовшегося при метеоритном ударе.

Необходимость сопоставление полученных результатов было продиктовано тем обстоятельством, что инструменты ЛАЗМА и МАНАГА-Ф были изначально задуманы как приборы взаимодополняющие. Показано, что с помощью инструмента МАНАГА-Ф на стадии подлёта к Фобосу можно определить усреднённый по значительной площади состав поверхностного слоя реголита. После посадки космического аппарата на поверхность Фобоса, измерения будут нацелены на исследование локальных характеристик реголита и нового механизма синтеза воды в ионно-столкновительных процессах. Прибор позволяет обнаружить и определить массу вторичных молекулярных ионов, в том числе и органических, возникающих под воздействием на реголит ионной бомбардировки различного происхождения.

Предлагаемыми приборами можно решить ряд интересных и актуальных задач, связанных с активными экспериментами в космосе. Они возникли вследствие лабораторного моделирования процессов возникающих во время метеоритной и ионной бомбардировкам вещества, находящегося в твёрдой фазе. По этим результатам есть все основания утверждать, что в этих процессах, в условиях космического пространства, может происходить синтез органических соединений, а также молекул воды. Эти процессы реализуются в плазменном факеле сверхскоростного метеоритного удара и под воздействием ионной бомбардировки. Механизмы синтеза в метеоритных ударах, связаны с плазменными процессами, а при ионном воздействии их можно связать с синтезом вещества в «горячем пятне» ионного удара. Физические механизмы этих процессов, по части синтеза, различны, но конечный результат единый - синтез. Поэтому, в процессе интерпретации данных, полученных в различных космических экспериментах при искусственном или природном, активном воздействии на окружающую среду, их учёт поможет правильной интерпретации результатов измерений. Поэтому эти задачи в настоящее время актуальны и наиболее востребованы, для понимания явлений наблюдаемых и на поверхности Луны.

В этой связи представляет большой интерес результаты совместных работ специалистов лаборатории 504, Института Металлофизики Украины и Харьковской Астрономической обсерватории, в которой опытным путем было показано, возможность синтеза воды при воздействии водородных ионов Солнечного ветра на наиболее распространённые геологические породы Луны.

В настоящее время идет изготовление бортового прибора МАНАГА-И для изучения химического состава ионных потоков вокруг МКС. В последующих исследованиях на МКС, после модификации инструмента планируется измерение химического состава остаточного газоотделения станции по регистрации массового состава нейтрального газа.

Рассматривается возможность включения прибора МАНАГА в состав бортовой аппаратуры на космическую станцию, разрабатываемую ЕКА для исследования ледовых спутников Юпитера, в рамках миссии ЛАПЛАС.

Прибор МАНАГА востребован также для использования в составе научной аппаратуры Лунного спутника и посадочного модуля на Европу.

Продолжались дальнейшие исследования по предложенной ранее новой концепции, согласно которой плазменный факел метеоритного удара мог играть определяющую роль в появлении на Земле первичных, простейших форм живой материи. Следует отметить, что в прошлом и истекшим годам предложенная концепция нашла международное признание.

Полученные результаты экспериментальных исследований были опубликованы в научных журналах, докладывались на национальных и международных конференциях, обсуждались в России и за рубежом.