

НАУЧНАЯ СЕССИЯ
«Космическая физика и физика плазмы»
К столетию со дня рождения Сергея Ивановича Сыроватского

АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

1. Мелкомасштабное динамо магнитного поля

Зыбин К.П.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Обычная теория генерации мелкомасштабных магнитных полей турбулентностью основана на предположении о гауссовости пульсаций скорости. Однако, в реальной гидродинамической турбулентности это не так - существование потока энергии по спектру является главной причиной не гауссовости пульсаций. Учету этого свойства турбулентности и посвящен доклад. Будет показано, что наличие потока энергии приводит к подавлению динамо-эффекта.

2. Тонкие и сверхтонкие токовые слои. Путешествие вглубь сингулярности Сыроватского

Зеленый Л.М.

Институт космических исследований РАН, МФТИ, СК РАН

В 1960-ые годы большое внимание привлекла ожесточенная дискуссия между сторонниками моделей стационарного пересоединения (Н.Е. Petchek) и динамических токовых слоев (С.И. Сыроватский). Дискуссия, на мой взгляд, надуманная – в природе ничего стационарного не бывает и вслед за формированием и эволюцией токового слоя (ТС) наступает фаза его разрыва, которая и приводит к магнитному пересоединению, которое в некоторых сверхидеализированных случаях иногда может реализовываться достаточно близко к описанию Петчека.

«Восточноевропейская школа Сыроватского» (так ее называли на западе) сделала очень много, введя в научный обиход представление, что эволюция плазменных течений в высокопроводящей плазме в магнитной гидродинамике обязательно приводит к формированию сингулярных токовых структур. В трехмерной геометрии эти структуры могут иметь сложную магнитную конфигурацию, но для простоты ниже мы будем называть их токовыми слоями (ТС).

Даже самая изошренная МГД модель, не может дать больше чем она может – то есть если токовый слой возникает, то он возникает как токовая сингулярность. Уже давно, во времена замечательных КА «Geotail» и «ИНТЕРБОЛ» стало ясно, что подобные токовые

слои в хвосте магнитосферы Земли являются тонкими, то есть их толщина не может превышать сотен и первых тысяч километров. Ограниченное временное и пространственное разрешение плазменных измерений тех лет позволяло получать только верхние оценки толщины слоя.

Параллельно с улучшением качества измерений развивалась и теория. Ясно, что динамика плазмы даже не в очень тонком слое, уже не может описываться в МГД приближении и, как минимум, требует отдельного описания движения электронов и ионов. Особую сложность, в силу их большого Ларморовского радиуса (который может превышать толщину слоя) представляет описание ионов. Здесь большую роль сыграла так называемая квазиадиабатическая теория описания движения заряженных частиц при наличии резких магнитных градиентов, развитая автором и Й. Бюхнером, и примененная для моделирования ионной динамики.

В течение многих лет считалось, что электроны при этом могут считаться замагниченными очень слабым, но конечным магнитным полем внутри слоя – и для описания их движения можно пользоваться классическим приближением ведущего центра. Была построена серия полуаналитических самосогласованных моделей ТС, предсказывающая, что его толщина может достигать первых сотен километров, то есть быть соизмерима с Ларморовским радиусом ионов. Эти теоретические результаты подробно обсуждались в связи с измерениями европейской 4-х спутниковой системы «CLUSTER» и согласие эксперимента с теорией часто оказывалось «неприлично хорошим».

Но время шло и детальная физика внутреннего (вложенного) электронного слоя привлекала все большее внимание исследователей. Это, в первую очередь, было связано с запуском в США в 2015 году тоже четырехспутниковой, но «тесно упакованной» системы MMS (magnetospheric multiscale). Система MMS была способна разрешить (и разрешила) структуры с масштабами уже достигающими первых десятков километров. Это фактически величины соизмеримые с электронным гирорадиусом - когда и для электронов становится неприменимо приближение ведущего центра. В недавних экспериментальных работах подобные «сверхтонкие» слои были детально исследованы в хвостах магнитосфер Земли и Марса. Со сверхтонкими слоями обычно связано протекание локализованных, но очень сильных электронных токов.

Хотя спутники MMS и не могут видеть полную картину возникающей многослойной геометрии, их сопоставление с предыдущими более глобальными измерениями (CLUSTER, Интербол) позволяет восстановить «матрешечную» структуру «сингулярности» разглядываемой со все большим пространственным разрешением – внутри тонкого ионного слоя очень часто оказывается вложен сверхтонкий электронный слой. Существование внутреннего сверхтонкого слоя существенно увеличивает запас магнитной энергии, который запасается в плазменной конфигурации и очень важно для понимания самого главного свойства токовых слоев - их метастабильности.

Самое интересное, что картина диссипации магнитной энергии в горячей бесстолкновительной плазме связана с быстрыми множественными динамическими процессами - рождением сверхтонких (электронных) токовых слоев, их эволюцией и

разрывом, ведущим к ускорению электронов и формированием новых слоев, также распадающихся и рождающих новые тонкие токовые структуры—то есть пересоединение действительно идет – но происходит в нетривиальном каскадном режиме

Несколько десятилетий прошло уже со времени создания С.И. Сыроватским его замечательной модели динамического токового слоя. Поучителен опыт совершенствования как экспериментальной техники, так и теоретического аппарата, позволивший заглянуть внутрь этих удивительных структур, и понять их сложную природу.

3. Сверхновые звезды как ускорители космических лучей

А.М. Быков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Огромное выделение энергии при вспышках сверхновых звезд и наблюдения нетеплового радиоизлучения позволили В.Л.Гинзбургу и С.И.Сыроватскому более 60 лет назад обосновать гипотезу о ключевой роли сверхновых как источников основной компоненты галактических космических лучей. К настоящему моменту, многоканальные наблюдения остатков сверхновых во всем диапазоне электромагнитных волн предоставили большой объем данных, подтвердивший факт ускорения протонов и электронов до энергий порядка 10^{14} эВ. Остаются открытыми несколько вопросов, в частности, проблема происхождения и поиск источников наблюдаемых космических лучей высоких энергий в интервале энергий от 10^{14} до 10^{18} эВ. Решение проблем эффективной конверсии кинетической энергии эжекты сверхновой, вращательной энергии пульсаров, а также анизотропных течений плазмы вокруг аккрецирующих черных дыр в популяцию релятивистских частиц требует кинетического моделирования нелинейных механизмов с широким динамическим диапазоном масштабов.

Моделирование необходимо, чтобы определить максимальные энергии частиц, ускоряемых сверх-альвеновскими течениями плазмы с замороженными магнитными полями и бесстолкновительными ударными волнами. Задача сводится к выявлению физических механизмов сильного (сверх-адиабатического) усиления магнитной турбулентности, необходимого для быстрого ускорения частиц механизмом Ферми. В докладе представлены результаты кинетического моделирования и анализ нелинейных механизмов совместного формирования магнитной турбулентности и спектров ускоренных частиц, многие аспекты которых используют оригинальные идеи работ С.И.Сыроватского. Наблюдения в 2023 г. орбитальной обсерваторией IXPE (Imaging X-Ray Polarimetry Explorer) поляризованного рентгеновского синхротронного излучения остатков сверхновых Тихо Браге и Кассиопея А с использованием нелинейных моделей позволило заглянуть внутрь космических ускорителей частиц и понять механизм модификации сильных ударных волн. Продемонстрирована возможность ускорения ядер космических лучей мощными анизотропными истечениями плазмы в компактных релятивистских остатках коллапсировавших сверхновых звезд. Аккрецирующие черные

дыры и молодые пульсары в двойных звездных системах - галактические микроквазары могут ускорять ядра до энергий существенно выше 10^{15} эВ.

4. Космические исследования Солнца

Кузнецов В.Д.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Исследования по физике Солнца были в сфере научных интересов С.И. Сыроватского, они охватывали широкий круг проблем, и цель этих исследований состояла в получении единой картины физических процессов на Солнце. Наблюдения с космических аппаратов дают все более детальную информацию о происходящих на Солнце явлениях и процессах, стимулируя построение физических моделей солнечных явлений и давая более глубокое понимание того, как устроено и как работает Солнце.

Современная концепция солнечных космических миссий включает наблюдения Солнца с близких расстояний, наблюдения из внеэклиптических положений, наблюдения с околоземных орбит с высоким пространственным разрешением, а также внеатмосферные ракетные наблюдения. В рамках этой концепции реализованные, действующие и недавно запущенные солнечные космические миссии (TRACE, RHESSI, SOHO, SDO, STEREO, Hinode, Parker Solar Probe, Solar Orbiter, ASO-S, Aditya-L1, Proba-3 и др.) призваны обеспечить исследователей самыми лучшими на сегодняшний день данными для решения таких актуальных проблем физики Солнца как механизмы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, тонкая и сверхтонкая структура и динамика солнечной атмосферы и триггерные механизмы наиболее мощных проявлений солнечной активности - вспышек и корональных выбросов массы, ускорение частиц и их распространение в короне и гелиосфере, структура и динамика магнитных полей в приполярных областях Солнца, механизм динамо и солнечный цикл, свойства плазменной турбулентности и др.

В докладе дается обзор результатов в исследованиях Солнца, полученных за последние годы с помощью космических аппаратов. Эти результаты охватывают все слои солнечной атмосферы от конвективной зоны и фотосферы до солнечной короны и солнечного ветра. Дается также обзор новых солнечных космических миссий.

5. Токовые слои Сыроватского – теория и эксперимент

Франк А.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва,

Сергей Иванович Сыроватский внес выдающийся вклад в создание и развитие представлений о токовых слоях, которые лежат в основе разнообразных вспышечных явлений в замагниченной плазме. С.И. Сыроватский показал, что течения плазмы в сильных неоднородных магнитных полях приводят к формированию токовых слоев и

концентрации магнитной энергии; вспышечные явления, при которых энергия магнитного поля преобразуется в энергию плазмы, ускоренных частиц и излучений, могут возникать при быстром разрушении слоя. На основе этих идей в лаборатории ускорителей ФИАН были начаты экспериментальные исследования, которые затем были продолжены в ИОФ РАН. В лабораторных условиях был получен нейтральный токовый слой, и при разрыве токового слоя впервые наблюдались явления типа солнечных вспышек, которые сопровождались генерацией ускоренных частиц. В дальнейшем многие идеи С.И. Сыроватского нашли подтверждение и были реализованы в экспериментах по изучению динамики и эволюции токовых слоев в плазме.