

История научного проекта «в лицах» (1997 –2000 гг.)

Настоящий документ написан летом 2000 года с двойкой целью:

(1) описать личные творческие вклады участников в уже опубликованные работы, подготовленные (как цикл работ) к подаче на конкурс научных работ в Курчатовском институте, и

(2) написать по свежим следам историю научного проекта «в лицах», насколько это возможно для работы, выполненной в тесном сотрудничестве ее участников.

Приводимое ниже описание охватывает период примерно в три года - с середины 1997 г. по середину 2000 г., что для проекта с уже более чем 10-летней историей, берущей начало с весны 1993 г., может показаться его небольшой частью. Между тем этот период, как нам кажется, является одним из наиболее важных в концептуальном плане. Действительно, именно на этом этапе с наибольшей силой проявился эффект такого взаимодействия экспериментатора и теоретика, при котором последовательное пошаговое движение происходило за счет достижений в эксперименте (обработка баз экспериментальных данных и обнаружения фактов, значительно выходящих за рамки существующих теоретических представлений) и в теории (выдвижение гипотез, значительно выходящих уже и за рамки этих новых фактов).

Ниже такая цепочка условно разбита на 4 этапа, содержащих 7 таких шагов (красным шрифтом указаны ключевые места корреляции данного шага с предыдущим).

Этап 1 – обнаружение филаментов (нитей) правильной геометрической формы, и сетей из них, и интерпретация этого явления как аномально упругих магнитоплазменных нитей.

Шаг эксперимента - с середины 1997 г. по середину 1998 г.

Ранцев-Картинов В.А.

(1) Разработан специальный метод обработки изображений (метод *многоуровневого динамического контрастирования*), позволяющий отчетливо выявлять малозаметные нюансы исследуемых объектов и по возможности восстанавливать трехмерную структуру образований, содержащих т.н. филаменты - протяженные нити повышенной (или пониженной) светимости с резкой боковой границей и эффектами геометрической перспективы вдоль нити; использование этой методики легло в основу обработки широкого массива экспериментальных данных (см. ниже пп. 3-5,12-14).

(2) Анализ проведенных им самим экспериментов (1973) на созданной им установке газового Z-пинча Э-2 с диагностическим комплексом. База данных этих экспериментов послужила отправной точкой в исследованиях, отраженных в пп. 3-5,12-14, и сыграла в них ключевую роль (эталона).

(3) Обнаружено и исследовано *сетеобразование* филаментов (плетение сетей), включая роль филаментации в ряде явлений: (а) формировании предвестника электрического тока на оси Z-пинча до прихода туда основного тока; (б) развитии и насыщении магнитно-движимой рэлей-гэйлоровской неустойчивости в Z-пинче; (в) тонкой структуре основного тела и гало Z-пинча, особенно т.н. страт - массивных образований, направленных поперек основному направлению электрического тока в как Z-пинче, так и в токамаке (в последнем случае - в изображениях периферии плазмы в линиях водорода, в картине флуктуаций полоидального магнитного поля на

поверхности шнура, в рентгеновском изображении центра шнура); (г) вытеснении плазмы из т.н. перетяжки Z-пинча и вытекающей отсюда чрезвычайной трудности достижения зажигания термоядерной реакции в перетяжке, и др. Предложены качественная модель двойного спирального филамента и способ плетения ступенчатой цилиндрической сети.

(4) Обнаружено **подобие** структур в плазме в необычайно широком диапазоне (а) пространственных масштабов (от микрометровых диаметров отдельных филаментов в лабораторных разрядах до структур галактического масштаба и даже более), (б) плотностей макроскопического электрического тока, (в) типа удержания плазмы (газовые Z-пинчи, плазменный фокус, токамаки, плазма лазерного факела, а также структуры в космосе). Обнаружено также и **самоподобие** структур (т.е. подобие составных блоков внутри одной структуры самой этой структуре в целом). Наиболее характерными типами обнаруженных структур являются (i) спиральные филаментированные конфигурации, (ii) протяженные прямолинейные филаменты (иногда с различной блочностью внутреннего строения), а также комбинации этих двух структур.

(5) Обнаружены филаменты резко пониженной светимости («темные филаменты») в космических объектах и предложено, что (а) в случае их плазменной природы, такие филаменты могут быть наблюдаемы вследствие эффекта отрицательного линзирования света в них, (б) наличие массы в них могло бы в принципе «смягчить» проблему «скрытой» массы во Вселенной. Подобие последовательностей т.н. горячих точек на филаментах в Z-пинче и последовательностей звезд на одном темном филаменте в космосе указало на возможность существенной роли электромагнетизма (в том числе и плазменных явлений) в формировании крупномасштабной структуры Вселенной (в поддержку гипотезы Х.Альфвена о возможности представить солнечную систему модельной электрической цепью, составленной из неких космических устойчивых филаментарных токов). Предложены некоторые элементы качественной модели магнитоплазменной Вселенной (в развитие вышеуказанной гипотезы Х.Альфвена). Гипотеза о наличии разных типов звезд (не только светящиеся гравитирующие массы).

Ответный шаг теории – с осени 1997 г. по середину 1998 г., и вдогонку (вторая часть п.7) - по середину 1999 г.

Кукушкин А.Б.

(6) Предположение об аномальной магнитной связности внутри наблюдаемых филаментов позволило предложить качественную картину образования **наблюдаемых (см. п.4)** спиральных филаментированных магнито-плазменных конфигураций (образование на упругой нити почти-замкнутой локализованной конфигураций вследствие кручения этой нити; такие магнито-плазменные петли были названы *гетеромаками*). Отсутствие нарушения дальнего действия вдоль материнского филамента при образовании на нем гетеромака указало на то, что **наблюденные (см. п.3)** сети из филаментов могут быть **перколяционными сетями**, (и притом регулярного, нехаотического поведения), которые следует рассматривать как некую новую компоненту, пронизывающую обычную, «жидкую» компоненту плазмы. Это, в свою очередь, упростило классификацию как самих наблюдаемых филаментарных структур, так и возможных путей их образования. Так, образование гетеромаков могло бы объяснить тонкую структуру как отдельных филаментов (их древовидность), так и более сложных образований, прежде всего поперечных страт в Z-пинче и токамаке (**см.**

п.3). Применительно к космическим структурам, упругость «темных» филаментов с расположенными на них звездами способна хотя бы частично объяснить появление известной аномалии - вращения обычной, «видимой» массы почти как единого целого вплоть до периферии галактик (затяжка «жесткости» вращения в т.н. кривых вращения галактик); вытекающая отсюда «экономия» скрытой массы могла бы «смягчить» эту проблему. Предложены также некоторые элементы качественной модели магнитоплазменной Вселенной (в развитие гипотезы Х.Альфвена).

(7) Сформулирован ряд возможных путей образования филаментарных сетей в тороидальных системах магнитного удержания плазмы (прежде всего - токамаке) и указаны их основные свойства: (а) ступенчатость т.н. вращательного преобразования внутри фиксированной магнитной поверхности и возможный сценарий возникновения ступенчатости; (б) замкнутость и повышенная выживаемость сети на ряде магнитных поверхностей, прежде всего, с невысоким рациональным значением запаса устойчивости q , $q=1$ и $q=2$ (такие сети названы магнитными чулками); (в) радиальное секционирование плазмы магнитными чулками и их возможная роль в образовании внутренних транспортных барьеров (ВТБ).

Исследовано возможное влияние филаментарной «сетевой» компоненты на МГД равновесие плазмы с учетом ВТБ: (i) предложена вариационная процедура для определения равновесных пространственных профилей основных параметров плазмы, основанная на условии сохранения магнитной спиральности для каждой из радиальных секций между соседними ВТБ (при заданном расположении самих барьеров); (ii) рассчитаны равновесные профили для условий экспериментов (в голландском токамаке RTP), в которых удалось наиболее надежно определить расположение ВТБ, и предсказано существование на ВТБ сильных (поверхностных) электрических токов, направленные против основного тока; (iii) прослежен переход от предела бессиловой конфигурации к «самосогласованным» (или близким) профилям и, далее, к сильно секционированным профилям, наблюдаемым в условиях интенсивного дополнительного нагрева плазмы.

Этап 2. Гипотезы о природе устойчивости наблюдаемых долгоживущих филаментов в электроразрядной плазме и первые результаты их проверки.

Новый шаг теории - с середины 1998 г. по конец 1998 г.

Кукушкин А.Б.

(8) На основании **обнаруженного (п.4)** существования устойчивых прямолинейных структур выдвинута гипотеза о наличии у наблюдаемых долгоживущих филаментов жестких *каркасов*, за появление и поддержание которых ответственны *квантовые* связи, а не взаимодействие классических частиц в плазме, поскольку последнее не может обеспечить поддержания своей прямолинейности жидкостным плазменным образованием (к тому же весьма часто направленным примерно ортогонально основному электрическому току в разряде, **п.3**). При этом образование связной (на определенном пространственном масштабе - твердотельной) структуры должно происходить в процессе электрического пробоя и, следовательно, *предшествовать* образованию плазмы. Поэтому плазма с долгоживущими филаментами есть такое четвертое состояние вещества, в котором соединены все три другие.

(9) Конкретным кандидатом на роль элементарного блока в гипотетических каркасах была предложена *углеродная нанотрубка* - не только в силу реальности явления (газовый разряд, правда, только низкотемпературный, как раз и является одним

из наиболее развитых способов получения углеродных нанотрубок), но прежде всего в силу целого ряда конкретных физико-химических свойств нанотрубок, которые в совокупности открывали возможность (а) новой формы электрического пробоя (не обязательно в газе) - строительстве каркасных структур из микропыли, либо уже присутствующей в разряде, либо образующейся в процессе самого пробоя; (б) обеспечить **обнаруженное (см. п.4)** явление самоподобия наблюдаемых структур в очень широком пространственном диапазоне с определяющей ролью трубчатых структур как ключевых строительных блоков. Сформулирована концепция «поколений» самоподобных трубчатых структур (от трубчатых макромолекул до кластеров галактик и возможно более). Предложен модельный настольный эксперимент, использующий гипотезу самоподобия, для проверки некоторых элементов предложенного в грубых чертах механизма строительства каркаса.

(10) Приложение подхода п.9 к ряду явлений: (а) гипотеза о микропылевой основе шаровой молнии (ШМ) как способной обеспечить механическую устойчивость ШМ и возможность ШМ обладать значительным магнитным энергозапасом (это фактически «скрещивает» ранее практически несовместимые квантово-химический и плазменный подходы); (б) гипотеза о необходимости расширения магнитоплазменной модели Вселенной путем включения микротвердотельной компоненты в филаментарную космическую сеть; (в) гипотеза о возможности образования твердых небесных тел, в настоящий момент не вовлеченных в космическую филаментарную сеть, в результате (по-видимому, гравитационного) коллапса каркасных космических структур; в частности, указано на корреляцию известной гипотезы о блочной, «кристаллической» структуре Земли (додекаэдр-икосаэдр) с геометрической структурой молекулы типа фуллерен.

Ответный шаг эксперимента – с осени 1998 г. по весну 1999 г.

Ранцев-Каринов В.А.

(11) **Анализ и развитие гипотезы п.9:** (а) анализ источников углерода в типичных условиях электрического (не только газового) разряда и обоснование практической неизбежности присутствия углерода в типичном разряде; (б) гипотеза о способности других химических элементов строить наноструктуры, аналогичные углеродной нанотрубке; (в) предложено объяснение роли тренировки разрядной камеры в наработке наноструктур, необходимых для электрического пробоя по сценарию п.9 (в частности, объяснение т.н. банно-прачечного эффекта, известного на установке плазменный фокус); (г) обнаружение структур типа фуллерена в Z-пинче (масштаба миллиметра) и космосе (некоторые планетарные туманности, масштаба парсека, в данных телескопа Хаббла); (д) разрешение тонкой (блочной) структуры т.н. «джетов» и указание на их возможную жесткость как причину аномальной прямолинейности «джетов»; (е) обнаружение необходимости накопления должного количества структурообразующей пыли для перехода от несамостоятельного разряда к самостоятельному.

(12) Обнаружение данных, явно демонстрирующих (из «трехмерной» диагностики Z-пинча) то, что филаменты правильной геометрической формы обладают временем жизни, сравнимым с длительностью всего разряда, т.е. являются **долгоживущими** филаментами, названными так для «отстройки» от достаточно широко изучаемого явления хаотической, мерцающей филаментации (именно своего рода «жесткость» таких структур и макроскопичность их размеров, порою сравнимых с размерами

разрядной камеры, позволила достаточно надежно идентифицировать конкретную структуру и проследить ее динамику в процессе разряда).

Этап 3. Определение тонкой структуры филаментов в очень широком массиве экспериментальных данных.

Новый шаг эксперимента - с весны 1999 г. по весну 2000 г.

Ранцев-Каринов В.А.

(13) Определение тонкой структуры филаментов правильной геометрической формы, обнаруженных в широком диапазоне пространственных масштабов и типов разряда - Z-пинче (напр., при оголении каркаса в образующейся перетяжке пинча), токамаке, плазменном фокусе, космических объектах - в развитие п.4, позволило найти: (а) наиболее частым блоком таких структур является прямолинейное **трубчатое** образование, часто обладающее **коаксиальной** внутренней структурой; (б) наличие **колесообразной** структуры (тележного колеса), расположенной как в сечении трубчатых образований (которые при этом иногда принимают вид «беличьего колеса»), так и на уединенной оси (и длинной, и короткой); (в) довольно широкий класс филаментов, направленных примерно радиально по отношению к оси разряда (в этих филаментах коаксиальность структуры выражена наиболее ярко). Гипотеза о возможности прямого транспорта энергии частицами вдоль радиальных филаментов.

(14) Обнаружение трубчатых и колесных структур в диапазоне 100 нм – 10 мкм в базе данных (Б.Н. Колбасова, П.В. Романова и др.) по электронной (просвечивающей и сканирующей) микроскопии различных пылевых депозитов (частиц и пленок), извлеченных из камеры токамака Т-10. Обнаружение **предсказываемого (п.9)** подобия трубчатых структур внутри указанного диапазона, а также их подобия структурам, которые ранее обнаружены (п.13) в плазме токамаков в диапазоне размеров на пять порядков больше (в сантиметровом диапазоне).

Этап 4. Модель аномальной долгоживучести холодного твердого (т.е. в виде конденсированной среды) каркаса в окружении горячей плазмы. Возможная роль каркаса в получении долгоживущих электрических разрядов (в переносе энергии, в стабильности разрядов)

1999 г.

Ранцев-Каринов В.А.

(15) Анализ проведенных им измерений (1980, 1987 гг.) высокочастотных (ВЧ) электрических полей в Z-пинче и токамаке Т-10 по спектрам штатковского уширения линий водорода. Гипотеза о возможном вкладе давления ВЧ полей (силы Миллера) в поддержание резкой границы филамента и в защите микротвердотельного каркаса от горячей плазмы вакуумным каналом.

Кукушкин А.Б.

(16) Решение обратной задачи по восстановлению параметров нелокальной (недиффузионной) компоненты переноса тепла в токамаках, полученное путем численного моделирования начальной стадии ряда экспериментов по наблюдению быстрого нелокального отклика на мгновенное (в диффузионной шкале времени) и пространственно локализованное возмущение температуры. Вывод о крайней затруднительности удовлетворительного объяснения явления быстрого нелокального переноса тепла, наблюдаемого на различных токамаках в последнее десятилетие, переносом тепла известными ЭМ волнами в плазме (1996 г.).

(17) Выдвинута гипотеза о необходимости объединения проблемы нелокальной компоненты переноса энергии в плазме с проблемой выживаемости конденсированной среды (макромолекул) в окружении горячей плазмы, вплоть до килоэлектронвольтовых температур и выше (последнее обстоятельство кардинально отличает рассматриваемую задачу от задач физики пылевой плазмы). Предложена качественная картина (а) преобразования части «накачиваемого» в камеру магнитного поля (полоидального - в токамаке, азимутального - в Z-пинче) в ВЧ ЭМ волны типа ТЕМ с $\omega < \omega_{pe}$, включая конверсию мод вследствие присутствия микротвердотельного каркаса; (б) формирования радиальной силы Миллера и образования вокруг каркаса вакуумного канала, защищающего каркас от частиц в плазме; (в) нелокального переноса энергии ТЕМ волнами вдоль каркаса с низкими потерями энергии в плазме. Показана корреляция (i) ВЧ спектров, наблюдаемых вне плазменного шнура, с видимыми длинами прямых блоков каркаса на периферии шнура (в токамаке Т-10); (ii) измеренных амплитуд электрических ВЧ внутри плазмы (**по п.15**) с рассчитанными (в рамках двухжидкостной квази-гидродинамики плазмы в ВЧ поле) диаметрами вакуумных каналов, если последние ответственны за видимые ширины прямых филаментов (в токамаке Т-10 и Z-пинче).

Кукушкин А.Б. + Ранцев-Каринов В.А.

В результате «взаимодействия» вкладов пп. 15, 16 и 17 была сформулирована концепция «естественных кабелей».

Июль 2000 г.