

ОТЗЫВ

научного руководителя д.ф.-м.н. С.Ю. Сазонова на диссертационную работу П.С. Медведева «Физические процессы в горячей астрофизической плазме: диффузия элементов в межгалактической и межзвездной среде, рентгеновское излучение джетов микроквазаров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 «Астрофизика, звездная астрономия»

Диссертационная работа Павла Сергеевича Медведева посвящена, в основном, исследованию диффузии элементов в межгалактической среде скоплений галактик и межзвездной среде галактик, в том числе при формировании таких структур. Актуальность выбранной темы исследований определяется рядом обстоятельств. Во-первых, до сих остаются плохо изученными процессы переноса в горячей астрофизической плазме, а они напрямую влияют на то, как происходит нагрев и обогащение тяжелыми элементами межгалактического газа в скоплениях галактик и межзвездного газа в эллиптических галактиках. Во-вторых, благодаря все возрастающей точности наблюдений скоплений галактик в рентгеновском и микроволновом (по эффекту Сюняева-Зельдовича) диапазонах, эти объекты становятся важными с точки зрения независимого определения космологических параметров. При этом становится необходимо учитывать дополнительные систематические эффекты, к которым относится перераспределение элементов в горячем газе в результате диффузии. Наконец, по-видимому, уже в недалеком будущем появится возможность проверки теории первичного нуклеосинтеза путем сравнения обилия гелия в современную эпоху с предсказаниями, основанными на результатах измерений реликтового излучения. При этом будет необходимо учитывать астрофизические явления, приводящие к изменению обилия гелия в ходе эволюции галактик, в том числе диффузию.

Основу диссертации составляют результаты численных расчетов диффузии, выполненных диссертантом на основе разработанного им кода, связанного с решением уравнений Бюргерса для существенно различных ситуаций, а именно находящегося в гидростатическом равновесии горячего газа (при рассмотрении скоплений галактик и эллиптических галактик) и сферически симметричного течения холодного газа (при рассмотрении формирования галактик в ранней Вселенной). Разработка, отладка и применение этого сложного кода – практически целиком заслуга диссертанта. Полагаю, что этот код может найти и дальнейшее применение при решении астрофизических задач.

В части диссертации, посвященной скоплениям галактик (глава 3), основной упор сделан на изучение явления термодиффузии, которое возникает в горячем газе при наличии градиента температур. На примере реальных скоплений галактик показано, что термодиффузия может действовать сильнее гравитационной седиментации и приводить к перемещению гелия и тяжелых элементов из холодных ядер скоплений в более горячие внешние области. Этот теоретический результат важен с точки зрения исследования эволюции химического состава горячего газа скоплений по наблюдательным данным. Кроме того, в данной работе была продемонстрирована и

подчеркнута необходимость учета отличия обилия гелия в межгалактическом газе от солнечного значения (в результате действия диффузии или других процессов) при определении металличности газа и измерении угломерных расстояний до скоплений по данным рентгеновской спектроскопии и наблюдений СЗ-эффекта.

Аналогичное исследование диффузии впервые проведено (глава 4) для эллиптических галактик. Если бы такие объекты были просто уменьшенными копиями скоплений галактик, то есть подчинялись тому же соотношению между массой и температурой газа, то диффузия не могла бы играть в них значительной роли. Однако, как впервые показано диссертантом, это далеко не так. В реальности газ в эллиптических галактиках обычно разогрет выше вириальной температуры, а массовая доля газа существенно ниже средней массовой доли барионов во Вселенной. В этих обстоятельствах диффузия может приводить к кардинальному перераспределению элементов в горячем газе эллиптических галактик. Диссертант выполнил соответствующие расчеты для 11 хорошо изученных в рентгеновском диапазоне галактик. В будущем будет интересно интегрировать такой расчет в более полную схему вычислений эволюции горячего газа эллиптических галактик, учитывающую процессы звездообразования и энерговыделения в галактике, а также обмен газа с межгалактической средой.

В главе 5 диссертации представлены результаты оригинального расчета диффузии гелия и других первичных элементов в ходе формирования первых сколлапсировавших объектов в ранней Вселенной. Ранее эта проблема практически не исследовалась. Оказалось, что несмотря на низкую скорость диффузии в холодном газе, она все же могла привести к заметному (на уровне долей процента) увеличению обилия гелия в минигало, в которых формировались первые звезды, и первых галактиках. Интересно, что некоторые из таких карликовых галактик могли сохраниться в практически первозданном виде до настоящего времени! В межзвездной среде карликовых галактик уже сейчас проводятся прямые измерения обилия гелия с точностью около одного процента, что лишь немного хуже точности предсказаний первичного обилия гелия во Вселенной по данным недавних измерений реликтового фона с помощью обсерватории им. Планка. Дальнейшее увеличение точности измерения обилия гелия сделает возможным проведение прямой проверки теории первичного нуклеосинтеза. Это, очевидно, потребует учета систематических эффектов, связанных с диффузией, исследованных в диссертации.

Заключительная часть диссертационной работы (глава 6) отходит от темы диффузии элементов и посвящена другой актуальной проблеме астрофизики — явлению релятивистских выбросов вещества при аккреции на черные дыры. Ярчайшим представителем такого класса объекта является галактический микроквazar и сверхкритический аккректор SS 433. Изучение барионных джетов этого объекта может пролить свет на механизмы запуска релятивистских струй в рентгеновских двойных системах, а также ультраярких рентгеновских источниках и квазарах. В работе диссертанта (совместно с Ильдаром Хабибуллиным) разработана модель рентгеновского излучения джетов микроквazarов, в которой учтено как радиационное, так и адиабатическое охлаждение истекающего газа. Интересно, что хотя

рентгеновское излучение джетов SS 433 исследуется уже несколько десятков лет, и протекающие в них физические процессы в целом понятны, такая самосогласованная модель предложена впервые. Она предназначена для использования при анализе рентгеновских данных с помощью стандартных вычислительных инструментов рентгеновских астрономов, таких как xspes. Модель дает возможность измерения геометрических и физических параметров джетов (начальный размер, угол раствора, плотность) по данным рентгеновской спектроскопии. Она, несомненно, найдет свое применение в приложении к данным рентгеновских наблюдений SS 433 и других объектов, продолжающих поступать с космических телескопов Чандра, XMM им. Ньютона и NuSTAR. Диссертант уже приступил к обработке таких данных, и первые результаты представлены в диссертации. Важно отметить, что модель выложена в открытый доступ.

Работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в четырех статьях в ведущих астрофизических журналах и неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и семинарах. Тема исследований весьма актуальна. Считаю, что диссертационная работа Павла Сергеевича Медведева отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 «астрофизика, звездная астрономия».

С.Ю. Сазонов,

д.ф.-м.н., профессор РАН

