

УТВЕРЖДАЮ

проректор МГУ имени М.В. Ломоносова  
профессор А.А. Федянин



ноября 2018 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации

(МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1)  
на диссертационную работу **КОМАРОВА Сергея Вячеславовича** на соискание  
ученой степени «кандидат физико-математических наук» по специальности  
«01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия» (отрасль наук: «физико-  
математические») на тему «**Теплопроводность в горячей газе скоплений  
галактик**»

На протяжении более полувека вопрос о характере теплопроводности в высокотемпературной плазме с магнитным полем представляет собой классическую, но все еще до конца нерешенную задачу лабораторной и технической плазмы. В астрофизику, включая физику Солнца, проблема ограниченности или насыщенности тепловых потоков проникала по мере развития рентгеновской астрономии. В частности, в физике солнечных вспышек особенно остро она проявилась в 90-х годах прошлого века, когда спутниковые наблюдения в жестком рентгеновском диапазоне обнаружили существование так называемой «сверхгорячей» плазмы, электронная температура которой превышает 30–40 МК. Потребовалась серьезная корректировка теории эффективного теплопереноса в такой плазме с сильным магнитным полем.

В межгалактической среде (МГС) проблема возникла в начале 21-го века в связи с наблюдениями разнообразных долгоживущих структур на картах температуры скоплений галактик. Если бы величина коэффициента теплопроводности определялась классической формулой Спитцера, то такие структуры могли бы существовать очень короткие времена, много меньше характерного времени формирования скоплений. Однако наблюдения демонстрируют длительное существование многих структур в распределениях температуры МГС.

Кроме того, как выяснилось из изучения карт температуры скоплений галактик, теплопроводность МГС должна быть подавлена по крайней мере на порядок величины по сравнению со спитцеровской теплопроводностью для высокотемпературной плазмы



без магнитного поля. Диссертационная работа Сергея Вячеславовича Комарова посвящена аналитическому и численному решению актуальной задачи о подавлении теплообмена в сложных условиях МГС и позволяет объяснить оба упомянутых эффекта.

Гигантские различия физических масштабов и связанных с ними процессов в турбулентной МГС потребовали от диссертанта последовательного применения различных физических приближений, начиная с магнитной гидродинамики (МГД). Он успешно справился со всеми этими трудностями. Уже в рамках МГД модели диссертант показал, что флуктуации температуры на масштабе турбулентных вихрей могут иметь долгое время жизни, несмотря на большую величину электронной теплопроводности в высокотемпературной плазме МГС.

Это происходит потому, что турбулентное поле скоростей стремится ориентировать вмороженные линии магнитного поля перпендикулярно локальным градиентам температуры, таким образом подавляя тепловой поток. Эффект был рассчитан диссертантом в МГД приближении слабого магнитного поля с помощью аналитического метода, основанного на модели поля скоростей Казанцева-Крайчнана. Эта модель, предполагающая гауссово дельта-коррелированное по времени поле скоростей, хорошо зарекомендовала себя в задачах моделирования переноса в турбулентных средах и успешно применена диссертантом к описанию свойств холодных фронтов в скоплениях галактик. Более того, в диссертационной работе показано, что исследуемый эффект подавления теплопроводности должен проявлять себя в наличии корреляции между наблюдаемыми картами температуры и картами поляризации синхротронного излучения МГС.

Далее, уже в кинетическом приближении, исследована роль зеркальной неустойчивости, которая возникает там, где гидродинамическая турбулентность растягивает линии магнитного поля. Эта неустойчивость имеет резонансную природу и способна породить большие флуктуации магнитного поля на масштабах ионного ларморовского радиуса. Для тепловых электронов такие флуктуации играют роль магнитных зеркал, образующих магнитные ловушки. Эффект подавления теплового потока складывается из уменьшения доли свободных электронов, не захваченных магнитными ловушками, и увеличения числа столкновений свободных электронов. Нечто аналогичное имеет место в так называемых «коллапсирующих магнитных ловушках», которые образуются в процессе магнитного пересоединения в солнечных вспышках.

В диссертационной работе Комарова показано, что зеркальная неустойчивость подавляет классический тепловой поток примерно в пять раз. Этот результат интересен тем, что он применим к любой слабостолкновительной турбулентной плазме с магнитным полем, поскольку в силу своей локальности эффект зеркальной неустойчивости фактически не зависит от крупномасштабных свойств рассматриваемой системы. Заметим, однако, что захваченные и пролетные электроны могут иметь существенную анизотропию и большие отклонения функции распределения от максвелловской. Они создают предпосылку для возбуждения различного типа волн и кинетических неустойчивостей, что может приводить, например, к аномальной диффузии в конус потерь. В результате эффект подавления теплового потока может оказаться еще меньше.

Это замечание следует иметь в виду в плане будущих исследований диссертанта. Однако оно никак не влияет на общую положительную оценку диссертационной работы Комарова, поскольку лишь усиливает главный вывод о подавлении теплового потока в плазме с вмороженным слабым магнитным полем под действием гидродинамической вихревой турбулентности в условиях характерных для МГС.



Диссертантом детально исследован вопрос о наблюдаемых проявлениях анизотропии электронного давления относительно локального направления магнитного поля, что приводит к поляризации теплового тормозного излучения. В случае упорядоченных крупномасштабных движений, характерных для холодных фронтов в скоплениях галактик, предсказываемая степень поляризации составляет порядка 0.1 %.

Столь малая величина поляризации позволяет рассматривать скопления галактик в качестве калибровочных неполяризованных объектов при нынешнем уровне наблюдений. Грядущие поляризационные наблюдения в рентгеновском диапазоне либо подтвердят, либо опровергнут предсказанную диссертантом поляризацию. Так или иначе, это позволит наложить ограничения на столкновительность электронов, один из ключевых параметров турбулентной плазмы.

Без сомнения, с развитием рентгеновской астрономии скопления галактик будут становиться все более привлекательными объектами, поскольку они расширяют наши знания о Вселенной и в то же время углубляют наше понимание физических процессов плазменной кинетики.

Диссертация С.В. Комарова прекрасно иллюстрирована, содержит достаточно полный обзор научной литературы, написана логично и понятно - в классическом стиле научной монографии. В этом качестве она может быть рекомендована к опубликованию.

Диссертационная работа С.В. Комарова была доложена и обсуждена в ГАИШ МГУ на семинаре «Плазменная астрофизика и физика Солнца» 14 мая 2018 г. (протокол № 663/2018), по результатам которого был составлен настоящий отзыв.

В целом, диссертация работа С.В. Комарова представляет собой завершенное научное исследование, соответствующее специальности «01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия».

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые построена самосогласованная магнитогидродинамическая и кинетическая теория переноса тепла в горячем газе скоплений галактик, согласующаяся с современными наблюдениями МГС в рентгеновском диапазоне. Достоверность и обоснованность результатов диссертации подтверждаются математическими выкладками, глубоким анализом полученных результатов и их детальным сравнением с современными наблюдениями МГС.

Результаты работы Комарова могут быть использованы в ГАИШ МГУ, НИИЯФ МГУ, ИКИ РАН, ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОИВТ РАН и других отечественных и зарубежных научных центрах, занимающихся рентгеновской астрономией и проблемой переноса тепла в турбулентной плазме.

Совокупность представленных в диссертации работ и описанных в них новых, хорошо апробированных научных и методических достижений позволяет констатировать, что автору, С.В. Комарову, удалось внести значительный вклад в решение проблемы переноса тепла в турбулентной плазме с магнитным полем.

Диссертация Сергея Вячеславовича Комарова «Теплопроводность в горячем газе скоплений галактик» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звездная астрономия».

Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации.

Отзыв на диссертационную работу **С.В. Комарова** обсужден и одобрен на заседании Координационного Совета ГАИШ МГУ по астрофизике 31 октября 2018 года, протокол № 106

**Отзыв составил**

заведующий отделом релятивистской астрофизики ГАИШ МГУ  
(119991, Москва, Университетский проспект, 13),  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Н.И. Шакура

Председатель координационного  
совета ГАИШ МГУ по астрофизике,  
доктор физ.-мат. наук

Г.М. Рудницкий

Секретарь координационного  
совета ГАИШ МГУ по астрофизике,  
кандидат физ.-мат. наук

И.Б. Волошина

И.о. директора ГАИШ МГУ,  
доктор физ.-мат. наук, профессор



К.А. Постнов

(Печать ГАИШ МГУ)