

## ОТЗЫВ

о кандидатской диссертации Ю.А. Кропотиной  
«Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и солнечного ветра» (по автореферату)

Диссертация Ю.А. Кропотиной посвящена моделированию микроструктуры бесстолкновительных ударных волн (БУВ) в различных астрофизических объектах с учётом химического состава фоновой плазмы. Одной из целей работы является установление механизма преимущественного ускорения тяжёлых ионов в обратных ударных волнах остатков сверхновых звезд. Исследовано влияние тяжёлых ионов на инжекцию протонов в процесс ускорения Ферми первого порядка. Как показано в работе, локальная концентрации ионов гелия влияет на форму функции распределения ионов железа за фронтами ударных волн в горячей плазме скоплений галактик. Автором предложен способ диагностики распределения гелия внутри скопления по наблюдениям рентгеновских линий ионов железа.

Изучение структуры и свойств БУВ и, особенно, эффективности ускорения частиц, играет ключевую роль в понимании многих астрофизических процессов. Отметим при этом, что динамика ближайшей к нам БУВ — ударной волны на границе магнитосферы Земли (magnetospheric bow shock) — оказывает влияние на геомагнитные явления, то есть непосредственно на среду обитания человека. Эта УВ вызывает большой интерес ещё и потому, что она доступна для прямых (in situ) наблюдений.

Это перспективное направление очень важно для понимания механизмов ускорения частиц не только в галактическом пространстве, но также и в ближайшем окружении Земли – в её магнитосфере, а также на Солнце и в гелиомагнитосфере в целом. Так, в последние годы признано, что элементный состав СКЛ и зарядовое состояние тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) солнечного происхождения являются ключевыми для понимания процессов ускорения частиц на Солнце. Самый проблемный случай – это ускорение ТЗЧ. Как известно, пробег для рассеяния частиц на неоднородностях межпланетного магнитного поля (ММП) зависит от их магнитной жёсткости. Это приводит к различию в скоростях протонов и более тяжёлых ядер примерно вдвое в области нерелятивистских энергий. Поэтому спектр солнечных частиц по наблюдениям вблизи орбиты Земли должен со временем обогащаться тяжёлыми ядрами. С другой стороны, и для СКЛ, и для ГКЛ остаётся нерешённой проблема инжекции ядер, которую впервые отметил ещё Ферми (1949) для ГКЛ. Как показано в диссертации, в квазипродольных УВ в плазме с существенной примесью тяжёлых, слабо заряженных ионов инжекция ионов водорода в процесс ускорения Ферми I порядка существенно затруднена. Таким образом, обратные ударные волны остатков сверхновых ускоряют преимущественно тяжёлые ионы.

Сложные самосогласованные взаимодействия волн и частиц в БУВ можно моделировать при помощи кинетических кодов. Численное моделирование (в частности, гибридное) для БУВ со сложным составом – это новое и мало разработанное направление. Ранее, например, не исследовалось влияние состава плазмы на микроструктуру обратных УВ остатков сверхновых и эффективность ускорения ими частиц. Решение этой задачи позволяет сделать выводы о вкладе обратных УВ в состав КЛ, а также из первых принципов найти форму распределений частиц по скоростям.

К числу несомненных заслуг Ю.А. Кропотиной следует отнести, прежде всего, участие в разработке, начиная с 2011 г., гибридного кода Maximus и его дальнейшее очень квалифицированное использование. В качестве конкретного примера отметим, что результаты гибридного моделирования УВ в скоплениях галактик с хорошей точностью согласуются с результатами работы [Na et al., 2018], которые были получены независимо с помощью кода Particle-in-Cell (PIC-кода) под названием «TRISTAN-MP».

Большинство публикаций и аппаратурно-методических разработок диссертанта мне известны. В целом работа выполнена на должном, очень современном уровне моделирования, а ее научная и практическая ценность не вызывают сомнений. Результаты работы могут быть использованы, в частности, для понимания ускорения тяжёлых ядер в условиях солнечной атмосферы, в гелиосфере, и в магнитосферах планет, например, для описания аномальной компоненты КЛ. Считаю, что Ю.А. Кропотина вполне заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — «Астрофизика и звёздная астрономия».



МИРОШНИЧЕНКО Леонтий Иванович

Доктор физ.-мат. наук,

Главный научный сотрудник ИЗМИРАН,

Отдел физики Солнца и солнечно-земных связей.

5 декабря 2021 г., 108840, г.Москва, г.о. Троицк