

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Дедикова Святослава
Юрьевича на тему: «Разрушение космической пыли за фронтами
ударных волн в неоднородных средах»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Проблема дисбаланса пыли в галактиках является весьма острой в современной астрофизике в целом и в физике межзвездной среды, в частности. Действительно, оценки предсказывают, что темпы разрушения пыли примерно на порядок должны превосходить темпы ее образования. Это входит в противоречие с данными наблюдений, которые показывают, что масса пыли, составляющая около 1% от массы газа в классических галактиках, включая Млечный Путь, является примерно постоянной в течении последних миллиардов лет. С.Ю. Дедиков взялся за эту безусловно **актуальную** задачу и получил весьма интересные оригинальные результаты.

Изюминкой данной диссертационной работы является исследование механизмов разрушения пыли в неоднородной среде. Стоит заметить, что хотя неоднородность межзвездной среды является активно используемым в настоящее время фактором для объяснения целого ряда нестыковок между предсказанными теорией (моделями) и реально наблюдаемыми физическими параметрами межзвездной среды (в качестве примера можно привести недавнюю работу Кирсановой и др., 2023, Астрофиз. бюлл., 78, 389, где неоднородность межзвездной среды применялась для объяснения проникновения УФ-фотонов сквозь плотную в среднем среду), использование фактора неоднородности среды для оценки темпа и эффективности разрушения пыли проводится впервые. Это является несомненной **новизной** диссертационной работы С.Ю. Дедикова.

Диссертация С.Ю. Дедикова объемом 117 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, двух небольших приложений и списка литературы, содержащего 168 публикаций. В диссертацию включены две таблицы и 32 рисунка.

Во **Введении** диссертант описывает современное состояние исследований процессов образования и разрушения пыли в галактиках, доказывает актуальность исследований, ставит цели и задачи диссертационной работы, описывает личный вклад. В **первой главе** описываются используемая модель и ее входные параметры, приводятся результаты численного моделирования эволюции расширяющегося в межзвездной среде остатка сверхновой при варьировании входных параметров. Делается вывод о том, что неоднородность среды заметно уменьшает эффективность разрушения пыли, а изменение средней плотности окружающего расширяющуюся оболочку газа – слабо влияет на долю сохранившейся пыли. **Вторая глава** посвящена моделированию тепловой эволюции газа и пыли в расширяющемся остатке сверхновой и светимости остатка в ИК-линиях [OIII] 88 мкм, [CII] 158 мкм и [N II] 205 мкм. Показывается, что в горячем газе пыль полностью разрушается в однородной среде, но в неоднородной – небольшая доля крупных пылинок присутствует. Показано также, что светимость остатка сверхновой в ИК-линиях ионов увеличивается при его расширении в более неоднородной среде. В **третьей главе** моделируется отношение светимостей остатка сверхновой в ИК и рентгеновском диапазонах (IRX), результаты моделирования сравниваются с данными наблюдений. Показывается зависимость величины IRX и ее эволюция от возраста остатка сверхновой, прицельного параметра, степени неоднородности среды, металличности газа. В **четвертой главе** рассмотрено взаимодействие диффузных облаков, содержащих пыль, с ударной волной. Показано, что эффективность выживания пыли при взаимодействии ударных волн с облаками межзвездной среды определяется соотношениями времен охлаждения газа, разрушения облака и ускорения частиц. Результаты

диссертационной работы суммируются в **Заключении**. В **Приложениях** показано, как влияет на результаты моделирования пространственное разрешение вычислительной сетки, и описывается метод расчета эмиссии остатка сверхновой в линиях [OIII] 88 мкм, [CII] 158 мкм, [NII] 205 мкм и [CI] 369 мкм.

Применяемые в диссертации методы строго **обоснованы**. Полученные результаты модельных расчетов находятся в хорошем согласии с наблюдательными данными; их **достоверность** сомнений не вызывает. Положения, выносимые на защиту, хорошо аргументированы. Выводы, сделанные на основе анализа результатов, вполне логичны и **обоснованы**.

Наиболее значимыми результатами диссертационного исследования являются, на мой взгляд, следующие:

1) С.Ю. Дедикову удалось показать, что в неоднородной межзвездной среде пыль разрушается менее эффективно, что уменьшает предсказываемый ранее дисбаланс пыли в галактиках.

2) Диссертант предсказывает увеличение светимости остатков сверхновых в неоднородной среде в эмиссионных линиях [OIII] 88 мкм, [CII] 158 мкм и [NII] 205 мкм и дает оценки их светимостей. Данный вывод представляет несомненный интерес для будущих наблюдательных проектов.

Результаты диссертационной работы опубликованы в пяти статьях в добротных журналах, входящих в списки WoS и Scopus, и прошли апробацию на ряде конференций. Отмечу, что в четырех статьях диссертант является первым автором, так что весомость его личного вклада не вызывает сомнений.

Несмотря на очень хорошее впечатление от диссертационной работы и ее высокую оценку, она не свободна от некоторых недостатков. В частности:

1) При моделировании диссертант использует в качестве входного параметра лишь одно значение энергии взрыва сверхновой (10^{51} эрг), массы газа и тяжелых элементов. Однако диапазон энергии взрыва сверхновых II типа составляет пол-порядка величины – примерно от 5×10^{50} до 2×10^{51} эрг

(см., например, Nadyozhin & Imshennik, 2005, *Int. J. Mod. Phys. A*, 20, 6597), достигая в предельных случаях и более высоких значений (как, например, в случае SN2006gy в NGC 1260). Стоило бы рассмотреть, как меняются темпы разрушения пыли в неоднородной среде в зависимости от энергии взрыва? Либо, в качестве альтернативы, – привести убедительные аргументы, почему данный параметр (энергия взрыва) не варьируется при моделировании?

2) В качестве базового значения параметра масштаба неоднородности среды используется величина 6.25 пк. В качестве аргумента приводятся ссылки на работы, где определяются типичные размеры молекулярных облаков. Данная аргументация не совсем корректна, поскольку размер неоднородности среды зависит не только от размеров сгустков, но и расстояний между ними. При этом автор игнорирует работу Henshaw et al., 2020, *Nature Astron.*, 4, 1064, в которой было показано, что флуктуации плотности в центральной молекулярной зоне нашей Галактики имеют период (на интересующей в диссертации пространственной шкале) как раз искомые 6.0 ± 0.7 пк.

3) На стр. 26 диссертации автор утверждает, что «пространственный размер неоднородностей также не оказывает заметного влияния на глобальный приток пылевой массы через поверхность остатка». Стоило бы проиллюстрировать это на рисунке, чтобы в этом могли убедиться не только автор диссертации, но и ее читатели.

4) В главе 2.2 отсутствует формула для функции распределения масс пылинок f_d по размерам. Это затрудняет интерпретацию рис. 2.2 и 2.3.

5) В разделе 2.3.2 автор рассматривает эволюцию светимостей остатка сверхновой в ИК-линиях [OIII] 88 мкм, [CII] 158 мкм и [NII] 205 мкм. Из текста неясно, проводились ли ранее подобные наблюдения? Если да, то почему не было проведено сравнение модельных результатов с данными наблюдений? В частности, почему не использовались результаты из работы Millard et al., 2021, *ApJS*, 257, id.36? Слишком молодые объекты?

6) Имеются немногочисленные замечания по оформлению:

- при ссылке на работы A1 и A4 в диссертации и автореферате стоило бы указать количество страниц;
- в формулах главы 1 для обозначения скорости пылевой частицы используются два разных индекса: v_d и v_p ;
- на рис. 2.3 на стр. 44 некоторые линии обрываются в пустоту (особо это касается зеленой гистограммы на нижнем левом графике);
- в первом абзаце на стр. 66 пропущен предлог «в» перед словом «эжекте»;
- на стр. 76 в нумерованной формуле для радиационного охлаждения газа пропущены индексы «с» для температуры и концентрации газа;
- на стр. 95 в Приложении А ошибочно указано «0.18175 пк» вместо «0.1875 пк».

Данные замечания не носят принципиального характера и нисколько не умаляют высокий научный уровень работы и значимость полученных результатов.

Текст диссертации написан хорошим языком, легко читается. Диссертация богато иллюстрирована; список литературных источников показывает хорошее знакомство соискателя с современным состоянием исследований по данной теме, причем не только теоретических, но и наблюдательных.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация С.Ю. Дедикова «Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах» является научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем критериям и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса,

астрономия», а ее автор, Святослав Юрьевич Дедиков, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела внегалактической астрономии
Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

ГУСЕВ Александр Сергеевич

19 августа 2025 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495)9392245, e-mail: gusev@sai.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия

Адрес места работы:

119234, г. Москва, Университетский проспект, д. 13,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», Государственный астрономический институт им.
П.К. Штернберга
Тел.: 7(495)9392046; e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника
ГАИШ МГУ А.С. Гусева удостоверяю:
Директор ГАИШ МГУ
профессор, чл.-корр. РАН

26 августа 2025 г.

К.А. Постнов