

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель директора по научной работе  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук,

д.м.-ф.н. И.Н. Брунков

29 августа 2025

### Отзыв ведущей организации на диссертационную работу

Дедикова Святослава Юрьевича

*“Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах”*  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности “1.3.1 – физика космоса и астрономия”

Диссертационная работа Дедикова С.Ю. “Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах” выполнена в Астрокосмическом Центре Физического института имени П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения, двух приложений и списка литературы, включающего 168 наименований. Общий объём диссертации 117 страниц.

Космическая пыль является одним из ключевых компонентов межзвёздной среды, определяющей её тепловые, химические и динамические свойства, формирование планетных систем, а также наблюдательные проявления межзвёздной среды. Действительно в нашей Галактике, межзвёздная пыль приводит к тому, что мы можем наблюдать в ультрафиолетовом и оптическом диапазоне только небольшую окрестность вокруг Солнечной системы. Тем не менее наблюдения поглощения на пыли и поляризации света пылью дают важную информацию о межзвёздной среде нашей Галактики, а излучение пыли в инфракрасном (ИК) диапазоне позволяет заглянуть даже в космологически удаленные от нас галактики. Последнее связано с тем, что пыль переизлучает в ИК диапазоне значительную часть излучения звёзд. В то же время, процессы разрушения и образования пыли в межзвёздной среде недостаточно глубоко изучены. Отчасти это связано, с тем, что имеется существенный недостаток в возможностях наблюдательных ограничений на эти процессы. В будущем, ИК/суб-мм телескопы следующего поколения, такие как разрабатываемый в АКЦ ФИАН Миллиметрон, помогут получить эти важные наблюдательные данные. Восполнению же пробелов в теоретическом понимании динамики, эволюции и наблюдательных свойств пыли при взаимодействии с ударными волнами и посвящена представленная Дедиковым С.Ю. диссертация.

Диссертация чётко структурирована, а материал понятно и доступно излагается и в достаточной мере иллюстрирован. После краткого, но чёткого введения в проблему, описывающего актуальность и проблематику эволюции пыли в межзвёздной среде, а также поставленные перед диссертантом цели и задачи о изучении разрушения и динамики пыли

в ударных волнах и наблюдательных проявлениях этих процессов, следует Глава 1, в которой показано, что неоднородности распределения плотности в межзвёздной среде приводят к менее эффективному разрушению пыли в остатках сверхновых за счёт выживания пыли в плотных конденсациях за фронтом ударной волны остатка. При этом, важно заметить, что использовался сложный численный код, в котором рассчитывалась эволюция размеров пыли во времени, что является важной задачей для оценок ИК излучения пыли. Вторая Глава диссертации посвящена оценкам теплового состояния и распределения пылинок по размерам в неоднородной среде за фронтом ударной волны, полученным в предыдущей главе, а также расчёт эволюции светимости пыли и эмиссионных линий в остатке сверхновой в ИК диапазоне. Показано, что неоднородности плотности межзвёздной среды сглаживают переходы между фазовыми состояниями газа в остатке сверхновой, и приводят к выживанию пыли за фронтами в горячей фазе, что оказывается критически важно для корректного расчёта светимости пыли в ИК диапазоне. Также получено сравнение между ИК светимостью пыли и в эмиссионных линиях ИК диапазона, таких как [CII]158 мкм, [OIII]88 мкм и [NII]205 мкм.

Глава 3 посвящена сравнению рассчитанной эволюции ИК светимости пыли в остатке сверхновой с рентгеновским излучением горячего газа. Получены карты излучения остатка в этих диапазонах, а также их зависимость от возраста остатка. Рассчитаны зависимость отношения светимостей ИК/рентген от эффективной температуры остатка сверхновой, определяемой по рентгеновскому спектру. Показано, что эволюция этой зависимости зависит от степени неоднородности межзвёздной среды. Рассчитанные значения сравниваются с несколькими известными остатками сверхновых, для некоторых из них получено хорошее согласие.

В последней, четвёртой Главе детально рассмотрена динамика пыли при взаимодействии межзвёздного облака с фронтом ударной волны. Эта глава фактически представляет изучение на существенно меньших масштабах, физических процессов, которые происходят при взаимодействии фронта УВ остатка сверхновой с неоднородностями плотности межзвёздной среды, что логически дополняет исследования, представленные в предыдущих главах. Показано, что в зависимости от соотношения между размером облака и скоростью фронта ударной волны возможны ситуации, когда пыль либо сохранится в облаке, либо будет выметена из облака. При этом в рамках модели полидисперсной пыли показано, что пыль больших размеров может выметаться из разрушаемого облака и сохраняться какое-то время в горячей среде, что очевидно важно для расчётов ИК светимости за фронтом ударной волны.

Диссертация написана очень ясным и хорошим языком, опечатки практически отсутствуют (например, на стр. 45, 66, 82 в подписи к рис. 3.7). Есть несколько замечаний к оформлению работы:

1. На Рис 2.2, 2.3 и 2.4, а также тексте Главы 2 представлена функция распределения частиц пыли по массе,  $f_d$ , которая имеет отрицательные значения. Видимо речь идёт о логарифмах функции распределения (ф.р.). Также в этой Главе можно догадаться, что понятие наклон ф.р., широко используемое в тексте характеризует показатель степени ф.р.
2. Непонятным остается необходимость написания слов “dusty” на стр. 58, а также “mass entrainment” на стр. 77.
3. На Рис. 2.2, 2.3, 2.4 – хорошо бы было для сравнения привести функцию распределения для изначального MRN распределения пыли.
4. Формула 2.2 - не указаны единицы измерения величины (и для  $T_1(a)$  ниже). Также пропущены единицы измерения величины  $T_{gas}$  на Рис. 2.5.

5. Непонятным является использование поверхностной яркости в Главах 2 и 3 (на рис 2.6 и 3.4) в единицах, содержащих угловые секунды и минуты - так как расстояние до рассчитываемого остатка остаётся не озвученным в тексте. Было бы логично использовать единицы площади поверхности.
6. Было бы логически правильным в Разделе 3.6 (и Рис. 3.7) сравнивать усреднённые рассчитанные по остатку величины отношения яркости в ИК/рентгене с наблюдательными данными - так как последние являются как раз усреднёнными величинами, а также для наблюдательных данных имеется оценки возраста остатка.

Помимо этого, имеются небольшие замечания по существу работы:

1. В разделе 2.3.2 производился расчёт излучения в линиях от остатка сверхновой. Можно догадаться, что расчёт производился в оптически тонком случае. Было бы не лишним обсудить адекватность такого приближения для остатков сверхновых.
2. В Приложении Б обсуждается расчёт ионизационного состава при охлаждении вещества, используемый в Главе 2. Можно заметить, что помимо ионизованных элементов в расчётах также присутствует нейтральный углерод, C I. Однако, ионизационная структура C I может быть значительно сложнее в случае присутствия плотного газа с  $10^2 \text{ см}^{-3}$  (который может истекать или находится в плотных сгустках за фронтом УВ) и будет зависеть от других параметров МЗС, таких как плотность, скорость ионизации космическими лучами, и степень молекуляризации - определяющие степень ионизации нейтрального газа в сгустках, а следовательно обилие C I.
3. В приложении А, и на Рис. А.2 фактически получается, что при увеличении численного разрешения разница в расчётах растёт. То есть разница в расчётах при увеличении от  $x_2$  до  $x_4$  больше, чем от  $x_1$  до  $x_2$ . Таким образом, утверждение о сходимости численного расчёта остаётся непонятным: а что, если увеличить сетку ещё в два раза? Возможно, стоило обсудить физические ограничения на размер неоднородностей в МЗС.

Тем не менее перечисленные замечания не являются существенными – работа написана прекрасно и содержит очень важную и новую информацию о физике межзвёздной среды. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Все выносимые на защиту положения опубликованы в 5 ведущих журналах, что соответствует требованиям ВАК о присуждении учёных степеней. Личный вклад в совместных публикациях чётко обозначен и определяющий. Можно было бы пожелать диссертанту активнее публиковать полученные важные результаты в журналах первого квартиля WoS, чтобы они могли быть известны более широкой научной общественности.

Считаем, что работа С.Ю. Дедикова “Разрушение космической пыли за фронтами ударных волн в неоднородных средах” отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Положением о присуждении учёных степеней ВАК, а её автор Святослав Юрьевич Дедиков безусловно заслуживает присуждения ему искомой степени по специальности “1.3.1 – физика космоса и астрономия”.

Доклад С.Ю. Дедикова был заслушан на Объединённом Астрофизическом семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Отзыв подготовлен кандидатом физико-математических наук по “специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия”, старшим научным сотрудником сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН Сергеем Александровичем

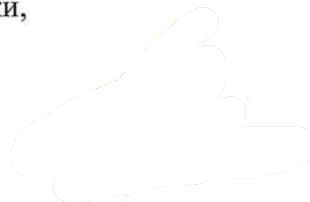
Балашевым и одобрен на заседании Объединённого Астрофизического семинаре в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН от 22 Июля 2025 г.

Старший научный сотрудник  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
к.ф.-м.н.



С.А. Балашев

Заведующий сектором теоретической астрофизики,  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
д.ф.-м.н.  
член-корр. РАН



А.В. Иванчик

**Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Адрес: Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, Россия, 194021  
Телефон: +7(812) 297-2245  
Факс: +7(812) 297-1017  
Электронная почта: [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)  
Руководитель ведущей организации: Иванов Сергей Викторович