

ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 52-44

Сивкова Евгения Эдуардовна

Эволюция углеводородных пылинок в межзвездной среде

Специальность 03.06.01 —

«Физика и астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н.

Вибе Дмитрий Зигфридович

Москва — 2019

Оглавление

	Стр.
Введение	4
 Глава 1. Химическая эволюция углеводородной пыли в	
межзвездной среде	13
1.1 Свойства пылевых частиц	13
1.2 Описание модели	16
1.2.1 Разрушение	20
1.2.2 Реструктуризация	23
1.3 Эволюция пыли в зонах ионизованного водорода и остатках	
сверхновых	25
1.3.1 Временные шкалы разрушения пыли	26
1.3.2 Временные шкалы реструктуризации пылинок	35
 Глава 2. Динамическая эволюция пыли в дисковых галактиках .	
2.1 Свойства пылевых частиц	44
2.2 Описание модели	46
2.2.1 Силы, действующие на пылевые частицы в окрестностях	
галактик	47
2.2.2 Уравнение движения частицы	50
2.3 Движение пылевой частицы в окрестностях дисковых галактик .	51
2.4 Потеря пылевой массы Галактикой	53
 Глава 3. Объединение моделей химической и динамической	
эволюции пыли применительно к окрестностям галактик	59
3.1 Описание модели	59
3.2 Эффективность разрушения пылинок в окологалактическом	
пространстве	61
3.2.1 Фактор эффективности давления излучения	62
3.2.2 Разрушение пылинок в галактическом гало	66
3.3 Возможные приложения модели	66
3.4 Выметание пылинок и градиент металличности	68

Закключение	71
Список литературы	72
Список рисунков	83
Список таблиц	87
Приложение А.	88
Приложение Б.	89
Приложение В.	92

Введение

Изучение пыли — одна из наиболее важных астрофизических тем, поскольку именно пыль является препятствием почти для любого наблюдения в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном, субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах, в том числе, для космологически важных наблюдений микроволнового фонового излучения. Очевидно, чтобы устранить эти помехи, необходимо знать как свойства пыли, так и ее пространственное распределение. Особенно важно исследование пыли в областях звездообразования, где она представляет собой не только помеху, но также индикатор и фактор формирования физических условий, которые сопровождают или даже провоцируют и контролируют процесс рождения звезд. Пыль является важным участником этого процесса: она обеспечивает потери энергии во время протозвездного коллапса, защищает молекулы в плотных облаках от диссоциации ультрафиолетовым (УФ) излучением, является катализатором многих важных химических реакций, в том числе реакции формирования молекулярного водорода. Наконец, пыль является исходным материалом для образования планетных систем.

Еще одна важная роль пыли связана с общей эволюцией органических соединений во Вселенной. С 1970-х гг. по настоящее время появилось множество фактов, свидетельствующих о присутствии в межзвездной среде (МЗС) органических соединений. Среди них с высокой вероятностью присутствуют ароматические углеводороды, углеродные цепочки, фуллерены, алмазы, аморфный углерод и сложные комбинации различных этих структур.

Одним из важных этапов в развитии представлений о составе и эволюции пылевого компонента МЗС стало открытие неидентифицированных эмиссионных инфракрасных полос, возникновение которых в настоящее время принято связывать с наличием в МЗС углеводородных частиц. Поскольку к появлению инфракрасных полос приводит поглощение частицей ультрафиолетового излучения, они широко используются в качестве индикатора процессов звездообразования.

Несмотря на некоторые неопределенности, связанные с установлением состава и структуры этих частиц, для обозначения пылинок, являющихся источником таких полос, широко используется сокращение «ПАУ». ПАУ явля-

ются одним из основных компонентов пыли в межзвездной среде. Инфракрасные (ИК) наблюдения галактик различных типов свидетельствуют о том, что содержание ПАУ оказывается высоким в самых различных условиях, однако их свойства могут значительно меняться от объекта к объекту. Наблюдательные данные, полученные при помощи космических телескопов ИК диапазона, в первую очередь, телескопа «Спитцер», указывают, что в областях звездообразования углеводородные частицы эволюционируют: меняется и их распределение по размерам, и структурные свойства.

При анализе наблюдений в качестве меры относительного вклада ПАУ в пылевой компонент МЗС используется массовая доля ПАУ в общей массе пыли $q_{\text{ПАУ}}$. Для оценки этого параметра необходимы данные наблюдений как в ближнем, так и в дальнем ИК-диапазоне [1], что, как правило, подразумевает использование результатов наблюдений на космических телескопах «Спитцер» и «Гершель». Одним из указаний особенности эволюции ПАУ может оказаться зависимость отношения потоков на 8 мкм и на 24 мкм от металличности галактики или отдельного комплекса ионизованного водорода. В работах [2; 3] было отмечено, что в областях звездообразования от металличности зависит не только само отношение этих потоков, но и характер его изменения со временем. При металличности порядка солнечной это отношение убывает со временем, чего следует ожидать в случае, если ПАУ разрушаются УФ-излучением молодых звезд эффективнее, чем более крупные пылинки. Однако в областях звездообразования с более низкой металличностью наблюдается противоположная тенденция, как будто относительное содержание ПАУ увеличивается со временем. Эти результаты указывают, что эволюция ПАУ в областях звездообразования не связана исключительно с разрушением, а может определяться и другими процессами.

Для выявления процессов эволюции пыли в различных астрофизических средах проведены многие исследования. Считается, что пылевые частицы в основном разрушаются в экстремальных условиях — при высоких значениях интенсивности поля УФ излучения, ударных волнах, горячем газе или турбулентных движениях. В этих условиях пылинки могут быть разрушены фотонами высокой энергии [4–6], путем распыления быстрыми ионами и электронами [7; 8] или в результате дробления при столкновениях с другими пылинками [9; 10]. Скорости этих процессов зависят от материала пыли. Обычно предполагает-

ся, что межзвездные пылевые частицы являются силикатными и углеродными [11–15], но специфическая природа углеродного материала в космической пыли все еще обсуждается. В некоторых моделях, которые успешно объясняют наблюдаемые свойства поглощения и ИК-излучения пыли, предполагается, что крупные углеродистые частицы являются графитоподобными, а мелкие углеродистые частицы — ПАУ-подобными [1; 16]. В других моделях предполагается, что углеродные пылинки являются гидрогенизированными аморфными углеродами [15; 17], причем ПАУ являются их частным случаем.

Для интерпретации имеющихся наблюдений по-прежнему успешно используются модели неэволюционирующей пыли, все чаще в исследования включаются и различные процессы разрушения или роста для конкретных межзвездных условий и пылевых материалов. Учитывая постоянно увеличивающийся объем наблюдательных данных, было бы удобно иметь инструмент для быстрой теоретической оценки эволюционных временных масштабов и анализа изменяющегося распределения пыли по размерам. В нашей научной группе с участием диссертанта разработан программный код **Shiva**, который объединяет процессы разрушения в единую модель и позволяет рассчитывать эволюцию пыли при различных условиях. Инструмент **Shiva** может использоваться автономно или включаться в динамические модели. Он во многом схож с недавно опубликованной моделью THEMIS [18], однако в дополнение к процессам, представленным в THEMIS (фотоароматизация, распыление), в модели **Shiva** также учитываются фоторазрушение через потерю атомов углерода, ароматизация ионами и электронами и процессы разрушения. Программный код является общедоступным¹.

Эволюционные процессы начинают играть особенно важную роль, когда пылинка перемещается в среде с меняющимися физическими условиями, например, вылетает из галактического диска в окологалактическую среду. Современные исследования доказывают присутствие пылевых частиц не только в межзвездной среде, но и в межгалактическом пространстве. Пылевые облака в толстом диске видны на прямых оптических изображениях многих галактик [19]; на ее присутствие пыли за пределами диска указывает рассеяние ультрафиолетового излучения звезд галактики [20]. В нашей Галактике возмож-

¹<http://www.inasan.rssi.ru/~khramtsova/SHIVA.html>

ным признаком наличия частиц ПАУ на больших высотах над диском может быть поглощение на $6565\text{\AA}$ в гало Галактики [21].

Предлагались различные механизмы образования межгалактической пыли, в том числе экзотические, как например в работе [22], где предполагается, что эта пыль является продуктом эволюции звезд населения III. Но, в основном, условия, необходимые для образования пыли (высокая плотность газа и низкая температура) имеются только внутри галактик. Поэтому гораздо чаще предполагается, что пыль, образующаяся в галактиках, выносится в межгалактическое пространство посредством каких-либо процессов. Предлагались модели выметания пыли посредством галактического ветра [23], в процессе движения сквозь межгалактический газ [24]. Уже неоднократно обсуждался вопрос возможности выметания пыли во внегалактическое пространство давлением излучения звезд [25–28]. Нами разработана представленная в диссертации модель выметания пылевых частиц из галактического диска под действием давления излучения на примере Млечного Пути. Однако оценки [26;27;29;30] показывают, что этот процесс характерен для большинства спиральных галактик.

При проведении такого моделирования важно учитывать, что пыль может эволюционировать не только в межзвездной среде, но и в галактических масштабах. Важной характеристикой пыли может стать изменение ее размеров при взаимодействии с межзвездной и межгалактической средой. Фаза начального роста пыли продолжается относительно небольшое время, поэтому мы считаем началом ее движения момент окончания формирования. Но в дальнейшем процессе движения по галактике пыль, взаимодействуя с частицами газа и другими пылевыми частицами, может подвергаться разрушению. В результате совместного действия процессов выметания и разрушения пыли при движении из галактики может происходить обогащение межгалактической среды тяжелыми элементами [31; 32]. Поэтому нами предложено объединение моделей разрушения и выметания пыли из галактического диска.

Целью данной работы является исследование временных шкал разрушения и реструктуризации пыли в условиях межзвездной среды, а также исследование возможности обогащения межгалактического пространства пылевыми частицами в результате действия давления излучения звезд галактик, и влияние разрушения пыли на этот процесс.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать темп разрушения и реструктуризации пыли для различных условий межзвездной среды, используя программный код **Shiva**.
2. Разработать программный код для расчетов динамики пылевой частицы в галактике и окологалактическом пространстве.
3. Разработать модель движения пылевой частицы в Млечном Пути.
4. Рассчитать эффективность выметания различных видов пылевых частиц из галактического диска.
5. Объединить модели динамики пылевой частицы в Галактике и разрушения пыли, т.е. разработать программный код, который бы производил вычисления движения частицы совместно с процессами разрушения.
6. Оценить роль разрушения пыли в процессе ее выметания в окологалактическое пространство.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Оценены темпы разрушения и реструктуризации пыли для различных условий межзвездной среды и различных видов пылевых частиц.
2. Оценен вклад процессов дробления и распыления в разрушение ансамбля пылевых частиц.
3. Объяснено образование кольцеобразной морфологии излучения пыли вблизи массивных звезд.
4. Оценены скорости движения различных видов пылевых частиц при выметании из галактического диска под действием давления излучения звезд.
5. Оценен темп потери массы в виде пыли нашей Галактикой за счет действия давления излучения звезд.

Научная новизна:

1. Впервые получено объяснение образования кольцеобразной морфологии излучения пыли вблизи массивных звезд с использованием модели разрушения и реструктуризации пыли.
2. Построена трехмерная модель выметания пылевых частиц из диска Галактики с учетом процессов разрушения.

3. Выполнено оригинальное исследование вклада разрушения пылевых частиц в обогащение пылью межгалактического пространства.

Научная и практическая значимость Поскольку пыль является препятствием почти для любых наблюдений во многих диапазонах длин волн, для устранения связанных с нею помех надо знать свойства пыли, ее пространственное распределение и эволюцию в межзвездной среде. В частности, одним из факторов, искажающих реликтовый фон, является окологалактическая и межгалактическая пыль. Поскольку реликтовое излучение дает важную информацию, по которой можно судить о правильности космологических моделей, очень важно правильно учитывать влияние межгалактической пыли, для чего необходимо иметь максимально полное представление о ее происхождении, динамике и эволюции. Полученные в ходе исследования результаты по разрушению пыли могут быть использованы в сложных гидродинамических моделях. Разработанная модель выметания пыли из Галактики может применяться для расчетов потери пылевой массы другими галактиками.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается анализом работ авторов по исследуемой тематике; проведением тестирования правильности работы разработанных программ на соответствие результатов наблюдениям и общеизвестным параметрам Галактики. Полученные результаты не противоречат наблюдениям, полученным другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты по теме диссертации представлены на научных конференциях и изложены в публикациях в рецензируемых и нерецензируемых изданиях.

Основные результаты работы докладывались на:

1. 46-й студенческой научной конференции «Физика Космоса», г. Екатеринбург, Россия, 30 января - 3 февраля 2017 г., устный доклад, «Эволюция пылевых частиц в зонах ионизованного водорода и ударных волнах в остатках сверхновых».
2. 47-й студенческой научной конференции «Физика Космоса», г. Екатеринбург, Россия, 29 января - 2 февраля 2018 г., устный доклад, «Эволюция углеводородной пыли в зонах ионизованного водорода и остатках сверхновых».
3. Конференции «Звезды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения проф. А. Г. Масевич, г. Москва, Россия, 15-16 октября 2018

- г., устный доклад «Роль потери тяжелых элементов в формировании радиального градиента металличности в дисковых галактиках».
4. Конкурсе молодых ученых ИНАСАН, 15.11.2018, устный доклад, Сивкова Е.Э. «Роль потери тяжелых элементов в формировании радиального градиента металличности в дисковых галактиках»

Личный вклад. Автор принимал участие в постановке задач. Соискателем разработано программное обеспечение для расчетов движения пылевых частиц в Галактике, в том числе с учетом их разрушения. Автором выполнены расчеты, проведен анализ полученных результатов и сформулированы выводы.

Публикации.

Публикации в рецензируемых изданиях:

1. Wiebe, D.; Murga, M.; Sivkova, E., Star-Forming Regions in Orion as a Dust Evolution Laboratory, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, p.15, 2017
2. Murga, M. S.; Wiebe, D. S.; Sivkova, E. E.; Akimkin, V. V., SHIVA: a dust destruction model, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 488, Issue 1, p.965-977

Публикации в нерецензируемых изданиях:

1. Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Мурга М. С. «Эволюция углеводородной пыли в зонах ионизованного водорода и остатках сверхновых», труды ЗАШ - 47, 2018, с. 230.
2. Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Мурга М. С. «Временные шкалы разрушения углеводородной пыли в областях ионизованного водорода и остатках сверхновых», Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвященной памяти академика А.А. Боярчука, 2018, с. 307. 2.
3. Сивкова Е. Э., Вибе Д. З., Мурга М. С. «Эволюция пылевых частиц в зонах ионизованного водорода и ударных волнах в остатках сверхновых», труды ЗАШ - 46, 2017, с. 220
4. Sivkova, E. E.; Wiebe, D. S.; Murga, M. S., Timescales of the hydrocarbon dust destruction in regions of ionized hydrogen and supernova remnants, Proceedings of the 2018 acad. A.A. Boyarchuk Memorial Conference, INASAN Science Proceedings. Edited by D. V. Bisikalo and D. S. Wiebe. Moscow: Yanus-K, 2018, p. 307-311

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения.

Полный объём диссертации составляет 92 страницы с 33 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 109 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена исследованию разрушения пылевых частиц в различных условиях межзвездной среды, в том числе зонах ионизованного водорода и остатках сверхновых. Приведены результаты вычислений в программном коде **Shiva** для сетки параметров межзвездной среды, а также проведено сравнение с наблюдениями. Анализируется вклад различных процессов в разрушение ансамбля пылевых частиц. Приводится возможное объяснение кольцеобразной морфологии излучения пыли вокруг массивных звезд.

Вторая глава посвящена исследованию механизма выметания пыли из галактик под действием давления излучения звезд с учетом сил гравитации и сопротивления межзвездного газа. Приводятся результаты моделирования для Млечного Пути. Оценивается общий темп потери массы в виде пыли нашей Галактикой.

Третья глава посвящена исследованию возможности объединения моделей разрушения и выметания пылевых частиц из галактик. Приводятся результаты вычислений. Обсуждаются влияние различных параметров модели на результаты вычислений, возможность объяснения природы градиентов металличности в дисковых галактиках при помощи модели выметания пылевых частиц, а также другие возможные приложения модели.

В заключении приведены основные результаты работы.

1. Вычисления при помощи программного кода **Shiva** позволили составить сетку временных шкал разрушения для условий, соответствующих

щих различным физическим условиям в межзвездной среде; построенные зависимости также позволяют оценить вклад таких параметров как скорость и температура в изменение темпа разрушения пылевого ансамбля в ту или иную сторону.

2. Численные исследования показали, что вблизи массивных звезд за время менее 10 тыс. лет происходит разрушение мелких пылевых частиц. На краю области ионизованного водорода как мелкие, так и крупные пылинки переходят в ароматизированное состояние за время 100 тыс. лет. Полученные результаты можно использовать для интерпретации наблюдений областей ионизованного водорода.
3. Темп потери массы в виде пыли для нашей Галактики составляет $\sim 0.02 M_{\odot}/\text{год}$.
4. С приближением к краю Галактики пылевые частицы двигаются «под наклоном», т. е. движение вдоль галактического радиуса преобладает над движением по высоте.
5. Крупные пылинки, в отличие от мелких и средних, не могут покинуть пределы Галактики.
6. Крупные пылевые частицы могут разрушаться за счет столкновений с мелкой пылью и выноситься в окологалактическое и межгалактическое пространство в виде осколков.
7. В дальнейших исследованиях планируется расширение модели выметания пыли для других дисковых галактик и проведение расчетов с использованием адаптированного программного кода.

Глава 1. Химическая эволюция углеводородной пыли в межзвездной среде

В данной главе исследуются механизмы разрушения и реструктуризации пылевых частиц в межзвездной среде. Проводятся вычисления эволюции распределения пылинок по размерам для различных значений температуры, концентрации, скорости столкновений с частицами газа и значений интенсивности поля излучения. Оцениваются характерные времена разрушения ансамбля пылевых частиц для различных физических условий. Рассчитывается эволюция распределения пылинок по степеням ароматизации. Расчеты изменения распределения пылинок по размерам во времени проводились в программе **Shiva**.

1.1 Свойства пылевых частиц

Образование и рост углеродных пылинок в атмосферах проэволюционировавших звезд подробно описаны в книге [33], однако по поводу начальной структуры этих пылинок единого мнения нет. Такие частицы в действительности занимают промежуточное положение между молекулами и пылинками. Теоретические модели предсказывают, что образование пылинок в оболочках углеродных звезд должно приводить, главным образом, к появлению ароматических частиц [34], т. е. частиц, содержащих в своей структуре преимущественно бензольные кольца. С другой стороны, сопоставление «ароматических» и «алифатических» (принадлежащих частицам, не содержащим в своей структуре ароматических связей) полос в ИК-спектрах молодых планетарных туманностей показывает, что в большинстве случаев пылинки имеют преимущественно алифатическую структуру [35]. До попадания пылинок в МЗС это соотношение может измениться в сторону преобладания ароматических.

Вероятнее всего, ПАУ или отдельные бензольные кольца в МЗС входят в состав более сложных частиц аморфного гидрогенизированного углерода ($a\text{-C:H}$) [15; 36] или смешанных наночастиц, включающих в себя как углеродные

цепочки, так и бензольные кольца, а также примеси других элементов. Эти частицы, строго говоря, не тождественны ПАУ по свойствам.

Способность таких пылинок излучать в тех или иных эмиссионных ИК-полосах определяется степенью их ароматизации, для численного описания которой можно использовать такой параметр, как ширина запрещенной зоны (E_{gap}). Самым распространенным критерием ароматичности является возникновение кольцевого тока при приложении внешнего магнитного поля. Ароматичность — это способность молекул некоторых соединений поддерживать индуцированный внешним магнитным полем круговой ток в молекуле, магнитное поле которого противодействует внешнему магнитному полю. Зазор между электронами, равный ширине запрещенной зоны, для бензола составляет 6 эВ. При последовательном увеличении количества бензольных колец, получится ряд полициклических ароматических углеводородов, в котором ширина запрещенной зоны будет непрерывно уменьшаться. Таким образом, меньшей ширине запрещенной зоны соответствует большее количество бензольных колец в молекуле, то есть большая «степень ароматизации».

К появлению наблюдаемых инфракрасных полос приводит поглощение частицей ультрафиолетового излучения. Предполагается, что пылинки радиусом менее $\sim 250 \text{ \AA}$ восприимчивы к поглощению единичных фотонов, которые на короткое время нагревают их до высокой температуры, а затем пылинка быстро остывает за счет ИК-излучения [37; 38]. Для проведения расчетов оптические постоянные (действительная и мнимимая части показателя преломления n и k) углеводородных пылинок радиусом до $200 \text{ \AA}$ взяты из работ [39–43]. Предполагается, что мелкие пылинки ароматизируются во всем объеме, то есть однородны по степени ароматизации, тогда как более крупные пылинки являются двухслойными. Внутренний слой состоит из аморфного гидрогенизованного углеводородного материала с шириной запрещенной зоны $E_{\text{gap}} = 2.67 \text{ эВ}$, а внешний слой может реструктурироваться под действием УФ-излучения, поэтому оптические постоянные поверхностного слоя отличаются от оптических постоянных внутреннего слоя. Для расчета факторов эффективности поглощения $Q_{\text{abs}} = C_{\text{abs}}/\pi a^2$ двухслойных пылинок используется программный код, основанный на теории Ми и описанный в работе [44].

На рис. 1.1 слева показаны значения Q_{abs} для углеводородных пылинок различных размеров при фиксированном значении $E_{\text{gap}} = 0.1 \text{ эВ}$. Видно, что

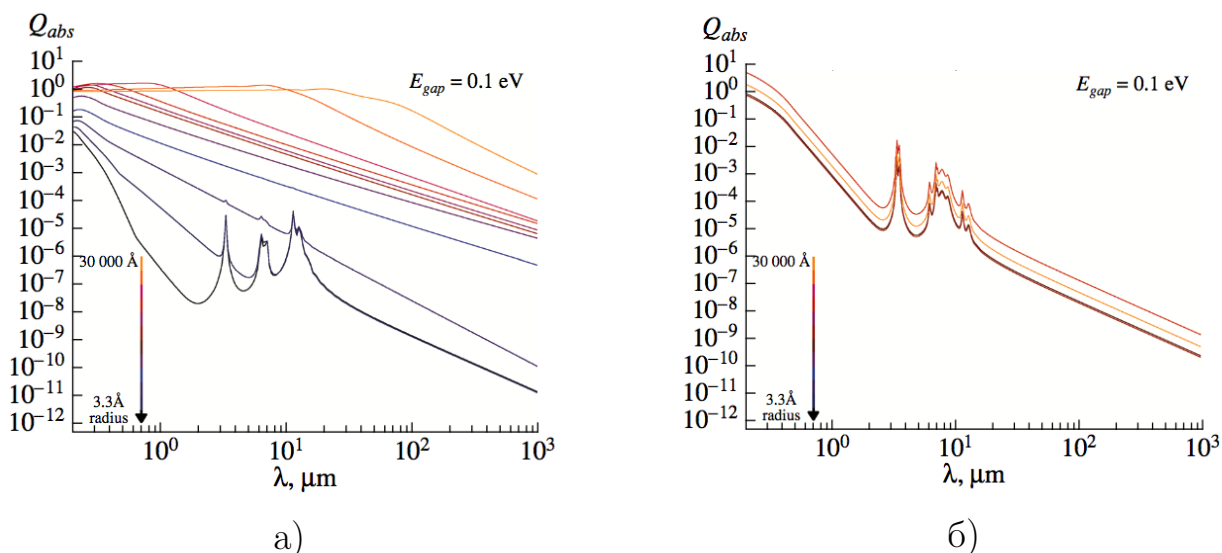


Рисунок 1.1 — Зависимость фактора эффективности поглощения Q_{abs} от длины волны при фиксированном значении $E_{\text{gap}} = 0.1$ эВ для углеводородных пылинок с радиусами от 3.3 до 30 000 Å (при уменьшении размера цвет меняется от оранжевого к черному). а) Полностью ароматизованные пылинки с радиусом не больше 200 Å. Для более крупных пылинок предполагается, что ароматизована только оболочка толщиной 200 Å. б) Полностью ароматизованные пылинки независимо от размера.

особенности поведения Q_{abs} на длинах волн от 2 до 20 мкм сильно зависят от размера пылинки. Слабые полосы появляются у пылинок радиусом около 200 Å и усиливаются с уменьшением их размеров. В крупных пылинках основную долю составляет гидрогенизированное вещество, поэтому характеристики тонкого ароматизованного слоя менее заметны. Для сравнения на рис. 1.1 справа показаны значения Q_{abs} для пылинок различных размеров, ароматизованных полностью независимо от размера.

На рис. 1.2 показаны факторы эффективности поглощения пылинки с радиусом 10 Å и различными значениями E_{gap} . Преимущественно алифатические ($E_{\text{gap}} = 2.67$ эВ; синие линии) и преимущественно ароматические ($E_{\text{gap}} = 0.1$ эВ; оранжевые линии) пылинки характеризуются пиками в значениях Q_{abs} на разных длинах волн или полосами с существенно разными максимальными значениями и ширинами. У ароматических соединений наиболее значительны пики Q_{abs} на длинах волн 3.3, 6.3, 6.7, 11.3 и 12.7 мкм, тогда как алифатические соединения заметно проявляются на длинах волн 3.4 и 7.0 мкм, а пики значений Q_{abs} в диапазоне 11–12 мкм у них существенно слабее.

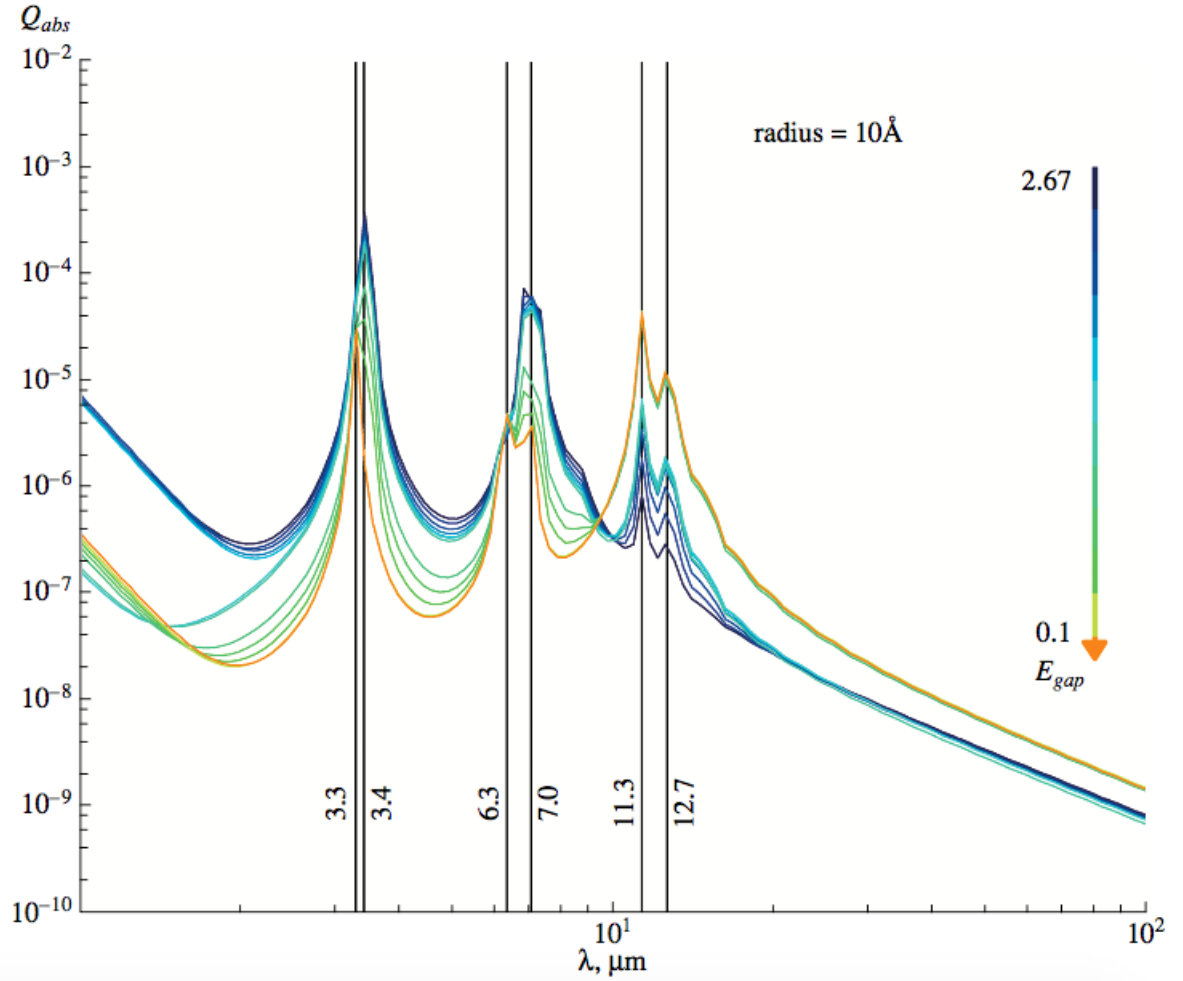


Рисунок 1.2 — Зависимость фактора эффективности поглощения Q_{abs} от длины волны для пылинок радиусом $10 \text{ \AA}$ и значений E_{gap} от 2.67 до 0.1 эВ (при увеличении E_{gap} цвет меняется от оранжевого к синему).

Для оценки относительного содержания ароматических и алифатических соединений довольно часто используется отношение интенсивностей спектральных особенностей на 3.3 и 3.4 мкм [45–47], однако очевидно, что для разделения этих особенностей требуются спектры достаточно высокого разрешения. Кроме того, как видно из рис. 1.2, в зависимости от преобладания пылинок того или иного типа полосы на 3.3 и 3.4 мкм могут перекрывать друг друга.

1.2 Описание модели

В работе [15] описывается идея, что межзвездные углеродные пылинки состоят из аморфного углеводородного материала, меняющего структуру под

действием УФ-излучения. Основной особенностью нашей модели является реструктуризация пылинки при взаимодействии с УФ-излучением, в результате которой вещество переходит из алифатического состояния, насыщенного водородом, в ароматическое, обедненное водородом («ароматизация»). Вероятно, ароматизация происходит в МЗС при повышенной (относительно среднего околосолнечного фона) интенсивности УФ-излучения.

Другой механизм формирования ПАУ был предложен в работе [9]. В этом механизме крупные пылинки распадаются на мелкие при столкновениях друг с другом в межзвездных ударных волнах, образуя в результате этого процесса много мелких пылинок (в том числе ПАУ). Авторы подсчитали, что примерно от 5 до 15% от исходной массы графитовых пылинок в межзвездных ударных волнах со скоростями столкновений $50 \div 200$ км/с должны стать фрагментами размером менее $14 \text{ \AA}$, что соответствует диапазону размеров ПАУ. Межзвездные ПАУ полностью разрушаются при столкновениях со скоростями, больше ~ 100 км/с. При меньших скоростях ПАУ не уничтожаются полностью, даже если они теряют часть атомов углерода. В работе [48] показано, что многочисленные мелкие пылинки появляются благодаря фрагментации крупных частиц, хотя это существенно только там, где концентрация выше $\sim 10^5 \text{ см}^{-3}$.

В контексте представленной модели важны следующие параметры: температура газа T , концентрации ионов H^+ , He^+ и электронов, поле излучения и скорость относительного нетеплового движения газа и пыли, например, возникающего вследствие распространения ударных волн.

Мы характеризуем поле излучения параметром U , равным отношению текущей интенсивности излучения в диапазоне от $912 \text{ \AA}$ до $2500 \text{ \AA}$ к интенсивности излучения в солнечной окрестности (определенной в работе [49]).

Предполагается, что в начальный момент времени (например, соответствующий формированию пыли в проэволюционировавших звездах или началу звездообразования в молекулярном облаке) ансамбль пылевых частиц характеризуется заданным распределением по размерам и степеням ароматизации.

В настоящее время существуют три основные модели распределения пылевых частиц по размерам: модель J13 из работы [15], модель MRN из работы [11] и модель из работы [50]. Несмотря на популярность и удобство использования, модель MRN в настоящее время устарела и охватывает лишь небольшой диапазон размеров пылинок. Нами чаще всего используется начальное распределение

по размерам пыли J13. Распределение Weingartner-Draine ([50]) по многим параметрам схоже с распределением J13. В распределении J13 предполагается, что частично ароматизованная углеводородная пыль состоит из мелких пылинок с радиусами от 4 до 1000 Å, распределение которых по размерам имеет вид степенного закона с экспоненциальным «хвостом», и крупных пылинок с логнормальным распределением по размерам и характерным радиусом ~ 2000 Å. В распределении MRN преобладают крупные пылинки и ароматическая пыль отсутствует.

В модели рассматривается N_a интервалов размеров пыли и N_{eq} интервалов величины ширины запрещенной зоны E_{gap} .

Эволюция концентрации пылинок N_{ij} в i -м интервале по размерам и в j -м интервале по степени ароматизации может быть описана уравнением Смолуховского [51], которое часто используется для описания процессов коагуляции [52; 53]:

$$\begin{aligned}
\frac{dN_{ij}}{dt} = & \underbrace{A_{ij+1}^{(1)}N_{ij+1} - A_{ij}^{(1)}N_{ij}}_{\text{ароматизация фотонами}} + \underbrace{B_{i+1j}^{(1)}N_{i+1j} - B_{ij}^{(1)}N_{ij}}_{\text{фоторазрушение}} \\
& + \underbrace{A_{ij+1}^{(2)}N_{ij+1} - A_{ij}^{(2)}N_{ij}}_{\text{ароматизация ионами при неупругих столкновениях}} + \underbrace{B_{i+1j}^{(2)}N_{i+1j} - B_{ij}^{(2)}N_{ij}}_{\text{распыление при неупругих столкновениях}} \\
& + \underbrace{A_{ij+1}^{(3)}N_{ij+1} - A_{ij}^{(3)}N_{ij}}_{\text{ароматизация при упругих столкновениях}} + \underbrace{B_{i+1j}^{(3)}N_{i+1j} - B_{ij}^{(3)}N_{ij}}_{\text{распыление при упругих столкновениях}} \\
& + \underbrace{A_{ij+1}^{(4)}N_{ij+1} - A_{ij}^{(4)}N_{ij}}_{\text{ароматизация крупных пылинок при распылении}} + \underbrace{B_{i+1j}^{(4)}N_{i+1j} - B_{ij}^{(4)}N_{ij}}_{\text{распыление крупных пылинок}} \\
& + \underbrace{\frac{1}{2} \sum_{i_1=1}^{N_m} \sum_{j_1=1}^{N_{eg}} \sum_{i_2=1}^{N_m} \sum_{j_2=1}^{N_{eg}} C_{i_1j_1i_2j_2}^{ij} L_{i_1i_2} N_{i_1j_1} N_{i_2j_2} - N_{ij} \sum_{i_1=1}^{N_m} \sum_{j_1=1}^{N_{eg}} L_{i_1i} N_{i_1j_1}}_{\text{дробление}}
\end{aligned} \tag{1.1}$$

Здесь $A_{ij+1}^{(1,2,3,4)}$ — константы скорости потери атомов водорода и соответствующее увеличение ароматизации в направлении от $(j+1)$ -й ячейки к соседней j -й ячейке E_g (или от j -й к $(j-1)$ -й ячейке в случае $A_{ij}^{(1,2,3,4)}$). Мы предполагаем, что только потеря атома углерода приводит к уменьшению массы пылинки, поэтому масса ячейки не меняется в процессе ароматизации. $B_{i+1j}^{(1,2,3,4)}$ — константы

скорости потери атомов углерода в результате фоторазрушения и распыления ионами и электронами и соответствующее изменение массы $(i + 1)$ -й ячейки на соседнюю i -ю ячейку (или от i -й до $(i - 1)$ -й ячейки в случае $B_{ij}^{(1,2,3,4)}$). Мы предполагаем, что потеря пылинкой атома углерода не меняет ее степень ароматизации. $C_{i_1 j_1 i_2 j_2}$ — соотношение между массой, перешедшей в i -ю ячейку за счет дробления и средней массой ячейки, а $L_{i_1 i_2}$ определяется как:

$$L_{i_1 i_2} = \pi(a_{i_1} + a_{i_2})^2 v_{i_1 i_2}^{\text{col}} F_C, \quad (1.2)$$

где $v_{i_1 i_2}^{\text{col}}$ — скорость столкновений между пылинками, а F_C — кулоновский фактор, который определяется как:

$$F_C = 1 - \frac{2Z_{i_1} Z_{i_2} e^2}{m_{i_1 i_2} (a_{i_1} + a_{i_2}) (v_{i_1 i_2}^{\text{col}})^2}, \quad (1.3)$$

где Z_{i_1} и Z_{i_2} — зарядовые числа пылинок, e — заряд электрона, $m_{i_1 i_2}$ — приведенная масса сталкивающихся пылинок. Величина F_C полагается равной нулю, если приведенное выше выражение дает отрицательное число.

Константы скорости ароматизации рассчитываются как:

$$A_{ij}^{(1,2,3,4)} = \frac{\varepsilon_{ij}^{(1,2,3,4)}}{E_{\text{gb}}^{j+1} - E_{\text{gb}}^j}. \quad (1.4)$$

Граничные значения $A_{ij}^{(1,2,3,4)}$ для $j = 1$ и $j = N_{\text{eg}} + 1$ равны нулю.

Константы скорости потери атомов углерода считаются аналогично:

$$B_{ij}^{(1,2,3,4)} = \frac{\mu_{ij}^{(1,2,3,4)}}{m_{\text{b}}^{i+1} - m_{\text{b}}^i}. \quad (1.5)$$

Граничные значения величин $B_{ij}^{(1,2,3,4)}$ для $i = N_{\text{m}}$ равны нулю, но пылинка может покинуть ячейку при $i = 1$.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) (1.1) является жесткой и должна решаться подходящим методом. Мы выбрали метод **CVODE**¹ из программного пакета **SUNDIALS** [54], который позволяет решать жесткие системы ОДУ. Код **Shiva** реализован на языке C⁺⁺.

¹<https://computation.llnl.gov/projects/sundials/cvode>

Далее мы описываем механизмы разрушения и реструктуризации (перехода структуры частицы из алифатического в ароматическое состояние).

1.2.1 Разрушение

Ионы и электроны могут обладать кинетической энергией, достаточной для разрушения мелкой пылинки (с количеством атомов меньше 1000) при столкновении. Эти пылинки представляют собой, скорее, макромолекулы. Бомбардировка мелких пылинок происходит по всему объему и может приводить к их полному разрушению. Крупные же пылинки бомбардируются энергичными частицами лишь на поверхности и поэтому испытывают только поверхностную эрозию. Различаются два типа взаимодействия энергичной частицы и углеводородной пылинки: 1) отрыв атома водорода или C_2 при возбуждении пылинки, 2) непосредственное выбивание атома из решетки за счет столкновения.

Отрыв элемента пылинки может происходить в результате снятия возбуждения, возникшего из-за поглощения энергии налетающей заряженной частицы (иона или электрона) при ее взаимодействии с электронным облаком пылинки. Нейтральный атом может воздействовать на решетку только при попадании непосредственно в один из ее узлов. Величина переданной энергии зависит от эффективности трения при прохождении частицы внутри пылинки и от пройденного расстояния. Расчеты этих величин для ПАУ были произведены в работе [55]. Нами используются аналогичные расчеты с изменениями, связанными с иной геометрией рассматриваемых пылинок. Мы представляем молекулярную структуру пылинки α -С:Н в виде куба, состоящего из слоев, каждый из которых представляет собой квази-ПАУ [56] (реальные пылинки α -С:Н, конечно, имеют более сложную геометрическую форму). Если вещество пылинки гидрогенизовано, энергия (с учетом вероятности диссоциации) будет израсходована на отсоединение водорода и ароматизацию. В случае дегидрогенизованного состояния диссоциация происходит за счет отделения C_2 .

Также может происходить выбивание атомов из решетки пылинки в результате ядерного взаимодействия между атомами решетки и налетающим

ионом с кинетической энергией, превосходящей энергию связи атомов в решетке.

В работе [55] при расчете эффективности разрушения рассматривается упругое столкновение между частицей (водород, гелий, углерод) и неподвижным атомом углерода в решетке. В результате столкновения часть кинетической энергии налетающей частицы передается атому углерода. Если приобретенная энергия выше критической энергии для выбивания атома из решетки, пылинка теряет атом. Величина этой энергии может быть оценена только приблизительно, во-первых, из-за отсутствия достоверных экспериментальных данных, во-вторых, потому что она, скорее всего, зависит от размера пылинки, структуры, заряда, а также от положения атома в решетке: атомы на краю отрываются гораздо легче, чем атомы центральной части пылинки. В нашей модели мы принимаем это значение равным 7.5 эВ, как было сделано в работе [55] для ПАУ. Вообще говоря, мы рассматриваем не ПАУ, а соединения, которые могут включать как алифатические, так и ароматические связи. Поскольку алифатические связи менее прочны, чем ароматические, их порог критической энергии может быть ниже. Однако молекулярное рассмотрение процесса бомбардировки существенно, как правило, только для очень мелких пылинок, которые быстро ароматизуются. Соответственно, связи в них являются, в основном, ароматическими.

Для описания столкновений в работе [55] используется теория ZBL (Ziegler-Biersack-Littmark) [57], с помощью которой находится величина энергии, полученной атомом углерода от налетающей частицы, а также сечение взаимодействия. В объемных пылинках возможны многократные столкновения налетающей частицы с атомами решетки, из-за чего темп разрушения может увеличиться в несколько раз по сравнению с темпом разрушения плоской структуры (ПАУ). Если энергия иона достаточна для выбивания атома из первого слоя, его энергия уменьшается на величину, которая представляет собой максимальную энергию, усредненную по всем возможным углам прихода иона. На второй слой ион налетает с энергией, уменьшенной на эту величину. Если этой остаточной энергии снова достаточно для выбивания атома, то и второй слой теряет атом из решетки. Так продолжается, пока ион не покинет пылинку или его кинетической энергии станет недостаточно для выбивания атома.

В случае теплового движения газа необходимо интегрировать темп разрушения по всему диапазону скоростей, как и в случае статистического разрушения. Самыми распространенными ионами являются ионы водорода и гелия, поэтому как в случае статистической, так и в случае нестатистической фрагментации мы рассматриваем разрушение ими, а также ионами углерода в качестве представительного более тяжелого иона.

Как было показано в работе [56], в случае крупных пылинок (с числом атомов больше 1000) взаимодействие решетки и налетающих частиц можно детально не рассматривать, ограничившись классическим описанием процесса: если атом на поверхности пылинки после столкновения с налетающей частицей приобретает достаточную энергию для разрыва связи, он покидает пылинку. Эффективность этого процесса вычислялась неоднократно для нескольких астрофизически важных материалов, включая графит и аморфный углерод [7; 8; 58]. Вероятности выхода атома с поверхности для пылинок а-С:Н были рассчитаны в работе [59]. Было показано, что темп эрозии а-С:Н выше, чем для графитов из-за более низкой плотности и более глубокого проникновения ионов. Также было найдено, что степень ароматизации на процесс эрозии практически не влияет.

Еще один процесс — столкновение между пылинками, в результате которого происходит их дробление на меньшие фрагменты. В зависимости от скорости столкновения пылинки могут разрушаться частично или полностью, и для каждого акта столкновения необходимо рассчитывать размеры и количество получившихся фрагментов. Теоретическое описание этого процесса и его применение для ряда астрофизических объектов представлены в работах [8; 10; 58; 60]. Предполагается, что пылинка с меньшей массой налетает на пылинку с большей массой с некоторой относительной скоростью. В результате столкновения меньшая пылинка разрушается полностью, какую бы массу она ни имела. Массовая доля (m) вещества второй пылинки, по которому проходит ударная волна, порожденная столкновением, оценивается для заданной скорости столкновения и вещества пылинки по формулам из работ [10; 58]. Как и авторы этих работ, мы предполагаем, что если эта масса (m) составляет более половины от массы пылинки, то она разрушается полностью. В противном случае на мелкие пылинки дробится доля $0.4m$. Фрагменты обеих пылинок имеют степенное распределение по размерам. Для расчета параметров образовавшихся фрагментов

нужно учесть все возможные столкновения между пылинками разных размеров и разных типов.

По степени ароматизации фрагменты распределяются следующим образом: если пылинка имеет радиус менее $200 \text{ \AA}$, то есть однородна по степени ароматизации, ее фрагменты остаются в той же ячейке по E_{gap} , что и исходная пылинка. Если пылинка имеет радиус более $200 \text{ \AA}$, она состоит из двух слоев — внутреннего с исходной степенью ароматизации и внешнего, степень ароматизации которого соответствует текущей ячейке по E_{gap} . Если массовая доля разрушенного вещества меньше массовой доли внешнего слоя, фрагментам приписывается E_{gap} поверхностного слоя. В противном случае фрагменты распределяются по ячейкам с E_{gap} для внутреннего и внешнего слоев в предположении, что внешний слой разрушается полностью, а оставшиеся фрагменты имеют E_{gap} внутреннего слоя.

1.2.2 Реструктуризация

Мелкие пылинки и макромолекулы подвергаются существенному воздействию фотонов с энергией $E > 3 \text{ эВ}$, то есть фотонов УФ-диапазона. Поглощение такого фотона пылинкой может привести к нескольким результатам — диссоциации, излучению и ионизации. Вероятность реализации каждого из этих процессов связана с его энергией активации, энергией фотона, размером и веществом пылинки. В общем виде темп любого фотопроцесса, происходящего на пылинке с радиусом a под действием поля излучения $F(E)$, можно представить как

$$R(a) = \int_0^{\infty} Y(a, E) C_{\text{abs}}(a, E) F(E) dE \quad (1.6)$$

Здесь $F(E)$ — поток излучения, выраженный через количество фотонов с энергией E , Y — вероятность протекания (выход) процесса при поглощении фотона с энергией E , $C_{\text{abs}}(a, E)$ — сечение поглощения пылинки. В расчетах мы используем оптические свойства а-С:Н, вычисленные в серии работ [39–41]. Выражение (1.6) используется для учета вклада фотопроцессов. Вероятности разрыва связей С-Н и фотоионизации известны из экспериментов и теоретических расчетов.

Вероятности других процессов можно найти, если известны константы скорости всех возможных процессов, в данном случае, процессов излучения, ионизации и разрыва связей C-C.

При моделировании фотодиссоциации мы придерживаемся общей схемы, представленной в работе [5] для ПАУ, расширив ее на пылинки а-С:Н. В этой схеме процесс частичного разрушения пылинки а-С:Н разделяется на два этапа. На первом этапе основным каналом является потеря атомов водорода (дегидрогенизация). Освободившиеся после потери водорода связи соседних атомов углерода образуют новую связь, постепенно формируя замкнутые кольца: структура пылинки переходит из алифатического в ароматическое состояние [61]. Лабораторные исследования этого процесса представлены в работах [62; 63], а теоретические расчеты его темпа описаны в [64; 65].

В качестве начальных характеристик пылинки для каждого интервала по массе задается значение N_C , соответствующее средней массе для данной ячейки, и $E_{\text{gap}} = 2.67$ эВ.

Для оценки числа атомов водорода в пылинке используется линейное соотношение $E_{\text{gap}} = 4.3 X_H$, где X_H — доля связей C-H.

На первом этапе эволюции основным каналом диссоциации является отделение атомов водорода. Сечение этой реакции неоднократно измерено в экспериментах [62] для энергии излучения в диапазоне от ~ 6 до ~ 22 эВ и варьируется от 10^{-21} см $^{-2}$ до $1.5 \cdot 10^{-19}$ см $^{-2}$. Для всех фотонов с энергией в диапазоне от 10 до 13.6 эВ мы используем среднее значение 10^{-20} см $^{-2}$ [40] и полагаем сечение нулевым вне этого диапазона. Вероятность диссоциации составляет около 0.1 [42].

В модели предполагается, что число разрушенных связей ограничено глубиной проникновения фотона внутрь пылинки. Максимальная глубина проникновения считается равной 200 Å для всех пылинок независимо от энергии фотона [40]. Это означает, что мелкие пылинки ароматизируются во всем объеме, тогда как пылинки радиусом больше 200 Å ароматизируются только в поверхностном слое. Когда доля атомов водорода становится меньше 5%, начинается второй этап эволюции, на котором включается другой канал диссоциации [66] — отделение группы C $_2$. В работе [5] предполагается, что от макромолекулы ПАУ при фотодиссоциации отделяется молекула ацетилена, но от полностью дегидрогенизованных пылинок отделяться будет, скорее, C $_2$. Фактически, разрушение за

счет отделения C_2 эффективно только для мелких пылинок или макромолекул. В частности, в работах [4; 5] показано, что второй этап играет существенную роль только для макромолекул с числом атомов менее 50. Для более крупных пылинок основным каналом диссоциации является отсоединение атома водорода [67]. Значение доли атомов водорода, необходимое для начала второго этапа, у них не достигается. Для вычисления скорости отделения атома или группы атомов на первом этапе мы, как и в работе [5], используем приближение теории RRK (Rice-Ramsperger-Kassel) [68], адаптированное для ПАУ в работе [4]. В этом приближении предполагается, что скорость отделения элемента из макромолекулы с количеством атомов N_{atom} связана с ее внутренней энергией E_{int} следующим образом:

$$k_{\text{loss}} = k_0(1 - E_0/E_{\text{int}})^{3N_{\text{atom}}-7} \quad (1.7)$$

с константами $k_0 = (10^{16}, 10^{16}, 10^{15})\text{с}^{-1}$ для H , H_2 , C_2 , соответственно. Предполагается, что внутренняя энергия пылинки E_{int} , равна энергии поглощенного фотона E . В отличие от работ [4; 5], где рассматривались области неионизованного водорода с $E < 13.6$ эВ, мы экстраполируем это выражение для более высоких энергий. Значение параметра E_0 для нескольких мелких ПАУ было получено экспериментально [4], однако авторы работы [55] показали, что для смеси межзвездных ПАУ экспериментальное значение не совсем корректно, и в своих расчетах рассмотрели несколько значений E_q . В нашей модели эта величина также принимается в качестве параметра.

1.3 Эволюция пыли в зонах ионизованного водорода и остатках сверхновых

Далее мы описываем модель разрушения для ансамбля пылевых частиц. Полученные результаты вычислений объединяются в общую зависимость темпа разрушения пыли от заданной температуры и скорости столкновений с частицами газа. Затем описывается модель реструктуризации пылевых частиц, и приводятся результаты, применимые к областям ионизованного водорода.

1.3.1 Временные шкалы разрушения пыли

В нашей модели ансамбль пылевых частиц в начальный момент времени характеризуется заданным распределением по размерам, в качестве которого было взято распределение из работы [15]. Для описания эволюции пыли под воздействием процессов, характерных для МЗС в зонах НII и остатках сверхновых были проведены расчеты в программе **Shiva**, где вырыировались следующие параметры: N — концентрация газа ($0.1 \div 10^4 \text{ см}^{-3}$), T — температура газа ($10^4 \div 10^6 \text{ K}$), v_{gas} — скорость нетепловых столкновений с частицами газа ($1 \div 10^3 \text{ км/с}$), U — поле излучения ($10^3 \div 10^8$ в единицах интенсивности поля излучения в солнечной окрестности). Признаки протекания этих процессов можно увидеть в ИК-спектрах областей звездообразования.

Рассчитаны характерные времена разрушения и эволюция распределения пылинок по размерам для сетки варьируемых параметров. Под характерным временем разрушения понимается время, за которое масса пыли уменьшается в e раз по сравнению с массой в начальный момент времени. Следует отметить тот факт, что разрушению за счет действия поля излучения подвержены только самые мелкие пылинки ($\sim 5 \text{ \AA}$). То есть параметр U не оказывает существенного влияния на разрушение ансамбля пылевых частиц. Для расчетов характерных времен разрушения пыли было взято значение $U = 10^5$.

На рис. 1.3 показано, как меняется распределение пылинок по размерам за 1000 лет при температуре $T = 10^5 \text{ K}$, скорости столкновений с частицами газа 100 км/с , концентрации газа 1 см^{-3} . Такие условия характерны для остатков сверхновых. Из графика видно, что эффективнее всего идет разрушение мелкой пыли, в то время как пыль средних и крупных размеров не подвергается разрушению в заданных физических условиях.

На рис. 1.4 показано, как меняется распределение пылинок по размерам за 1000 лет при температуре $T = 10^4 \text{ K}$, скорости столкновений с частицами газа 1 км/с , концентрации газа 100 см^{-3} . Такие условия характерны для зон ионизованного водорода. Из графика видно, что эффективнее всего идет разрушение пыли средних размеров, которая превращается в небольшие фрагменты, пополняя таким образом содержание мелких пылинок, а самая крупная в таких условиях практически не подвергается разрушению.

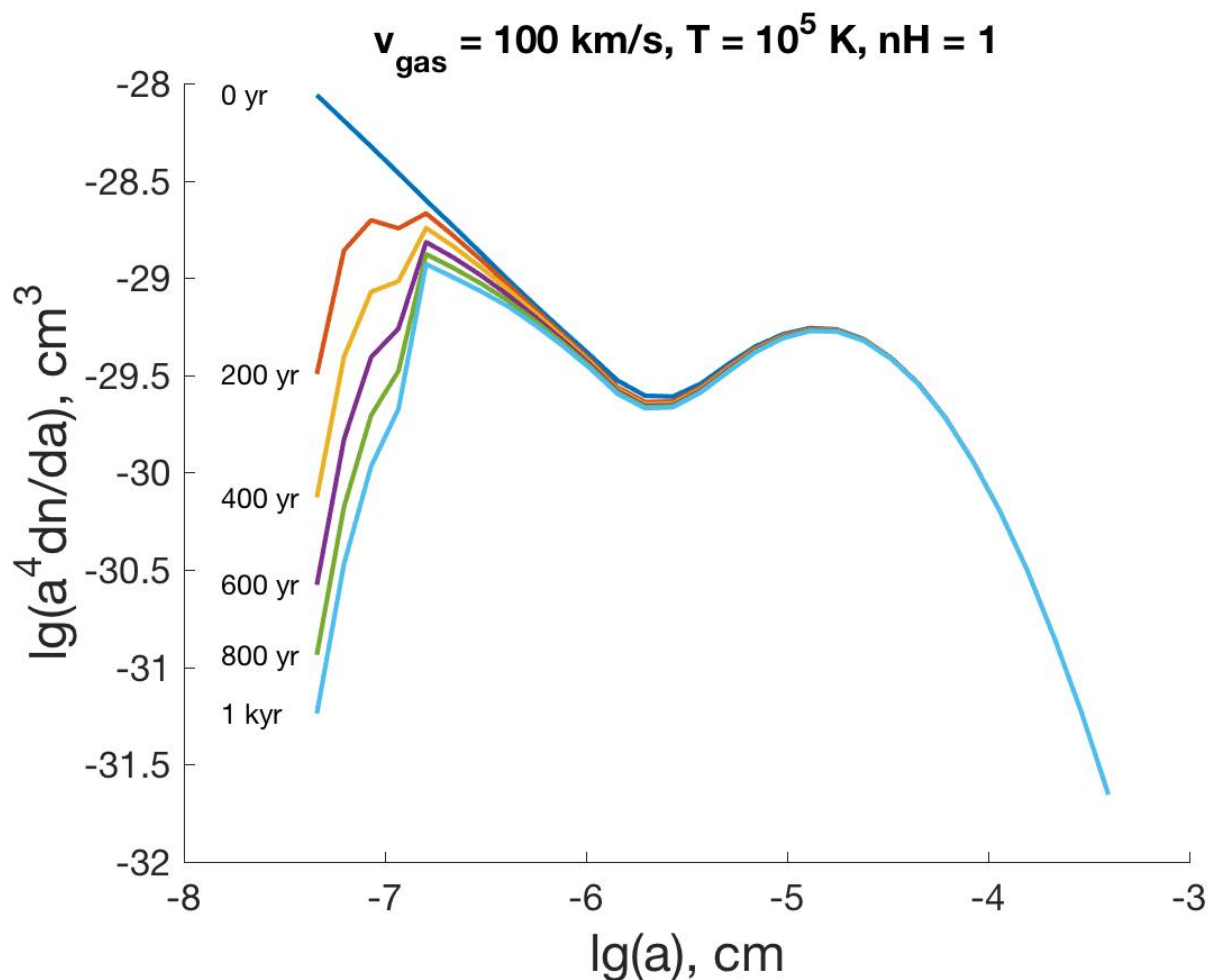


Рисунок 1.3 — Эволюция распределения пылинок по размерам при температуре $T = 10^5 \text{ K}$, скорости столкновений с частицами газа 100 км/с , концентрации газа 1 см^{-3} .

Из приведенных зависимостей (а также других расчетов) можно сделать вывод о том, что на разрушение мелкой пыли сильнее всего влияют столкновения с частицами газа, тогда как более крупные пылинки разрушаются за счет столкновений друг с другом и, в том числе, с мелкими пылинками. Именно мелкая пыль ответственна за разрушение крупных частиц, поскольку, вообще говоря, составляет основную массу пыли.

Суммируя содержание пыли каждого размера на каждом временном шаге, мы получим эволюционную кривую общей массовой концентрации пыли. При исследовании вида зависимости изменения массы пыли во времени оказалось, что полученная кривая лучше всего описывается не экспонентой, как могло бы показаться на первый взгляд, а суммой двух экспонент (рис. 1.5).

Иными словами, изменение массы пыли можно представить в виде суммы двух экспоненциальных процессов, один из которых является определяющим в

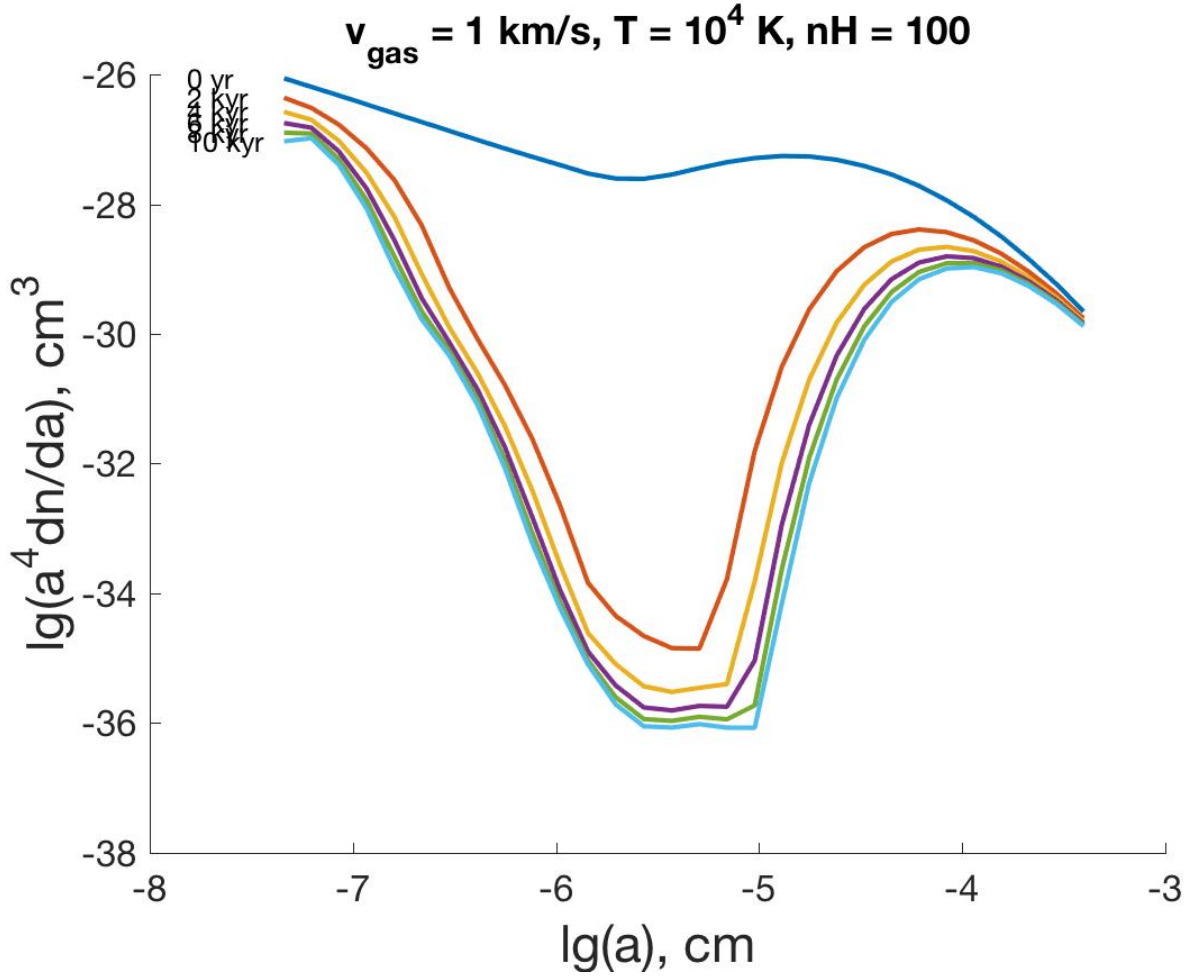


Рисунок 1.4 — Эволюция распределения пылинок по размерам при температуре $T = 10^4$ К, скорости столкновений с частицами газа 1 км/с, концентрации газа 100 см^{-3} .

разрушении (рис. 1.6), и записать уравнение этой зависимости:

$$n_m = a \cdot e^{b \cdot t} + c \cdot e^{d \cdot t}, \quad (1.8)$$

где a , b , c , d — некоторые постоянные, а t — время. Вид каждой из двух экспонент показан на примере случая $v_{\text{gas}} = 100$ км/с, $T = 10^5$ К, $N = 1 \text{ см}^{-3}$. Расчетное время — 1000 лет.

Можно предположить, что каждая экспонента отражает эволюцию отдельного вида пылинок (ПАУ, мелкой, средней, крупной пыли). На рис. 1.7 показаны зависимости изменения массы отдельных видов пыли от времени для такого же случая ($v_{\text{gas}} = 100$ км/с, $T = 10^5$ К, $N = 1 \text{ см}^{-3}$). В данном случае отдельная кривая представляет эволюцию ПАУ, а другая кривая показывает эволюцию всей более крупной пыли.

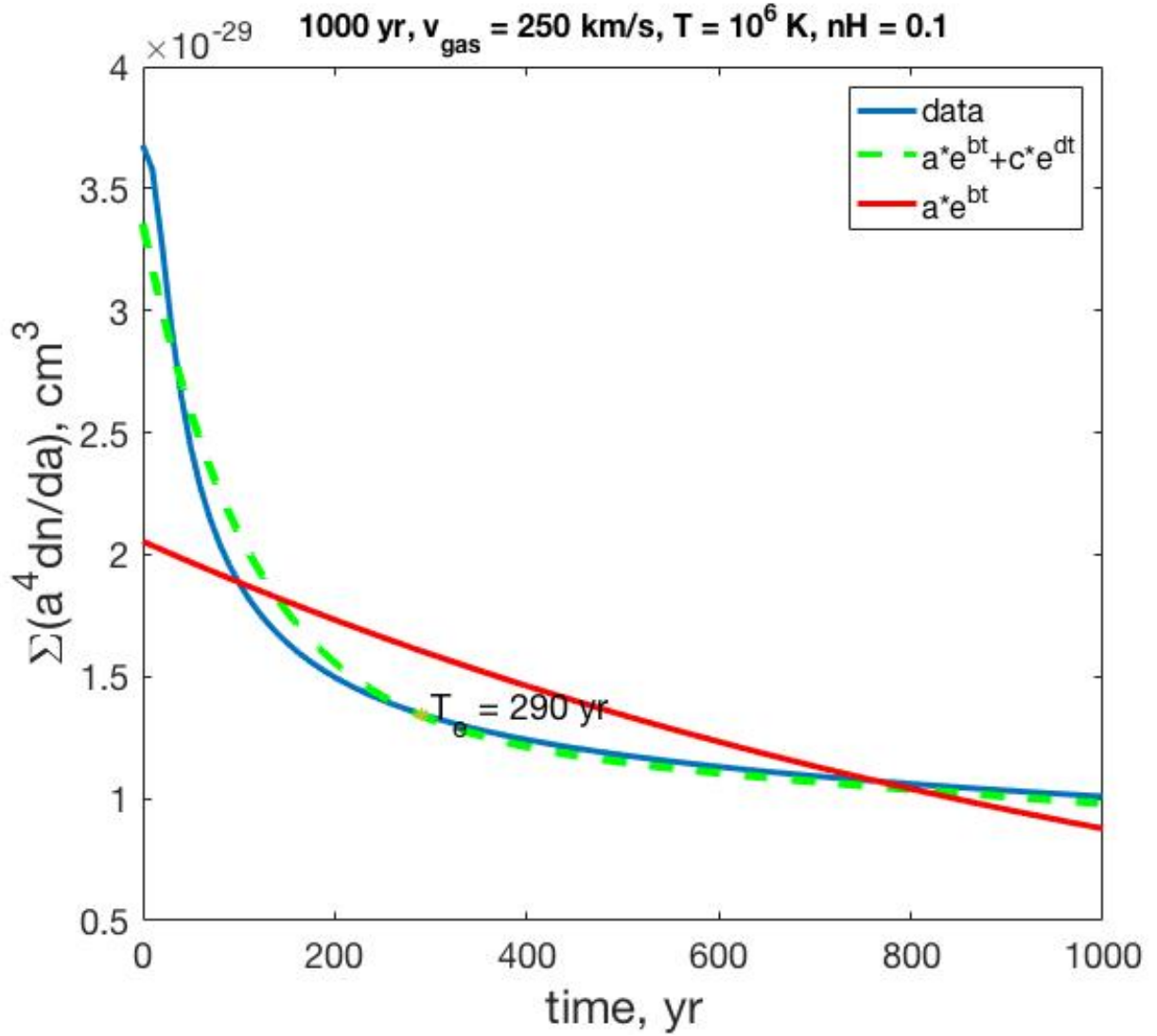


Рисунок 1.5 — Разрушение ансамбля пылевых частиц. Зависимость общей массы пыли от времени.

Нами исследована зависимость показателя степени b определяющей экспоненты от концентрации пыли. Показано, что эта зависимость является линейной для каждой отдельной температуры и скорости движения газа с коэффициентом 10^{t_1} , где t_1 — время разрушения массы пыли в e раз для единичной начальной концентрации пыли (рис. А.1). То есть, темп разрушения пыли нормируется концентрацией частиц, что выглядит вполне логичным, поскольку чем выше содержание частиц, тем чаще происходят столкновения и быстрее идет разрушение пылинок. Таким образом, характерное время разрушения пыли при одинаковых значениях температуры и скорости движения газа для разных концентраций определяется из пропорциональности произведения

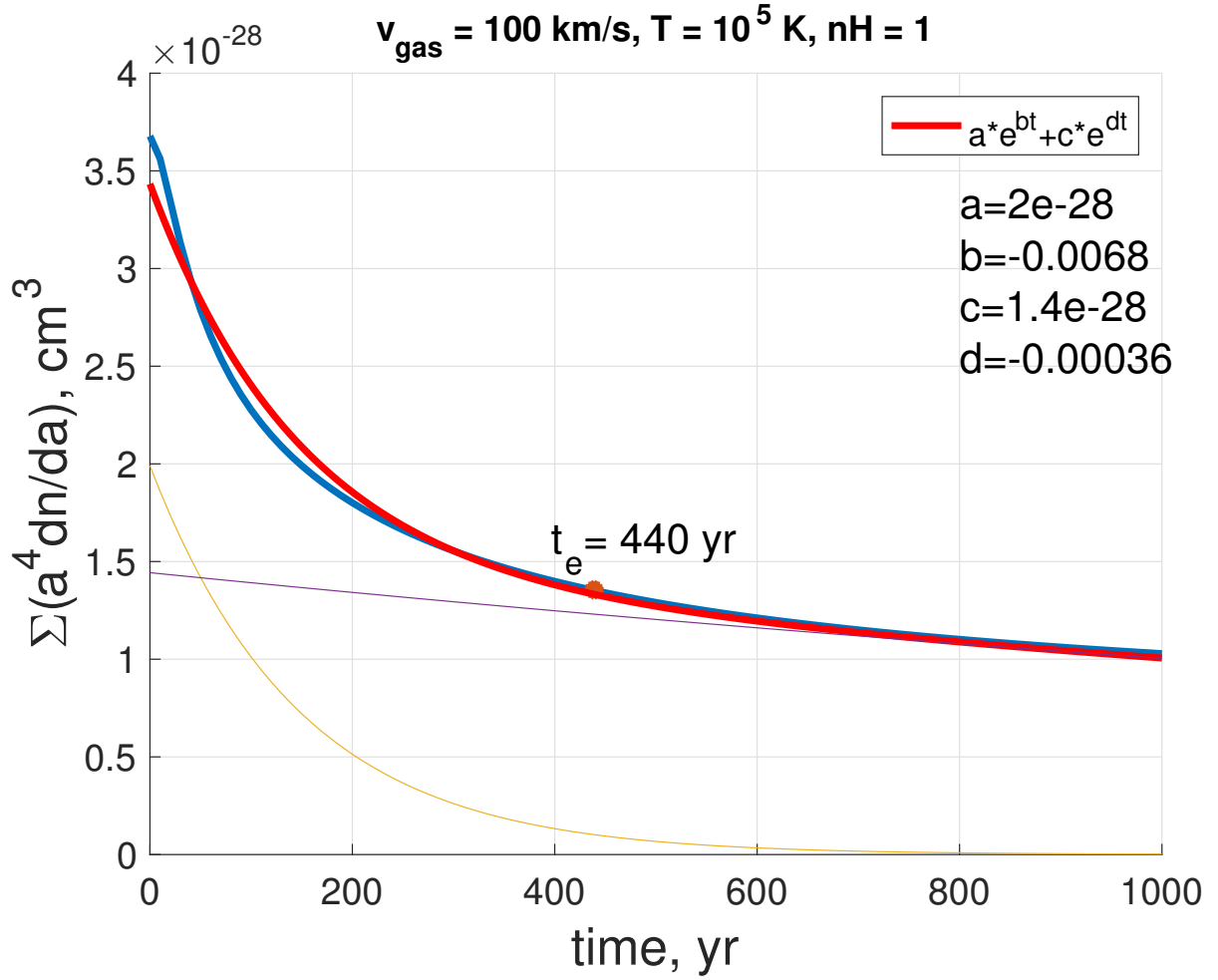


Рисунок 1.6 — Изменение массы пылевого ансамбля. t_e — характерное время разрушения.

времени и концентрации:

$$n_H t_n(v, T) = n_1 t_1(v, T)$$

, где n_H — концентрация ионов H^+ , $n_1 = 1 \text{ cm}^{-3}$.

Два основных процесса, в результате действия которых происходит разрушение пыли — это, как было сказано выше, столкновения частиц друг с другом (дробление) и с частицами газа. С помощью кода **Shiva** можно проанализировать вклад каждого из этих процессов в разрушение пыли. На рис. 1.8, 1.9 представлена эволюция отдельных видов пылинок: ПАУ ($\sim 5 \text{ \AA}$), мелкая ($10 \div 100 \text{ \AA}$), средняя ($100 \div 1000 \text{ \AA}$), крупная ($\geq 1000 \text{ \AA}$) за 10 тыс. лет в результате действия только дробления (а) или только столкновений пылинок с частицами газа (б).

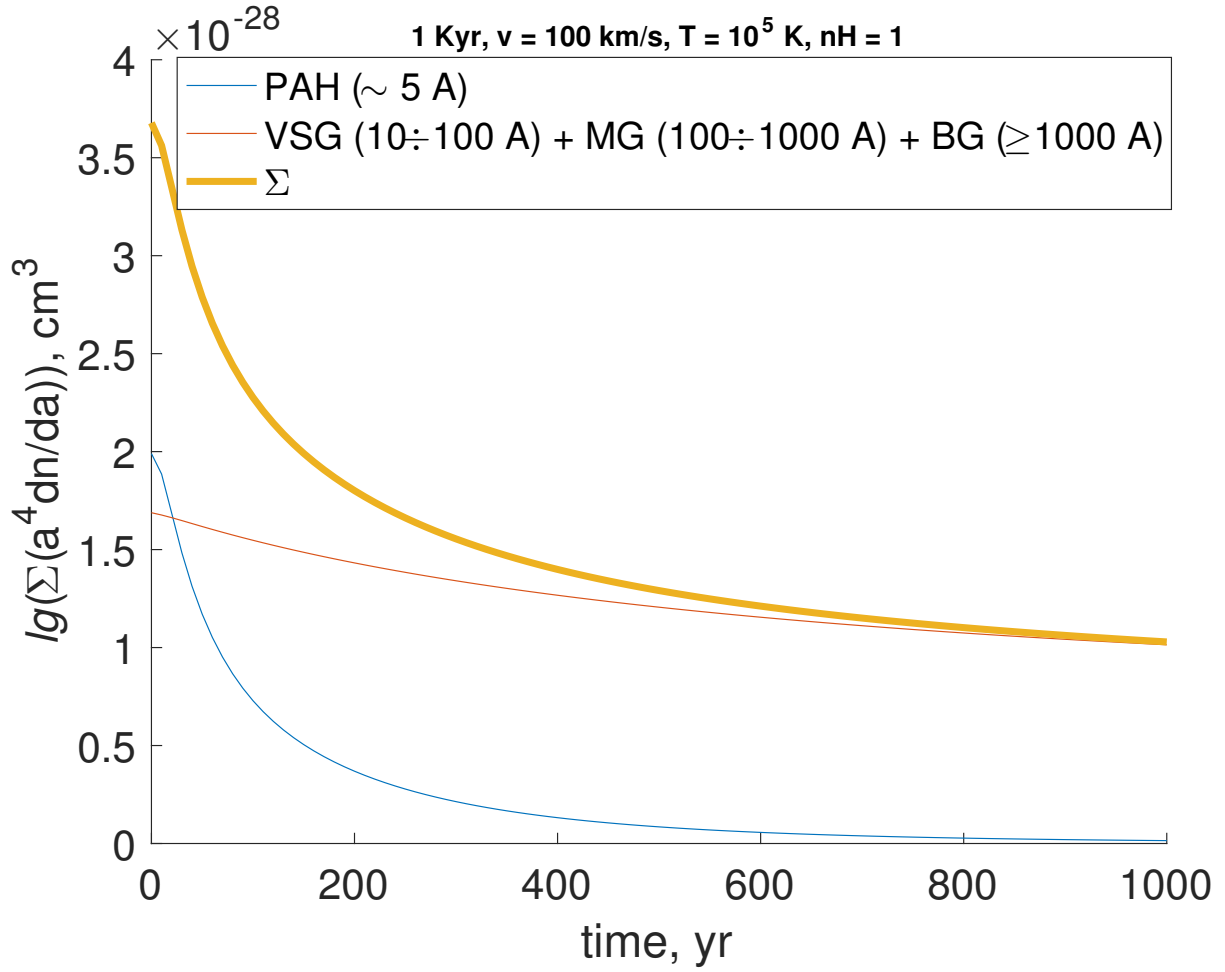


Рисунок 1.7 — Изменение массы пылевого ансамбля и отдельных видов пылинок.

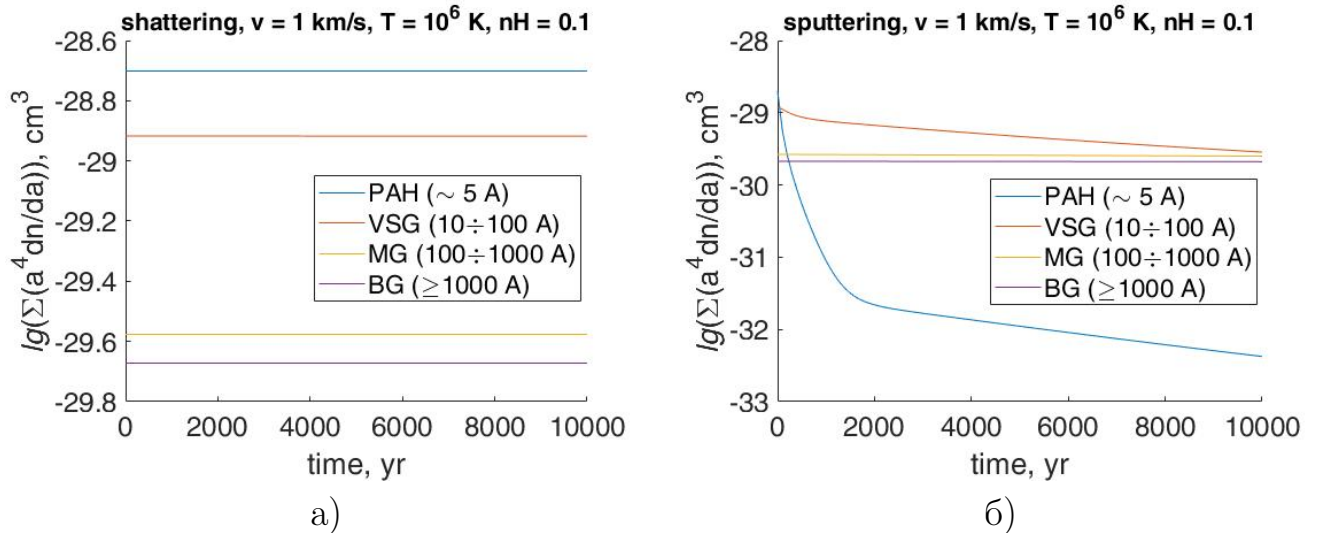


Рисунок 1.8 — Разрушение пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 1$ км/с, $T = 10^6$ К, $N = 0.1$ см $^{-3}$ а) за счет дробления, б) за счет столкновений с частицами газа.

В расчетах для других физических условий наблюдается схожая картина соотношения действий дробления и разрушения пылинок за счет столкновений с частицами газа.

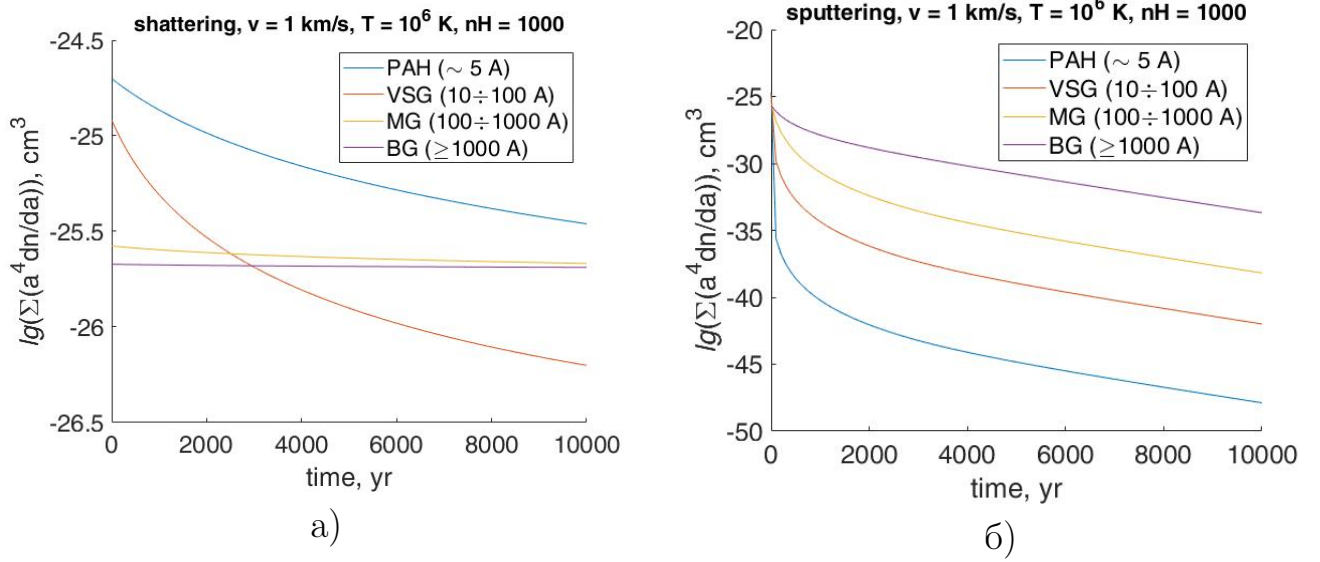


Рисунок 1.9 — Разрушение пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 1$ км/с, $T = 10^6$ К, $N = 1000$ см $^{-3}$ а) за счет дробления, б) за счет столкновений с частицами газа

Поскольку разрушение различных видов пылинок происходит по-разному, немаловажным представляется определение характерных времен разрушения для каждого вида отдельно. Можно построить зависимость темпа разрушения пыли от заданной температуры и скорости как для всей массы пыли (рис. 1.10), так и для отдельных видов пылинок: ПАУ (рис. 1.11), мелкой, средней и крупной пыли (рис. 1.12).

Из приведенных графиков видно, что разрушение крупной пыли идет на порядок медленнее, чем разрушение ПАУ. При этом нельзя забывать, что за счет разрушения крупных частиц идет непрерывное пополнение ансамбля пылевых частиц мелкими пылинками.

Некоторые точки из сетки параметров температуры и скорости движения газа могут не соответствовать реальным физическим условиям, но все же являются важными для понимания влияния каждого параметра на эволюцию пылевого ансамбля или отдельного вида пылинок.

Результаты вычислений показывают качественное согласие с наблюдениями разрушения пыли в остатках сверхновых [69; 70]. В работе [69] представлены наблюдения, полученные на телескопе «Спитцер», области прохождения ударной волны в остатке сверхновой в созвездии Лебедя. Расстояние до этого объекта составляет 540 пк; скорость ударной волны ≈ 250 км/с. Из представленных авторами данных можно вычислить примерное время разрушения пыли: ~ 500 лет. На рис. 1.13 показан результат расчета соответствующих усло-

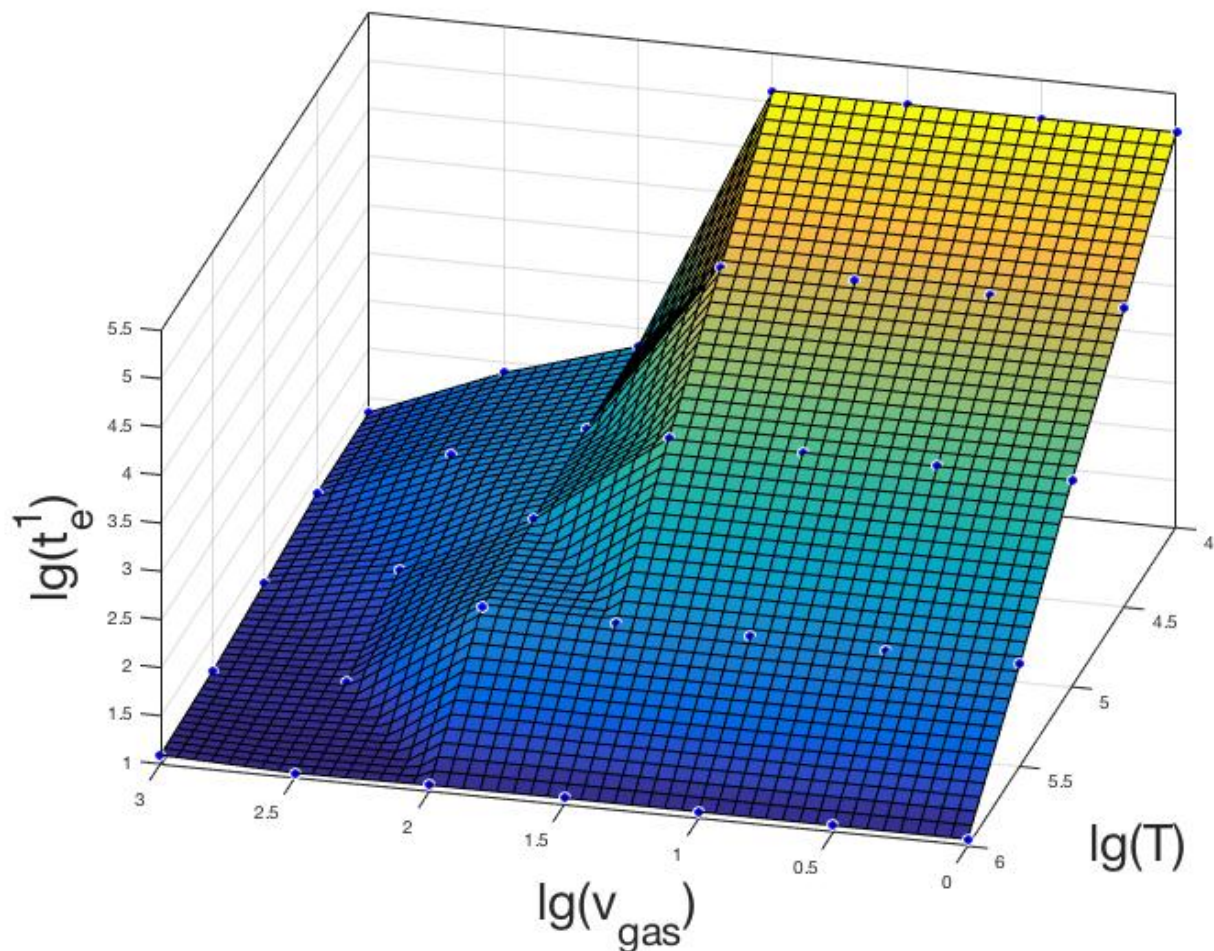


Рисунок 1.10 — Зависимость темпа разрушения пыли от температуры и скорости столкновений с частицами газа.

вий в программе **Shiva**. Из графика следует, что уменьшение массы пылевого ансамбля в e раз для заданных условий произойдет за 900 лет, но, учитывая что в наблюдениях разрушение происходит, вероятно, менее чем в e раз, то время, полученное нами в расчетах, оказывается того же порядка величины, что и оцененное по рисункам из наблюдений. На рис. 1.14 показано изменение распределения пылинок по размерам для тех же условий.

Авторами работы [69] показано, что отношение потоков на 70 мкм (соответствующий более крупной пыли) к 24 мкм возрастает примерно с 14 позади фронта ударной волны до 22 в зоне распространения, и далее пылинки разрушаются в горячей плазме. Из графика, показанного на рис. 1.14 видно, что в наших расчетах отношение содержания крупной пыли к средней и мелкой также увеличивается, что соответствует выводам статьи [69].

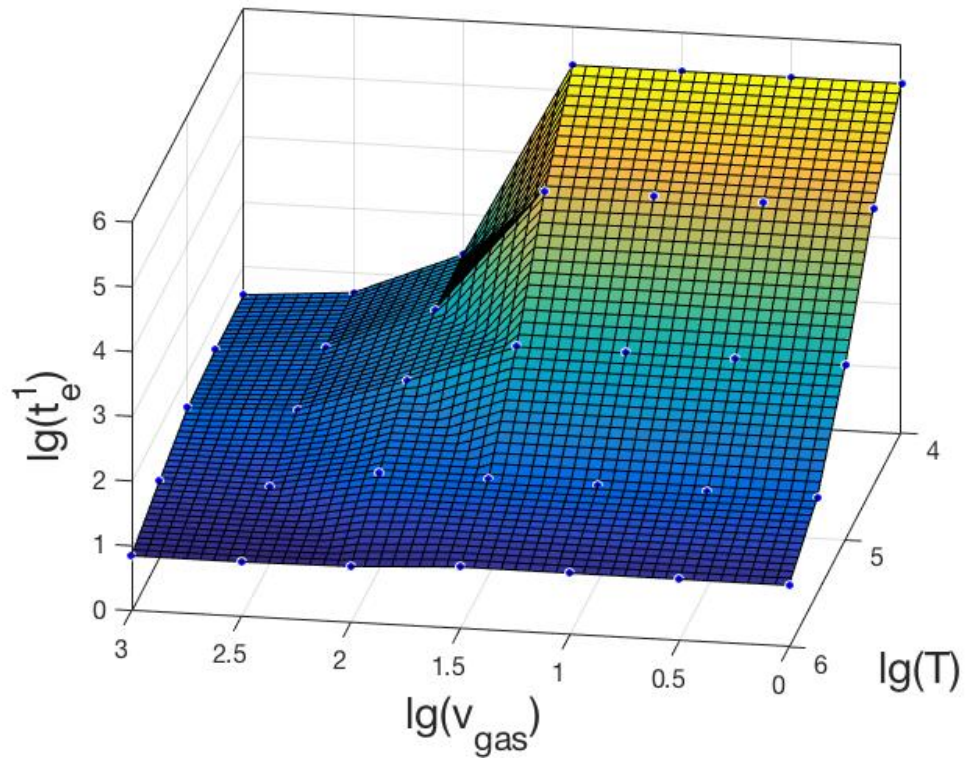


Рисунок 1.11 — Зависимость темпа разрушения ПАУ от температуры и скорости столкновений с частицами газа.

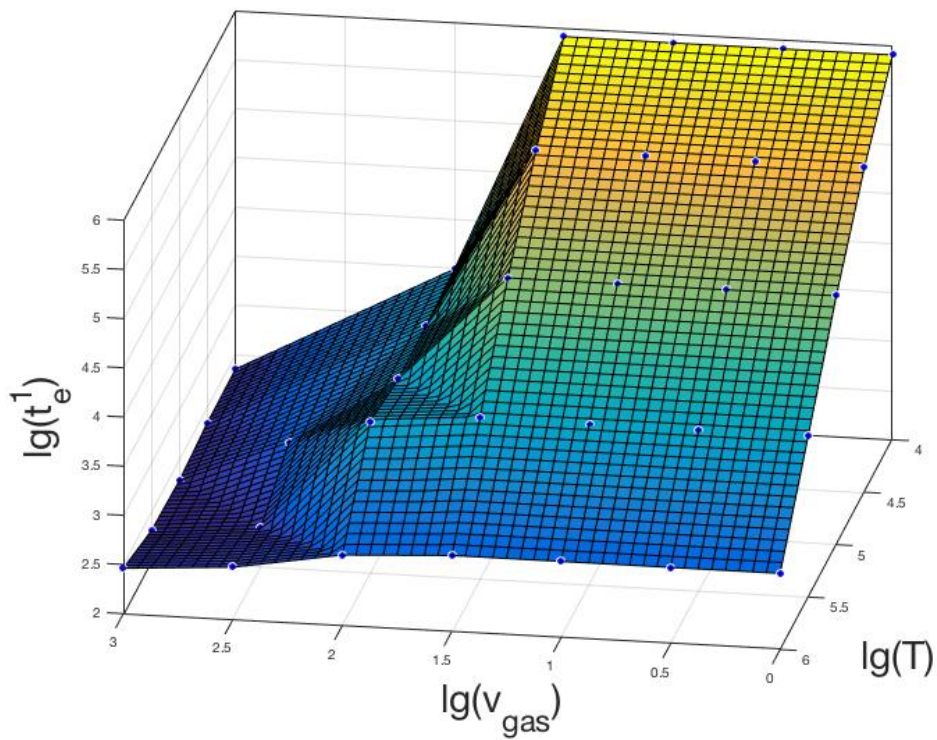


Рисунок 1.12 — Зависимость темпа разрушения крупной пыли от температуры и скорости столкновений с частицами газа.

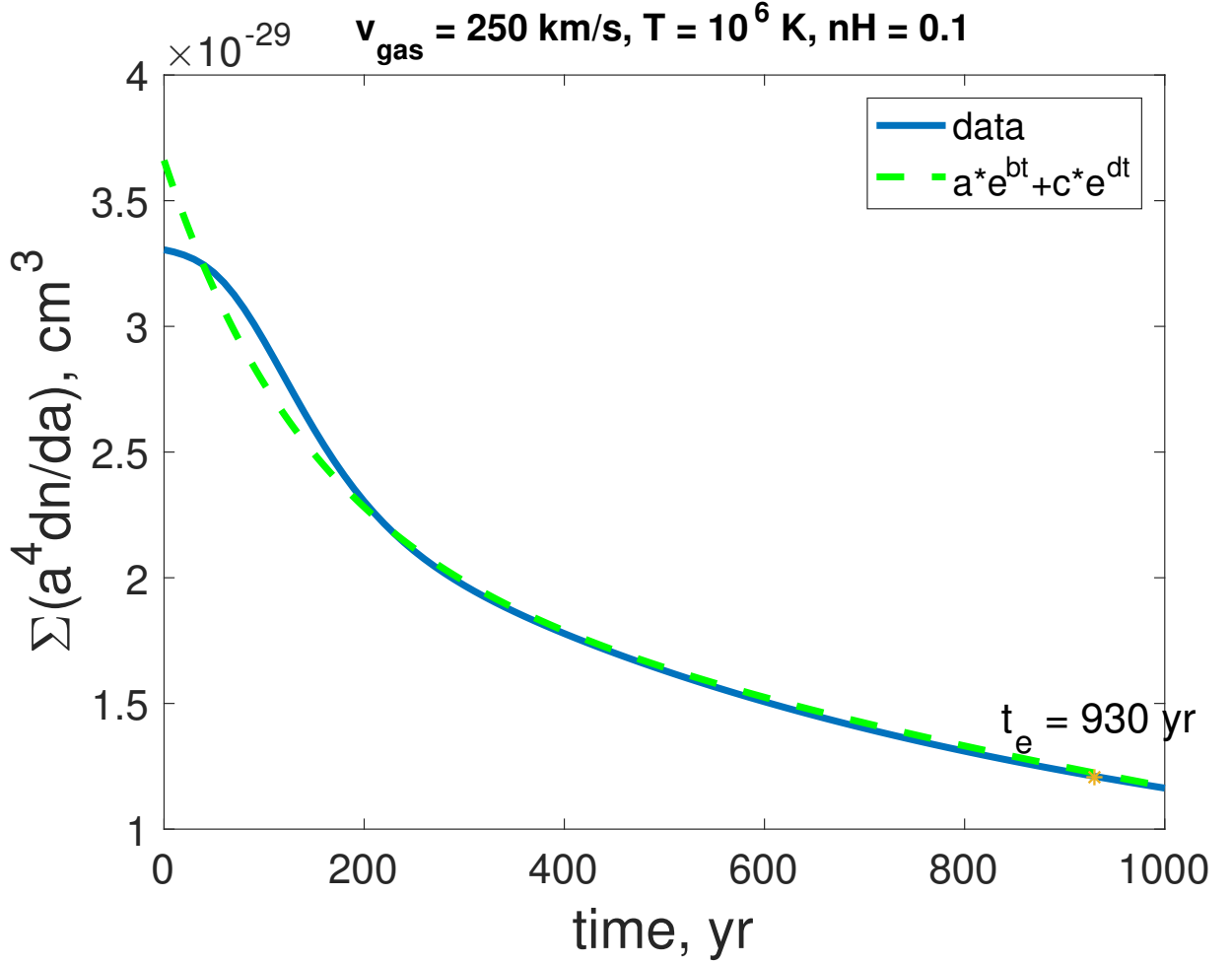


Рисунок 1.13 — Зависимость массы пыли от времени для условий, соответствующих остатку сверхновой в созвездии Лебедя.

1.3.2 Временные шкалы реструктуризации пылинок

Для проверки модели также представляется возможным сравнить результаты расчетов с наблюдениями пылевых структур вокруг массивных звезд. В этих условиях значимыми являются процессы фоторазрушения и эрозии частицами газа, которые, помимо разрушения углеродной решетки, ведут к ароматизации.

Современные наблюдательные данные указывают на сложную морфологию ИК-излучения вокруг массивных звезд [71]. Проявлением такой сложной морфологии является кольцообразное пространственное распределение интенсивности излучения. Как правило, наблюдаются внутреннее и внешнее кольца на 24 мкм, в то время как на 8 мкм, а также на длинах волн 100–500 мкм, наблюдается только внешнее кольцо. В диссертационной работе представлена

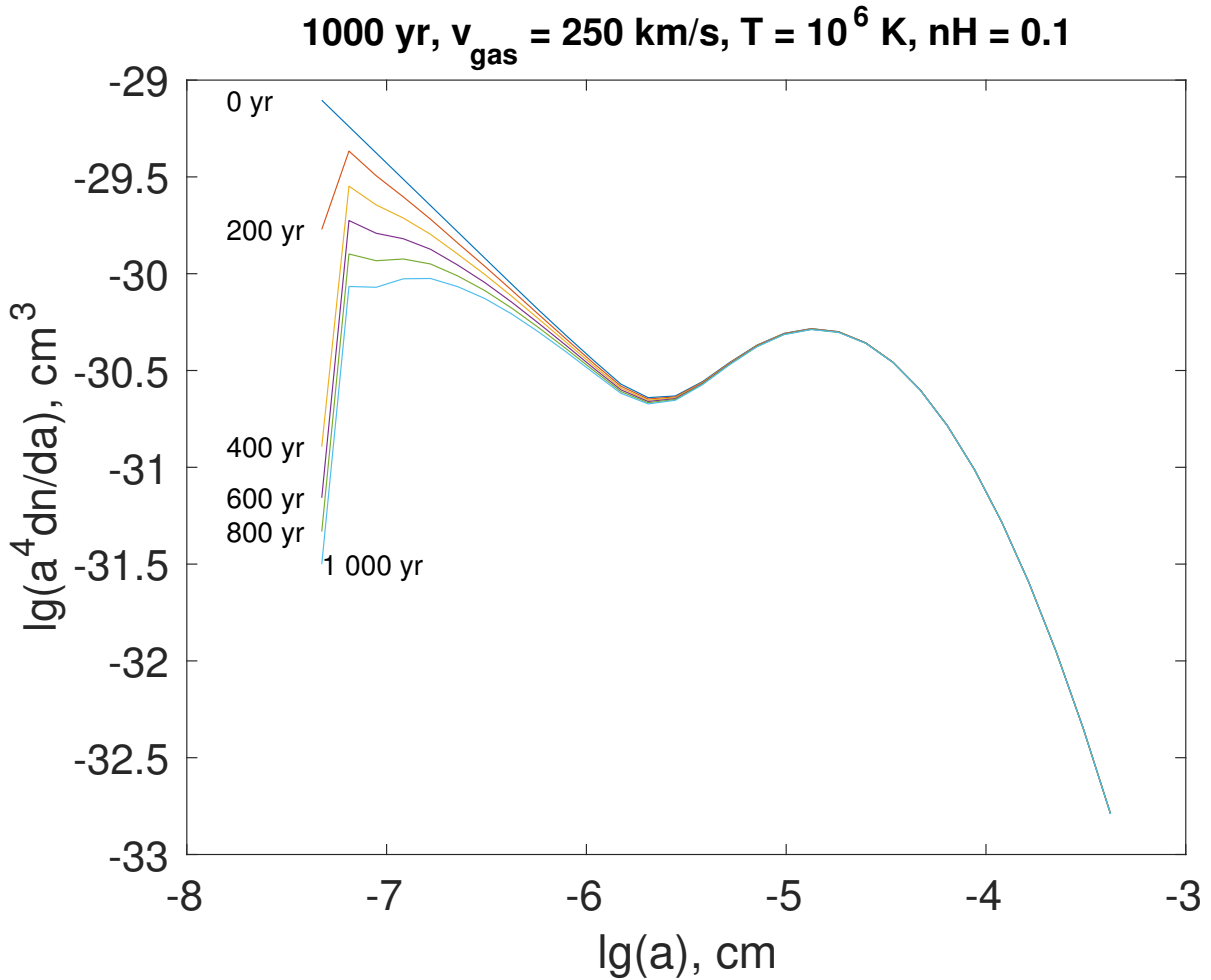


Рисунок 1.14 — Зависимость распределения пыли по размерам от времени для условий, соответствующих остатку сверхновой в созвездии Лебедя.

попытка объяснить характер распределения интенсивности на разных длинах волн вблизи массивных звезд на основе модели эволюции пыли.

Для объяснения образования кольцеобразной морфологии излучения пыли вблизи массивных звезд рассматриваются несколько механизмов: разрушение пыли [72], дрейф пыли [73], звездный ветер, очищающий внутреннюю зону области ионизованного водорода (HII) [74], действие давления излучения, приводящее к неоднородному распределению плотности газа и пыли в области HII [75]. Несмотря на такое обилие предлагаемых сценариев, до сих пор остается открытым вопрос о причине пространственной неоднородности пылевых частиц в области HII (под областью HII мы подразумеваем объект, внутри которого находится зона ионизированного водорода, а снаружи — зоны нейтрального и молекулярного водорода). В перечисленных подходах считается, что углистые пылинки состоят из графита и игнорируется то, что пылинка может менять свои свойства. Однако наиболее вероятно вещество углистых пылинок

изначально имеет неупорядоченную аморфную структуру, насыщенную водородом. Эта структура меняется в условиях мощного УФ поля излучения за счет диссоциации наименее прочных алифатических связей C–H, и становится упорядоченной [15]. Основными элементами структуры становятся ароматические кольца, объединяющие атомы углерода, тогда как атомов водорода становится очень мало. В частном случае, при малых размерах пылинок, из аморфного гидрогенизированного углерода могут образовываться молекулы ПАУ. Такой процесс мы будем называть ароматизацией. Этот процесс также может происходить при столкновениях с частицами газа в результате выбивания атомов водорода. Далее пылинки в аморфном гидрогенизированном состоянии мы будем обозначать a-C:H, в дегидрогенизированном — a-C.

Необходимые характеристики среды, а именно скорости движения пылинок и газа, интенсивность УФ поля излучения, были взяты из расчетов, выполненных в работе [73]. Распределение пыли по размерам взято из работы [15], из которого следует, что основную массу пыли составляют мелкие пылинки. Предполагается, что в начальный момент времени все пылевые частицы имеют аморфную гидрогенизированную структуру, без бензольных колец. Модельное время расчета эволюции пыли составляет 100 тыс. лет.

На рис. 1.15–1.18 показаны радиальные распределения концентрации пылинок a-C:H и a-C с радиусами, соответственно, 5 Å, 9 Å, 100 Å и 2500 Å на моменты времени 0, 10 тыс. лет и 100 тыс. лет. Эти графики указывают, что вблизи звезды происходит быстрое разрушение пылевых частиц любых размеров. Из рис. 1.15 видно, что мелкие частицы через 100 тыс. лет выживают только на краю области — на расстоянии около 2 пк от звезды, при этом такие пылинки переходят в ароматизированное состояние. Для пылинок более крупного размера (рис. 1.16) область, в которой пылинки выживают, простирается от 1 до 2 пк. Из рис. 1.17 и 1.18 следует, что крупные частицы разрушаются только в непосредственной близости к центральной звезде. Таким образом, предполагается, что область, в которой может наблюдаться присутствие крупных пылевых частиц, должна быть намного шире области, занимаемой мелкими пылинками, и простирается в пределах от 0.5 до 2 пк. По результатам, проиллюстрированным на рисунках, можно сделать вывод, что уже за время 10 тыс. лет все пылевые частицы практически полностью переходят в ароматизированное состояние, а затем начинают претерпевать разрушение, которое идет тем быстрее, чем бли-

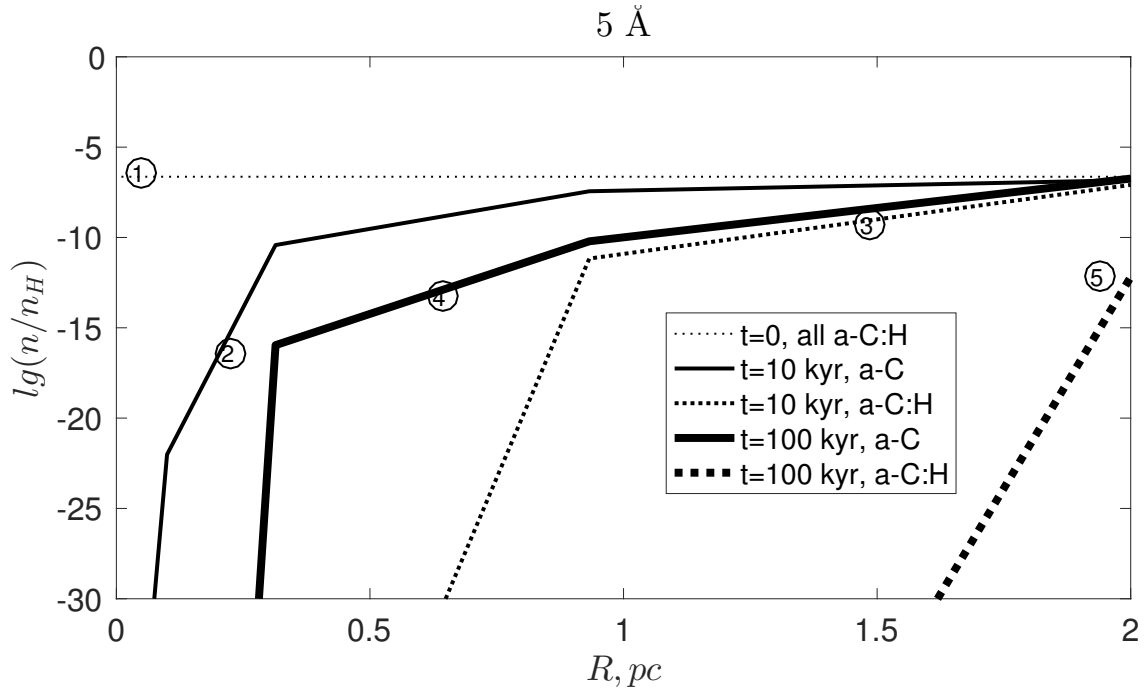


Рисунок 1.15 — Радиальное распределение концентрации пылинок а-С:Н и а-С с радиусом 5 Å для различных моментов времени. 1 — начальное распределение пыли (все пылинки гидрогенизированны); 2 — распределение пылинок а-С через 10 тыс. лет; 3 — распределение пылинок а-С:Н через 10 тыс. лет; 4 — распределение пылинок а-С через 100 тыс. лет; 5 — распределение пылинок а-С через 100 тыс. лет.

же частицы находятся к центральной звезде. На рис. 1.17 полностью отсутствуют кривые, соответствующие пространственному распределению пылинок а-С:Н через 10 и 100 тыс. лет, поскольку их содержание становится близким к нулю и выходит за пределы области построения графика. То есть, за это время все пылинки а-С:Н претерпели структурные изменения, став дегидрогенизированными пылинками а-С. Для пылинок с радиусами 5 Å и 9 Å переход в аморатизированное состояние может означать, что они преобразовались в ПАУ.

Показано, что за время меньше 10 тыс. лет происходит разрушение мелких пылевых частиц вблизи звезды. На краю области НII как мелкие, так и крупные пылинки переходят в ароматизированное состояние за расчетное время 100 тыс. лет. Внутри области не происходит разрушения крупных частиц, по крайней мере, за времена порядка 100 тыс. лет. Полученные результаты можно использовать для интерпретации наблюдений областей НII [76], где видны кольцеобразные структуры, окружающие ионизирующий источник. В частности, модель предсказывает отсутствие излучения на 8 мкм вблизи звезды и

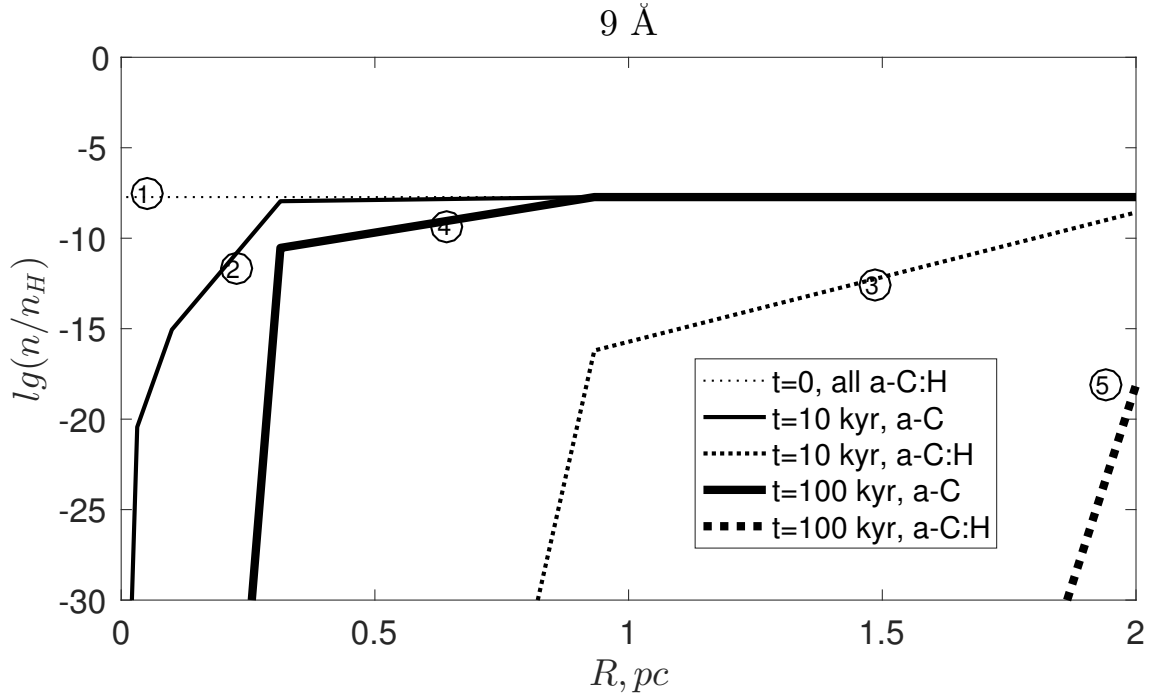


Рисунок 1.16 — То же, что на рис. 1.15 для пылинок с радиусом 9 Å.

наличие внешнего кольца. В то же время в рамках данной модели можно ожидать наличие внутреннего кольца на 24 мкм, что связано с выживанием более крупных пылинок в области НII. Объяснить внешнее кольцо, наблюдаемое в длинноволновой области, в рамках данной модели не удастся, то есть для крупной пыли требуются дополнительные механизмы, ведущие к ее отсутствию во внутренних зонах областей НII.

Можно представить темп ароматизации как время, за которое отношение содержания пылинок, имеющих наименьшее значение E_{gap} , к содержанию пылинок с наибольшим E_{gap} принимает максимальное значение.

На рис. 1.19 (а) показано, как меняется содержание пяти значений степени ароматизации частиц за 1000 лет при $v_{\text{gas}} = 100$ км/с, $T = 10^6$ К, $N = 0.1$ см $^{-3}$. На рис. 1.19 (б) для таких же физических условий показано, как меняется во времени отношение содержания частиц с наибольшей степенью ароматизации (шириной запрещенной зоны $E_{\text{gap}} = 0.357$) к содержанию частиц с наименьшей шириной запрещенной зоны ($E_{\text{gap}} = 2.413$), то есть «ароматических» к «алифатическим». Времена расчетов соответствовали характерным временам разрушения пыли для выбранных условий.

Представляет интерес дальнейшее сравнение полученных результатов с наблюдательными данными.

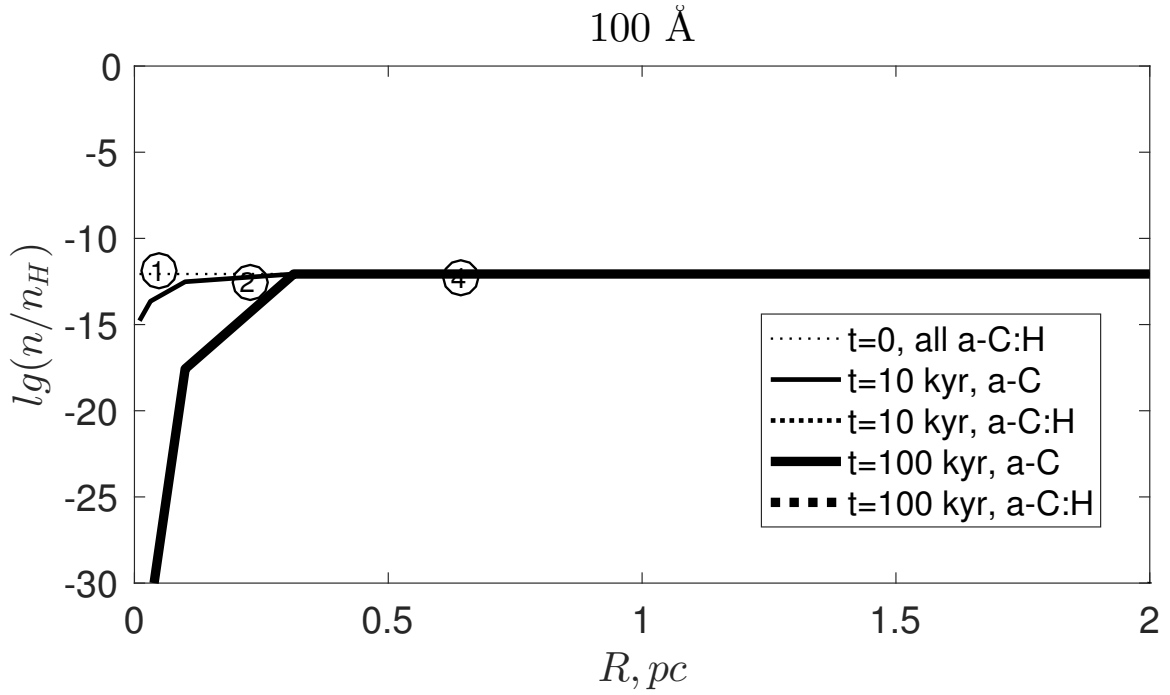


Рисунок 1.17 — То же, что на рис. 1.15 для пылинок с радиусом 100 Å.

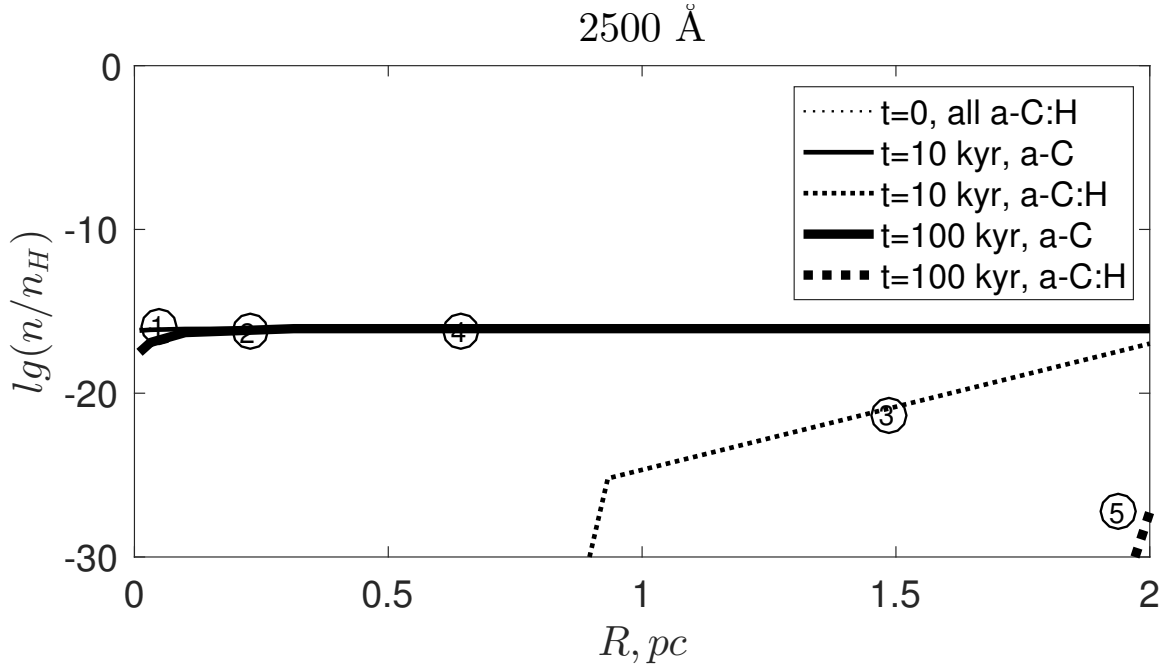


Рисунок 1.18 — То же, что на рис. 1.15 для пылинок с радиусом 2500 Å.

В ходе исследования механизмов разрушения и реструктуризации пылевых частиц в межзвездной среде получена зависимость темпа разрушения пыли от концентрации, температуры и скорости столкновений с частицами газа. Данный результат применим ко многим физическим условиям, а также может использоваться для определения влияния изменения параметров (T , v и n_H) в ту или иную сторону на характерное время разрушения пыли. Представлена по-

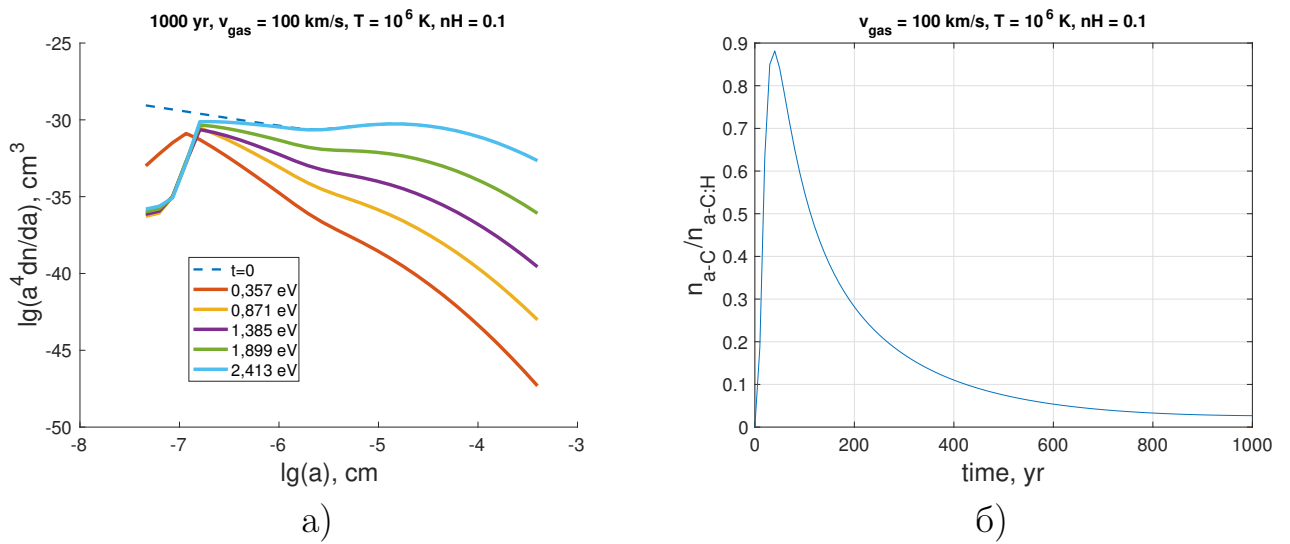


Рисунок 1.19 — Ароматизация пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 100 \text{ км/с}$, $T = 10^6 \text{ K}$, $N = 0.1 \text{ см}^{-3}$.

пытка объяснения распределения интенсивности излучения вблизи массивных звезд благодаря процессам разрушения и реструктуризации пылинок.

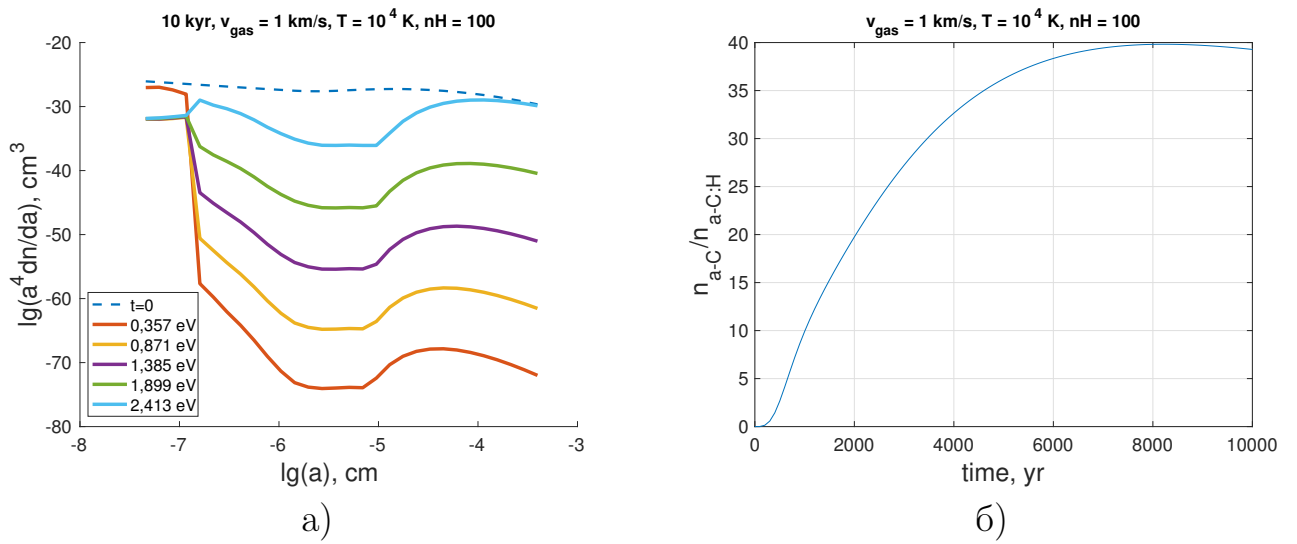


Рисунок 1.20 — Ароматизация пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 1 \text{ км/с}$, $T = 10^4 \text{ К}$, $N = 100 \text{ см}^{-3}$.

Глава 2. Динамическая эволюция пыли в дисковых галактиках

Наблюдения показывают наличие пыли в окрестностях дисковых галактик и в межгалактической среде. Прямое оптическое изображение большинства спиральных галактик показывает большое количество пылевых облаков, заполняющих толстый диск до высот ~ 2 кпк [19]. Облака, видимые в окрестностях галактики NGC 891, имеют массу, превышающую $\sim 10^5 M_\odot$, тогда как общая масса ее толстого диска $\sim 10^8 M_\odot$. По оценкам типичный размер и объемная плотность пылевой компоненты в межгалактической среде довольно разные. Например, авторами работы [77] обнаружено, что радиус пылинок в межгалактическом пространстве находится в диапазоне $\approx 0.01\text{--}0.03$ мкм.

Предполагается, что поток излучения в фотометрической полосе 8 мкм характеризует излучение ПАУ, поскольку в этот диапазон попадают яркие эмиссионные полосы ПАУ. Излучение более крупных пылинок связано с потоком на 24 мкм. Важным источником информации о свойствах пылевого компонента галактик стали наблюдения на телескопах «Спитцер» и «Гершель» в фотометрических полосах с центрами на 8 мкм и 24 мкм. Наблюдения галактики NGC 5775 на телескопе «Спитцер» показывают излучение ПАУ в диапазоне 8 мкм. В этой галактике прослеживается нитевидное излучение ПАУ до $z \sim 5$ кпк [19]. Таким образом, современные исследования показывают, что пылевые частицы являются существенной составной частью межгалактического вещества. Поскольку для образования пыли необходимы низкая температура и высокая плотность, а за пределами галактик эти условия не выполняются, можно предположить, что пыль образуется в галактиках и выносится в межгалактическое пространство. Предлагались различные механизмы выметания пыли из галактик, такие как движение пыли под действием галактического ветра [23]. В работе [23] было показано, что такой механизм эффективен только в эллиптических галактиках.

Наблюдательные данные указывают на существование радиального градиента содержания тяжелых элементов в большинстве дисковых галактик, в том числе в Млечном Пути [78–80]. Значительная часть этих элементов содержится в пыли, поэтому движение пылинок может вносить некоторый вклад в формирование радиального градиента металличности.

Основными источниками пыли в Галактике являются звезды на поздних стадиях эволюции, выбросы новых и сверхновых звезд, молекулярные облака [24]. Основные составляющие пыли, производимые этими источниками, — это графитовые и силикатные пылинки [81]. На их долю, без учета молекулярных облаков, приходится 88% всей пыли, образующейся в Галактике. Согласно данным [15] основную часть всей массы межзвездной пыли составляют мелкие частицы, в том числе ПАУ.

В данной работе информация об образовании пыли является основным источником неопределенностей. Темпы потери массы различными типами звезд по данным разных авторов расходятся более чем на порядок [24]. Также неоднозначна оценка доли каждого вида источников в производстве пыли. В любом случае, пылью, находящейся (формирующейся) в молекулярных облаках при оценке темпа выметания пыли за пределы Галактики можно пренебречь. Оценки показывают, что при концентрациях вещества в темных холодных облаках более 10 см^{-3} , пыль заморожена в облако и не принимает участия в крупномасштабном движении, связанном с давлением излучения звезд [82]. Поэтому в данной работе за шкалу высот для основных источников пыли принята шкала высот для проэволюционировавших звезд — 350 пк [83].

2.1 Свойства пылевых частиц

Взаимодействие пылинки с излучением разделяется на процессы поглощения, рассеяния и поляризации, которые характеризуются соответствующими сечениями. Эффективность передачи импульса поля излучения пылинке описывается фактором эффективности давления излучения Q_{pr} :

$$Q_{\nu}^{\text{pr}} = Q_{\nu}^{\text{abs}} + Q_{\nu}^{\text{sca}}(1 - \langle \cos \theta \rangle_{\nu}), \quad (2.1)$$

где Q_{pr} , Q_{abs} , Q_{sca} — безразмерные коэффициенты, которые являются отношениями сечений поглощения, рассеяния и поляризации к геометрическому сечению пылинки, а величина $\langle \cos \theta \rangle$ характеризует рассеивающие свойства пылинки (при рассеянии вперед, при рассеянии назад, при изотропном рассеянии). Значения Q_{abs} , Q_{sca} и $\langle \cos \theta \rangle$ для графитовых и силикатных пылинок рассчитаны

в широком диапазоне размеров и частот [84]. Для вычисления силы давления излучения мы использовали значения Q_{pr} , рассчитанные по формуле (2.1) и усредненные по планковскому распределению энергии в спектре:

$$Q_{\text{pr}} = \frac{\int_0^{\infty} Q_{\nu}^{\text{pr}} B_{\nu}(T) d\nu}{\int_0^{\infty} B_{\nu}(T) d\nu}. \quad (2.2)$$

Мы предполагаем, что пылинки имеют сферическую форму. И хотя реальная форма отличается от сферической, но отношение сил давления излучения на сфероиды и сферы одинаковой массы оказывается лежащим в интервале $0.6 \div 1.2$, за исключением сильно вытянутых частиц. Таким образом, несферичность не может играть определяющей роли.

Важной характеристикой межзвездной пыли также является изменение ее размеров при взаимодействии с межзвездным и межгалактическим газом. Но, поскольку фаза начального роста пылинок продолжается лишь небольшое время по сравнению с характерными временами их движения в галактике, то можно считать, что они начинают движение после окончания своего формирования. В дальнейшем размер пылинки определяется только процессами разрушения. Мы пренебрегаем процессами фотоиспарения, поскольку они эффективны лишь на небольших расстояниях от звезд, а пылинка большую часть времени находится вдали от звезды. Разрушение за счет столкновений с частицами газа в данной задаче малоэффективно, поскольку при постепенном увеличении ее высоты над плоскостью диска Галактики, скорости еще не достигают достаточно высоких значений, а концентрация газа заметно снижается, и столкновения не приводят к разрушению пылинки. Движение на больших галактических высотах, где пылинка достигает достаточных скоростей для начала такого процесса, мы в данной главе не рассматриваем. Процессы разрушения будут рассмотрены в следующей главе.

Поскольку при нахождении уравнения движения рассчитываются значения сил, действующих на пылинку со стороны Галактики, то немаловажной величиной, влияющей на эти значения, является плотность вещества пылинки. Нами рассмотрены три вида пылевых частиц: графиты, ПАУ и силикаты. Как правило, считается, что плотность графитовых пылинок имеет значение

2,2 г/см³, плотность ПАУ — 1,5 г/см³, плотность силикатов — 3,3 г/см³. Также считается, что силикатные частицы в межзвездной среде имеют пористую структуру [85]. Поэтому, по всей видимости, значение плотности для этих пылинок должно быть уменьшено с учетом пористости. При этом оптические свойства таких частиц, вероятно, должны измениться.

Оптические свойства пылинок показаны на рис. 2.1, 2.2. Значения Q_{abs} , Q_{sca} и $\langle \cos \theta \rangle$ для построения графиков взяты из базы данных [84]. На рис. 2.1 (а) показаны зависимости фактора эффективности давления излучения от длины волны для трех различных значений размеров графитовых пылинок и двух размеров ПАУ. На рис. 2.1 (б) показаны зависимости фактора эффективности давления излучения от длины волны для трех размеров пористых и непористых силикатных пылинок. Для расчета величины Q_{pr} для пористых пылинок использовалась модель [86]. Из рис. 2.1 (б) видно, что при увеличении пористости пылинки значение Q_{pr} снижается.

На рис. 2.2 показано, как зависит интегральное по длинам волн значение фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды. Из этих графиков видно, что значения Q_{pr} для силикатных пылинок ниже, чем для углеводородных частиц тех же размеров. На рис. 2.2 (б) также заметно, что с уменьшением значения плотности за счет учета пористой структуры силикатов примерно в том же отношении снижается и значение Q_{pr} . Таким образом, в контексте задачи нахождения уравнения движения частицы учет пористости силикатной пыли не имеет существенного значения. Дополнительное рассмотрение фактора эффективности давления излучения будет представлено в следующей главе.

2.2 Описание модели

В предлагаемой модели рассматриваются три вида сил, определяющих динамику пыли в Галактике: сила давления излучения, сила гравитационного притяжения и сила сопротивления межзвездной среды. Для вычисления сил давления излучения и гравитации необходима модель распределения поля излучения и гравитационного потенциала в Галактике, а также модель свойств

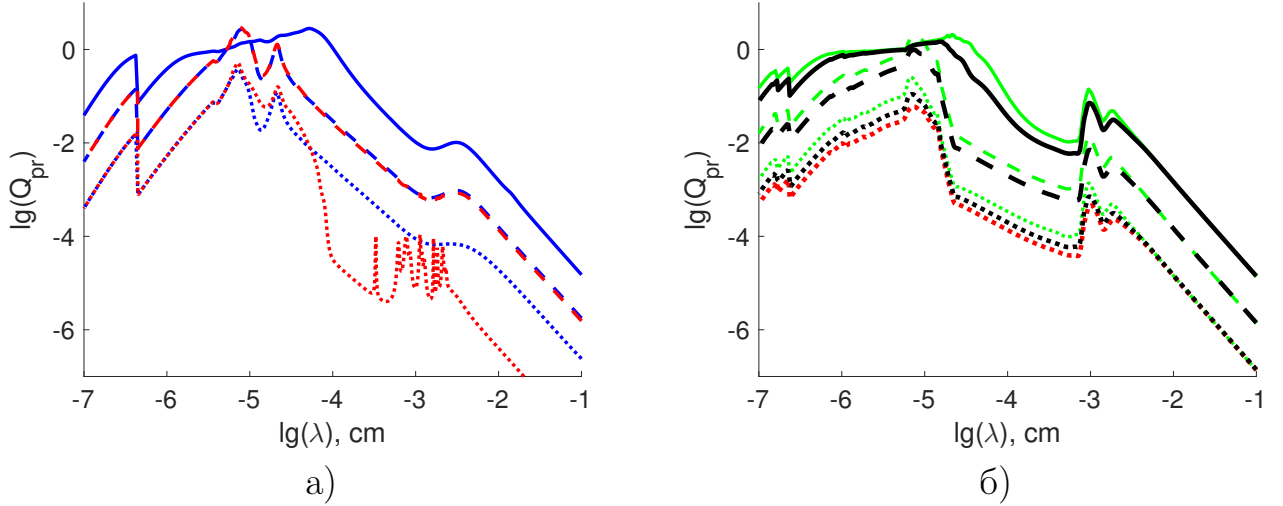


Рисунок 2.1 — Зависимость фактора эффективности давления излучения от длины волны. а) Для графитовых пылинок (синие кривые) и для ПАУ (красные кривые). Пунктирные линии — 10 Å, штриховые линии — 100 Å, сплошная линия — 1000 Å; б) для силикатных пылинок (зеленые кривые) и для пористых силикатных пылинок с пористостью 50% (черные кривые), красная кривая показывает зависимость для пористых силикатных пылинок с пористостью 70%. Пунктирные линии — 10 Å, штриховые линии — 100 Å, сплошные линии — 1000 Å.

пылинок. Для вычисления силы сопротивления газа необходимо знать свойства среды, сквозь которую движется пыль. Код программы реализован на языке C⁺⁺.

2.2.1 Силы, действующие на пылевые частицы в окрестностях галактик

Нами рассмотрены основные силы, определяющие динамику пыли в Галактике. Для расчета сил давления излучения и гравитации мы использовали детальное распределение звезд в Галактике. Влияние галактического ветра в данной работе не учитывалось, поскольку его роль в спиральных галактиках относительно невелика [23]. Также в нашей модели пылинки предполагались нейтральными, и не учитывалось влияние магнитного поля на их движение. Хотя пылинки зачастую приобретают электрический заряд и должны двигать-

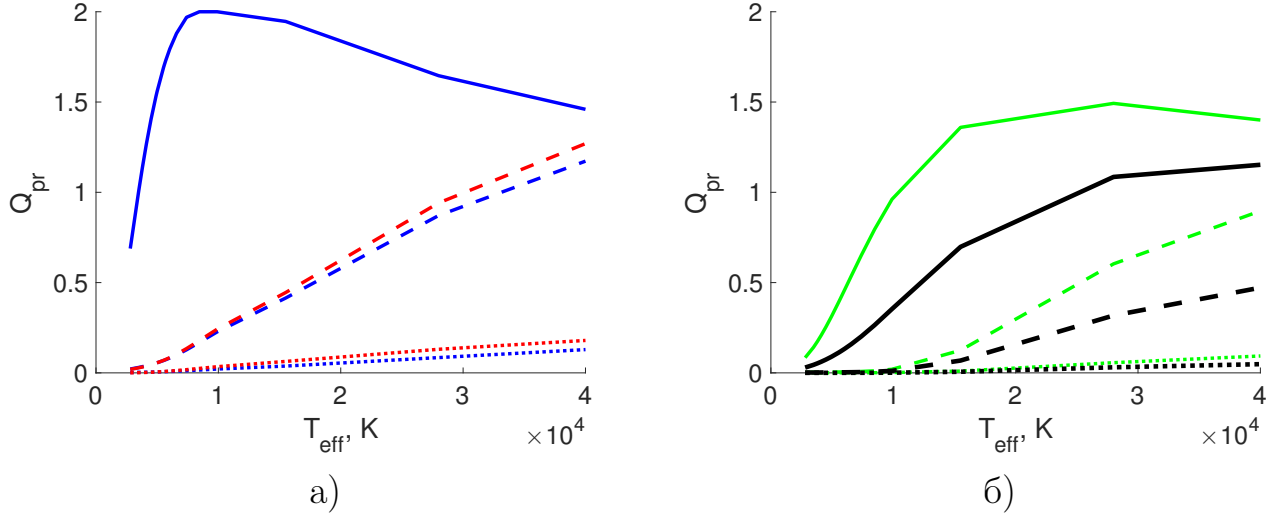


Рисунок 2.2 — Зависимость фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды. а) Для графитовых пылинок (синие кривые) и для ПАУ (красные кривые). Пунктирные линии — 10 Å, штриховые линии — 100 Å, сплошная линия — 1000 Å; б) для силикатных пылинок (зеленые кривые) и для пористых силикатных пылинок с пористостью 50% (черные кривые). Пунктирные линии — 10 Å, штриховые линии — 100 Å, сплошные линии — 1000 Å.

ся вдоль силовых линий магнитного поля Галактики, но для моделирования движения пылевых частиц под действием силы Лоренца, необходима модель структуры галактических магнитных полей. В настоящее время общепринятая модель происхождения и структуры таких полей отсутствует. Существующие модели описывают магнитное поле на высотах, не превышающих 200 пк, а данные о регулярном магнитном поле на больших высотах практически отсутствуют [87; 88]. В зависимости от структуры магнитного поля, оно может как препятствовать, так и способствовать выходу пылинок в межгалактическое пространство. В связи с вышесказанным, мы не учитывали силу Лоренца при расчете движения пылинки.

Сила давления излучения

Сила давления излучения, действующая на пылинку со стороны точечного источника со светимостью L на расстоянии r от него, равна:

$$f_{\text{pr}} = \frac{L\sigma_d}{4\pi cr^2} Q_{\text{pr}}, \quad (2.3)$$

где c — скорость света, $\sigma_d = \pi a^2$ — поперечное сечение пылинки, a — ее радиус пылинки. Предполагается, что все звезды Галактики могут быть разделены на m групп, причем звезды i -й группы характеризуются светимостью L_i , эффективной температурой T_i , массой M_i , экспоненциальной шкалой высот β_i . Число звезд i -й группы в 1 кпк³ обозначим ϕ_i . Предположим также, что плотность распределения звезд ϕ_i меняется в направлении, параллельном плоскости Галактики и число звезд i -й группы в 1 кпк³ на высоте z над плоскостью галактического диска определяется выражением

$$\phi(z, r) = \phi_0^i \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_0). \quad (2.4)$$

Было выбрано $m = 21$; разбиение звезд на группы и выбор параметров каждой группы проводились на основе данных [89].

Рассмотрим элемент объема $d\tau$ с радиус-вектором r и получим выражение для силы давления излучения dF_R , действующей со стороны звезд этого объема на пылинку, расположенную в точке с радиус-вектором r_0 :

$$d\vec{F}_R = \sum_i \frac{L_i \sigma_d}{4\pi c} Q_{\text{pr}} \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_0) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau \quad (2.5)$$

Интегрируя это выражение по всему объему Галактики, получим формулу для силы давления излучения, действующей на пылинку:

$$\vec{F}_R = \iiint_{\tau} \frac{L_i \sigma_d}{4\pi c} Q_{\text{pr}} \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_0) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau \quad (2.6)$$

При этом светимость L_i считается из соотношения [89]:

$$L_i = L_{\odot} 10^{\frac{4.75 - M_{\text{bol}}}{2.5}} \quad (2.7)$$

Сила гравитационного притяжения

Пылинка, расположенная в точке с радиус-вектором $\vec{r}_0$, будет притягиваться элементарным объемом $d\tau$ с радиус-вектором $\vec{r}$ с силой:

$$d\vec{F}_G = \sum_i G M_i m_d \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_0) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau. \quad (2.8)$$

Интегрируя это выражение по всему объему, получим силу притяжения, действующую на пылинку со стороны Галактики:

$$\vec{F}_G = \iiint_{\tau} GM_i m_d \phi_i \exp(-|z|/\beta_i) \exp(-r/r_0) \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|^3} d\tau \quad (2.9)$$

где G — гравитационная постоянная, m_d — масса пылинки.

Сила сопротивления межзвездного газа

Торможение пыли окружающим газом играет важную роль в ее движении даже при значениях плотности газа, соответствующих межгалактическому пространству. В силу торможения вносят вклад как прямые, так и кулоновские столкновения с ионами и электронами. Подробно этот процесс рассмотрен в работе [7]. Сила торможения пылинки с зарядом z_g при ее движении сквозь ионизированный водород будет равна:

$$F_{drag} = 2\pi a^2 kT n [G_0(s) + \phi^2 \ln(\Lambda) G_2(s)], \quad (2.10)$$

где

$$\phi = \frac{z_g e^2}{akT}, \quad (2.11)$$

$$\Lambda = \frac{3}{2ae\phi} \left[\frac{kT}{\pi n_e} \right]^{1/2}, \quad (2.12)$$

n — концентрация водорода, e — заряд электрона, n_e — концентрация электронов. Для оценки распределения плотности газа, сквозь который движется пылинка, использовались данные из работы [90]: $n(r, z) \sim n_0 \exp(-\frac{R-R_\odot}{R_n})$, $n_0 = 0.9 \text{ см}^{-3}$, $R_n = 3150 \text{ пк}$.

2.2.2 Уравнение движения частицы

С учетом рассмотренных сил уравнение движения пылинки записывается следующим образом:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_R + \vec{F}_G - F_{drag} \frac{\vec{v}}{v}, \quad (2.13)$$

где v — скорость пылинки. Для вычисления интегралов (2.6), (2.9) область интегрирования разбивалась на подынтервалы $[-\infty, 0] \cup [0, z] \cup [z, \infty]$, к которым применялись квадратурные формулы Гаусса и квадратурная формула Лагерра (120-точечные для вычисления z -компонента силы и 10-точечные для вычисления r -компонента).

Уравнение движения интегрировалось до 10 млрд. лет, чтобы оценить способность пылинок покинуть Галактику за время ее существования. Основными источниками пыли считаются М гиганты. Частицы начинают движение с различных начальных координат и считаются покинувшими галактический диск, если они за время 10 млрд. лет достигнут высоты 200 пк, то есть выйдут за пределы тонкого диска за время жизни Галактики.

2.3 Движение пылевой частицы в окрестностях дисковых галактик

Нами исследована динамическая эволюция графитовых пылинок с тремя значениями радиусов: 10 Å (соответствует мелкой пыли), 100 Å (соответствует средним пылинкам), 1000 Å (крупная пыль). Согласно [7; 15] выбранные размеры пылинок присутствуют в межзвездной среде, причем преобладающей является мелкая пыль [15], к которой относятся ПАУ.

Доля пыли каждого выбранного размера была взята в соответствии с распределением [15]. Таким образом, мелкая пыль составила примерно 80%, а средняя и крупная примерно по 10% всей массы пыли. Исходя из этих предположений, особенно важным представляется проследить движение именно мелких частиц, которые будут вносить основной вклад в выметание пыли из галактического диска.

За счет того, что плотность газа в Галактике экспоненциально уменьшается от центра к периферии, на пылинку при приближении ее к краю диска действует меньшее сопротивление. В то же время источники излучения и гравитации распределены по похожему закону, и в центре диска действие сил давления излучения и гравитации также усиливается.

На рис. 2.3 показана зависимость высоты, начиная с которой все пылинки покидают Галактику за время 10 млрд. лет, от начального положения пылинки

по галактоцентрическому расстоянию для трех выбранных размеров пылинок. То есть вся пыль выбранного размера, образующаяся выше границы, показанной на графике, покидает пределы Галактики. Видно, что наиболее эффективно из Галактики выметаются пылинки мелких размеров. Пылинки средних и крупных размеров не могут покинуть диск Галактики даже за время порядка возраста Галактики. Поскольку мелкие частицы составляют большую часть всей массы межзвездной пыли [15], то именно они вносят существенный вклад в потерю массы за счет рассмотренных процессов. Поскольку оптические свойства ПАУ несколько отличаются от свойств графитовых частиц [84], были рассчитаны кривые для обоих видов пылинок. По всей видимости, ПАУ присутствуют в ветрах проэволюционировавших звезд [91]. Из графика же видно, что для оценок потери пылевой массы не имеет существенного значения выбор конкретного вида частиц.

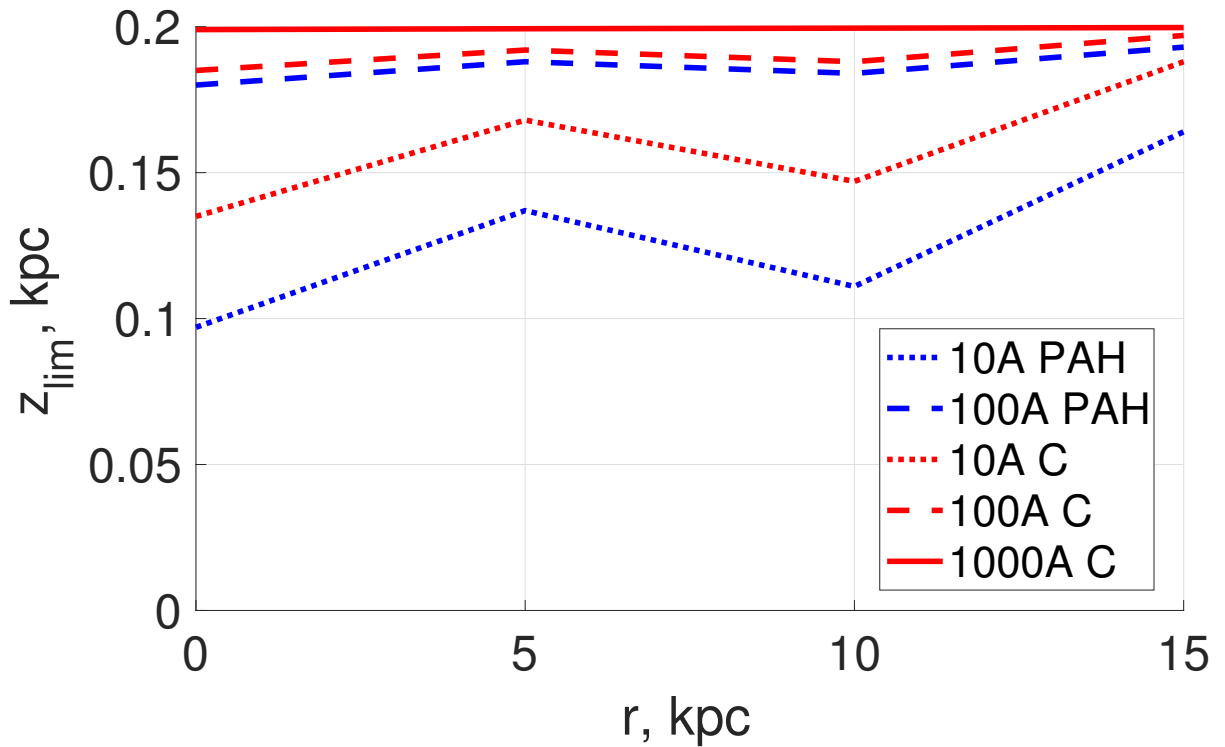


Рисунок 2.3 — Зависимость высоты, начиная с которой пыль покидает пределы диска Галактики, от начальной координаты вдоль галактического радиуса; пунктирная линия — 10 Å, штриховая линия — 100 Å, сплошная линия — 1000 Å.

На рис. 2.4 показаны примеры треков пылинок для двух размеров: 10 Å, 100 Å. Более крупная пыль движется значительно медленнее, поэтому для нее

траектория движения в данных координатах будет не показательной. Треки на графиках построены для различных начальных положений пылинок по галактоцентрическому радиусу (5 кпк, 10 кпк, 15 кпк) и одинаковой начальной высоты — 300 пк.

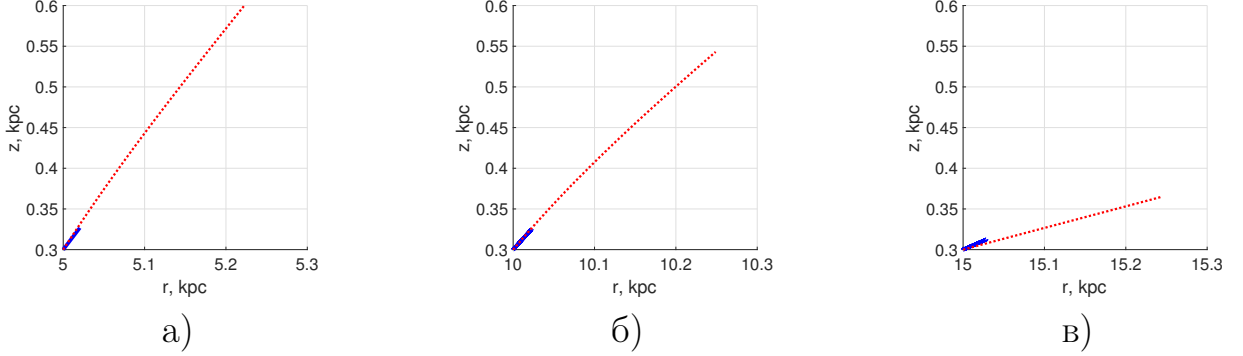


Рисунок 2.4 — Примеры треков пылинок; пунктирная линия – 10 Å, сплошная линия – 100 Å. Начальное положение по галактоцентрическому радиусу: а) 5 кпк, б) 10 кпк, в) 15 кпк

В большинстве наблюдений дисковых галактик прослеживается изменение вида зависимости содержания элементов от галактоцентрического расстояния: начиная с радиусов ~ 10 кпк заметно уменьшение наклона прямой, аппроксимирующей измеренные точки [92]. Графики на рис. 2.4 показывают, что с удалением от центра Галактики пылинки начинают двигаться под наклоном, то есть движение вдоль диска Галактики преобладает над движением по высоте. Такое явление может объяснять сглаживание градиентов металличности [92], наблюдающееся на галактоцентрических расстояниях ~ 10 кпк.

2.4 Потеря пылевой массы Галактикой

Зная распределение источников пыли и распределение плотности газа в диске, можно рассчитать поверхностную плотность скорости потери пылевой массы. Поскольку, как следует из рис. 2.3, выметание пыли идет эффективнее в центре Галактики, чем на периферии, то следует ожидать большей потери массы также из центра и уменьшении этой величины с удалением от него вдоль галактического радиуса. Однако в контексте описания возможных причин возникновения радиального градиента металличности в дисковых галактиках (в

данном случае в Млечном Пути) нас интересует относительная величина скорости потери массы в виде пыли, то есть нормированная на поверхностную плотность газа, поскольку содержание металлов в Галактике представляет собой также относительную величину.

На рис. 2.5 показана поверхностная плотность скорости потери массы в зависимости от галактоцентрического расстояния для трех выбранных нами размеров пылинок. Основной вклад в потерю пыли вносят мелкие частицы, которые, по-видимому, и составляют большую часть всей массы межзвездной пыли. На рис. 2.6 показана суммарная плотность скорости потери пылевой массы по всем размерам пылинок, нормированная на поверхностную плотность газа Галактики.

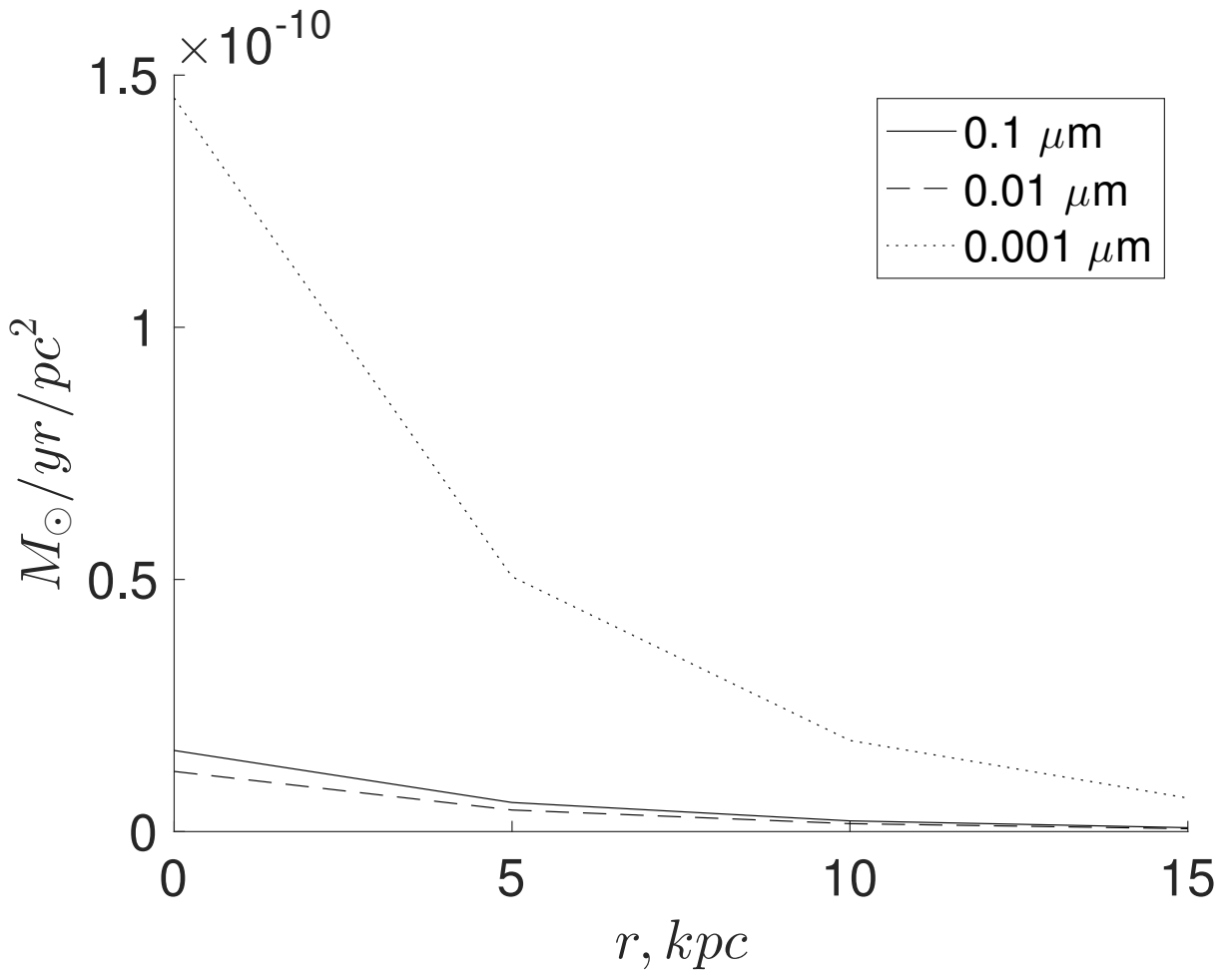


Рисунок 2.5 — Зависимость поверхностной плотности скорости потери массы в зависимости от галактоцентрического расстояния для углеводородных пылинок. Пунктирная линия — 10 Å, штриховая линия — 100 Å, сплошная линия — 1000 Å.

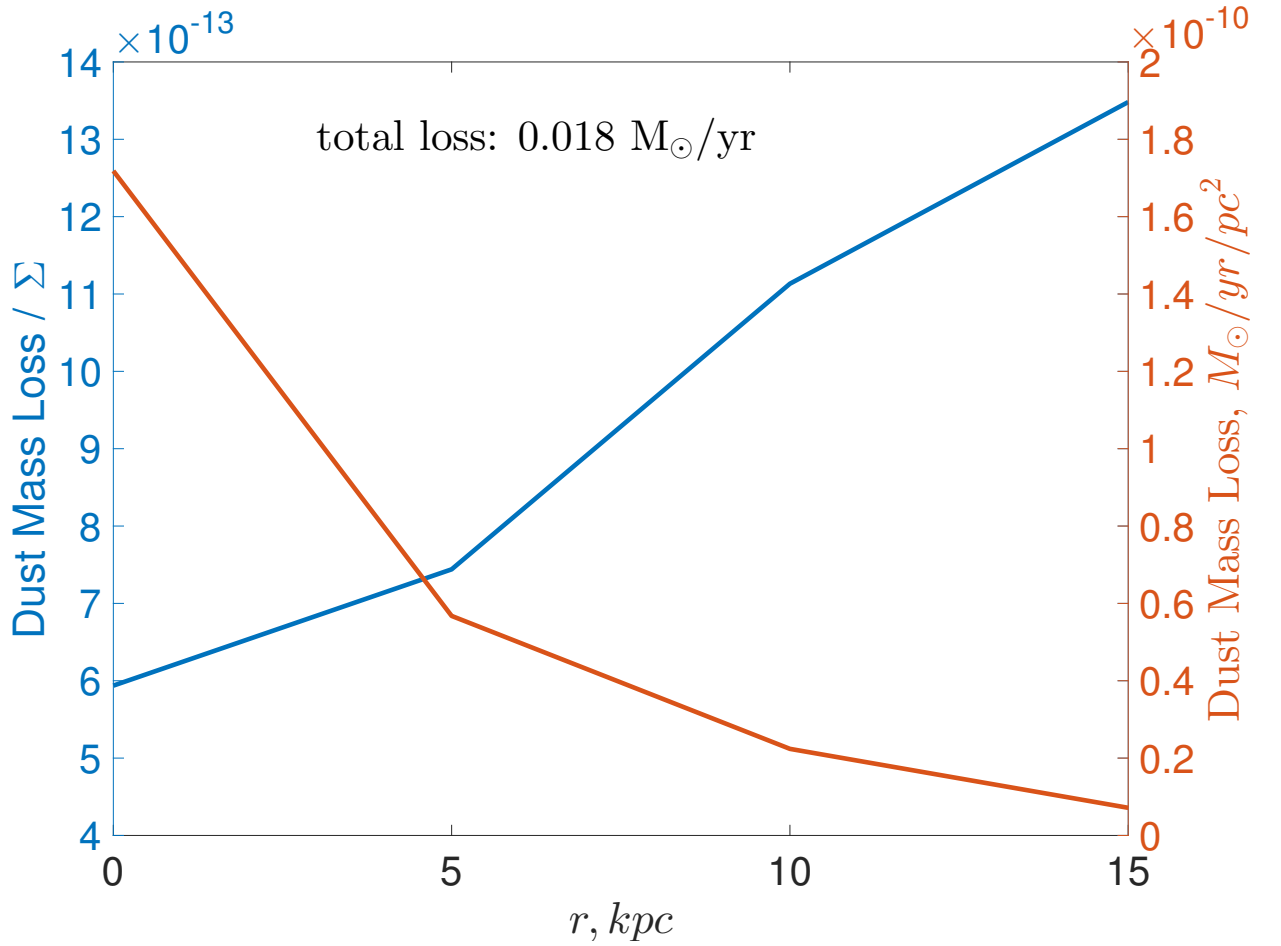


Рисунок 2.6 — Зависимость поверхностной плотности скорости потери пылевой массы в абсолютных величинах (оранжевая линия) и нормированной поверхностной плотностью газа (синяя линия), от галактоцентрического расстояния.

Видно, что абсолютная величина потерь пылевой массы уменьшается по направлению к периферии Галактики, но ее относительный вклад в металличность газа с удалением от центра, напротив, несколько возрастает. Это означает, что выметание пыли давлением излучения звезд может вносить вклад и формирование радиального градиента тяжелых элементов, входящих в состав пыли, в Млечном Пути.

Интегрирование по всем размерам пылинок и всему объему Галактики дает общий темп потери массы в виде пыли примерно $0.02 M_{\odot}/\text{год}$. Полученная величина указывает, что описанный механизм выметания пыли из Галактики является значительным в процессах обмена веществом с межгалактической средой и может объяснять наличие окологалактических пылевых структур.

На рис. 2.7 схематично показано распределение пылинок в окологалактическом пространстве для сетки начальных положений пылинок с шагом 100 пк по высоте и 5 кпк по галактоцентрическому расстоянию, начиная с высоты 100 пк и центра Галактики (т.е. $r = 0$). На графике представлено фиксированное положение каждой вылетевшей пылинки через 10 млрд. лет.

На рис. 2.8 показано вычисленное из графика на рис. 2.7 распределение плотности пыли в окологалактическом пространстве, то есть учитывающее начальную плотность пыли для заданной координатной сетки.

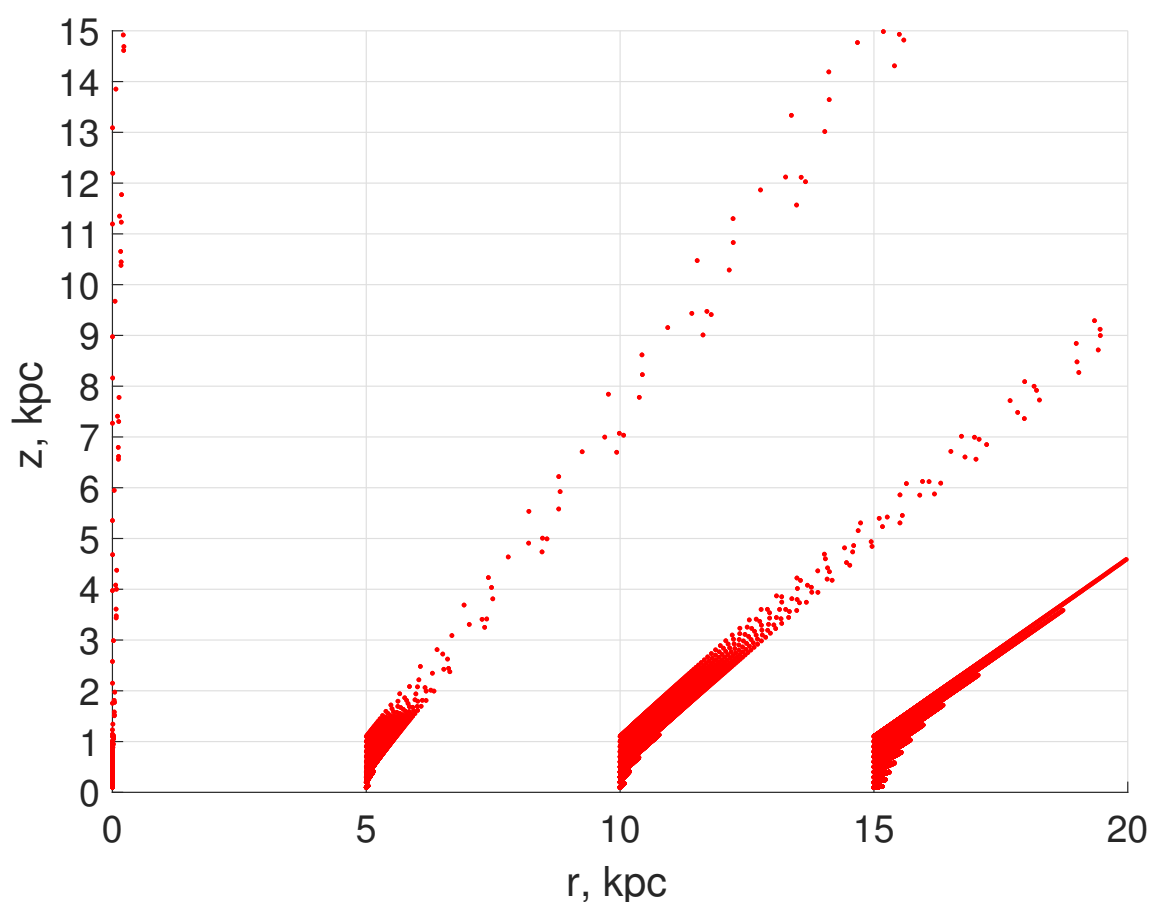


Рисунок 2.7 — Распределение пылинок в окологалактическом пространстве.

Помимо графитовых пылинок в модели также были рассмотрены и силикатные частицы. Показано, что графитовая пыль более эффективно взаимодействует с излучением, чем силикатная, поэтому она сильнее выметается из диска Галактики. Предполагается, что силикатные частицы в межзвездной среде имеют пористую структуру, поэтому их плотность должна быть уменьшена с учетом этого факта. Расчеты также показывают, что при увеличении пористости силикатной пыли, снижается фактор эффективности давления излуче-

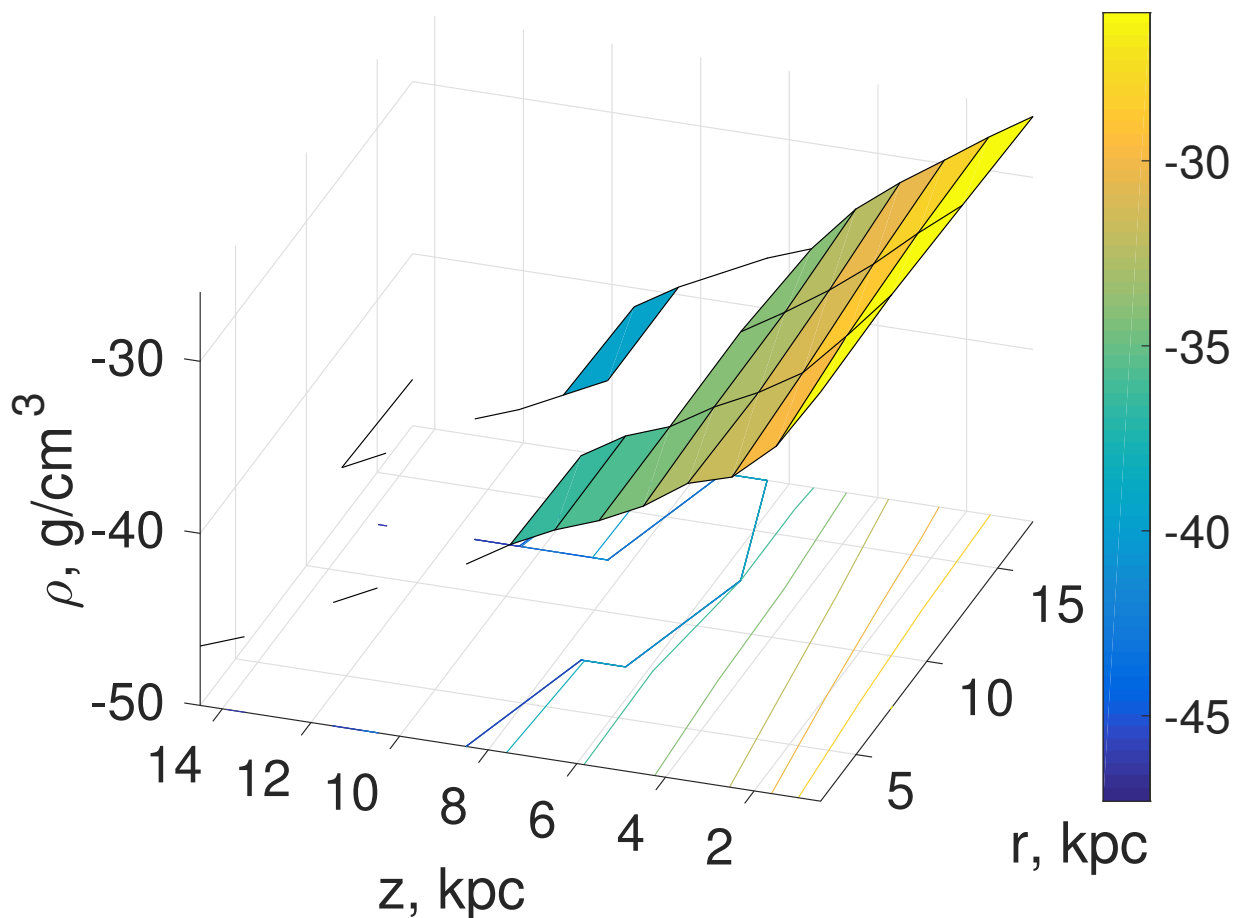


Рисунок 2.8 — Распределение плотности пыли в окологалактическом пространстве. При уменьшении плотности пыли цвет меняется от желтого к синему.

ния. Полученные результаты говорят о том, что силикатная пыль не покидает пределы Галактики за счет исследуемого механизма, то есть действия давления излучения звезд. С другой стороны, наблюдательные данные указывают, что мелкие силикатные пылинки в межзвездном пространстве, скорее всего, представляют собой силикатные ядра, покрытые углеродными мантиями [15], поэтому на данный момент довольно сложно описать их оптические свойства и создать достаточно точную модель процесса выметания этого вида пылинок давлением излучения звезд.

Результаты вычислений по построенной модели показывают, что наиболее эффективно из Галактики должны выметаться пылинки мелких размеров, в то время как крупные пылевые частицы остаются в пределах галактического диска на протяжении всей жизни Галактики. Оценки показывают, что темп потери пылевой массы Галактикой составляет $\sim 0.02 M_{\odot}/\text{год}$. В результате рас-

четов траекторий движения частиц было показано, что при удалении от центра Галактики движение пылинок вдоль галактоцентрического радиуса преобладает над движением по высоте.

Глава 3. Объединение моделей химической и динамической эволюции пыли применительно к окрестностям галактик

Полученные нами результаты указывают, что пыль в окрестностях галактики может двигаться с высокой скоростью. Причем пылинки различного вида имеют различные скорости, как по величине, так и по направлению. Наиболее эффективно выметаются из Галактики мелкие пылинки (в том числе ПАУ), тогда как крупные могут находиться практически на одной галактической высоте на протяжении всей жизни Галактики (при отсутствии каких-либо механических сил, действующих на пылинку). Таким образом получается, что мелкие пылинки приобретают высокую скорость движения относительно газа и крупной пыли. В таком случае логично предположить, что пылинки испытывают соударения между собой и с частицами газа. Тогда для более точного описания процесса вылета пылинок из галактического диска в модели необходимо учесть и процессы распыления и дробления пыли.

3.1 Описание модели

Как и в предыдущей главе, нами рассматривается модель выметания пылинок из Галактики. Для упрощения вычислений мы перешли к рассмотрению всего четырех типов звезд (табл. 3.1), что в дальнейшем также позволит осуществить переход к вычислению динамики пыли для других галактик. Задача заключалась в том, чтобы оценить влияние процессов разрушения на выметание пыли из галактического диска давлением излучения звезд. Предлагается проверить возможность выметания мелкой пыли с учетом ее столкновений с газом Галактики, а также уточнить диапазон размеров частиц, которые могут попасть в межгалактическое пространство благодаря описываемому механизму. Проверка модели осуществляется вычислением общей светимости и массы Галактики.

Таблица 3.1

Параметры типов звезд в упрощенной модели.

Sp	M_{bol}	T_{eff} , K	$10+lg(\phi)$	β , кпк
O5 V	-10.0	40000	2.4	0.05
B5 V	-2.6	15500	5.7	0.06
A0 V	0.1	9900	6.4	0.115
K5 III	-1.0	3800	6.76	0.27

В начальный момент времени задается радиус пылинки, ее плотность и положение в галактоцентрической системе координат. На каждом временном шаге вычисляется изменение координат пылинки, а также действие двух процессов: столкновений с частицами газа и столкновений с другими пылинками. Для описания столкновений с мелкими пылинками была взята некая средняя скорость движения, а именно 1 км/с, и значение их радиуса $10 \text{ \AA}$. Такую скорость набирает пылинка радиуса $10 \text{ \AA}$ при начальных координатах $z = 0.4$ кпк и $r = 5$ кпк или $z = 0.2$ кпк и $r = 0$ кпк за 2 млрд. лет. Такой выбор скорости обусловлен тем, что пылинка в процессе разрушения набирает скорость и высоту, поэтому при меньших начальных относительных скоростях будет занижено дальнейшее действие столкновений. Поскольку пылинки, вылетающие с разной начальной высоты, приобретают разную скорость движения к моменту столкновения с частицей, находящейся на заданной высоте в галактоцентрических координатах, в настоящий момент довольно затруднительно включение в модель точное задание этой скорости. Наиболее важной величина скорости столкновения является на начальном этапе дробления пылинки, поскольку именно на этом этапе определяется дальнейшее движение частицы. При слишком больших скоростях столкновений крупная пылинка может успеть разрушиться полностью, не меняя своего положения по координатам, и напротив, при малых относительных скоростях, пылинка может вовсе не претерпевать разрушения и также не менять своего положения в Галактике.

Рассматривались, как и в предыдущей главе, три вида пылинок, имеющих в начальный момент времени радиусы $10 \text{ \AA}$, $100 \text{ \AA}$ и $1000 \text{ \AA}$, что соответствует разделению на мелкие, средние и крупные частицы. Для средних и крупных пылинок ($100 \text{ \AA}$ и $1000 \text{ \AA}$) начальная высота была принята равной 200 пк, поскольку нас, вообще говоря, интересует пыль, находящаяся не в самом диске Га-

лактики. Положение по галактоцентрическому радиусу — 5 кпк, так как силы, действующие на пылинку для данного значения радиуса, имеют некое среднее значение. Разрушение мелкой пыли тестировалось на более широком диапазоне значений координатной сетки: начальная высота варьировалась от 1 пк до 1000 пк, а начальное положение по радиусу от 0 до 15 кпк с шагом 5 кпк. Расчеты проводились для двух разновидностей химического состава пылинок: графитовых и ПАУ.

Для проведения вычислений, связанных с разрушением пыли за счет столкновений с частицами газа, важно правильно задать величину концентрации газа. Как и в предыдущей главе, для оценки распределения плотности газа, использовались данные из работы [90]

Для моделирования дробления пылинок необходимо задавать концентрацию самой пыли. Мы предполагали, что масса пылевого компонента межзвездной среды составляет примерно 1% от массы газа. Исходя из этого предположения была рассчитана концентрация пыли и частота соударений с пробной пылинкой, равная $\sigma \cdot v \cdot n$, где $\sigma = \pi(a_1 + a_2)^2/4$ — эффективное сечение взаимодействия, v — относительная скорость движения, n — концентрация мелкой пыли. В более детальных расчетах необходимо учитывать, что распределение пылинок различных размеров в окологалактическом пространстве может не совпадать с распределением газа и зависеть как от процессов выметания пыли (не только давлением излучения, но и галактическим ветром), так и от процессов разрушения пылевых частиц. Однако на данном этапе нас интересует ответ на вопрос о принципиальной важности разрушения пылинок при их выходе за пределы галактического диска, поэтому мы рассматриваем задачу в упрощенной постановке.

3.2 Эффективность разрушения пылинок в окологалактическом пространстве

Как говорилось в предыдущих разделах, изменение размеров крупных пылинок происходит за счет дробления, то есть столкновений с мелкими пылевыми частицами. К тому же относительная скорость движения крупных пылинок

и газа в заданных нами условиях достаточно мала. Поэтому газ не оказывает воздействия на разрушение средней и крупной пыли. Влиянию столкновений с частицами газа могут быть подвержены только мелкие пылевые частицы. Однако и в этом случае результаты вычислений показывают, что при выметании пылинок из галактического диска давлением излучения звезд для условий, соответствующих нашей Галактике, мелкие пылинки в результате столкновений с частицами газа не разрушаются. Как отмечалось выше, минимальное значение скорости, при которой возможно полное разрушение ПАУ за счет столкновений с частицами газа, составляет ~ 100 км/с. Скорости такого порядка, при условии, что пылинка летит вверх относительно диска Галактики, достигаются лишь на высотах ~ 1 кпк. Другим параметром, от которого зависит темп разрушения пыли в результате распыления, является концентрация газа. На высоте 1 кпк значение концентрации газа составляет примерно 0.0002 см^{-3} . При таком содержании частиц газа заметное разрушение пылинок не происходит даже для больших скоростей, которые набирают пылинки с увеличением высоты.

Как было показано ранее на рис. 2.4, пылинки с радиусом $100 \text{ \AA}$ за 10 млрд. лет меняют свое положение по высоте на 10–20 пк. Более крупные пылинки двигаются еще медленнее и занимают приблизительно одинаковое положение по высоте на протяжении всей жизни Галактики. При этом мелкие пылинки за то же время поднимаются гораздо выше и, соответственно, летят с существенно большими скоростями. Таким образом, неизбежно появляется относительное движение мелких и крупных пылевых частиц. Влияние этого движения на разрушение пылинок существенно зависит от величины относительной скорости, а она, в свою очередь, в контексте рассматриваемого механизма зависит от величины фактора эффективности давления излучения. Далее мы обсуждаем неопределенности, связанные с его вычислением.

3.2.1 Фактор эффективности давления излучения

Движение пылинок в галактическом гало под действием давления излучения ранее было рассмотрено в работе [93]. Авторы работы утверждают, что за расчетное время 10 млрд. лет пыль может выметаться из диска галактики под

действием давления излучения, причем результаты их моделирования показывают, что крупная пыль эффективно покидает пределы галактического диска, в отличие от мелкой пыли, которая в данной модели перемещается внутрь диска с начальной высоты 200 пк. Целью работы [93] было моделирование не Млечного Пути, а некой «типичной» спиральной галактики. В работе рассматриваются те же три вида сил, действующих на пылинку, что и в нашей работе. Отличия таковы: в модель включено темное гало; принята иная модель распределения газа; считается отличное от нашей значение полной светимости галактики; приняты другие значения фактора эффективности давления излучения для рассматриваемых пылинок. Светимость галактики в модели ($10^{11} L_{\odot}$) на порядок выше светимости в наших расчетах. Барионная масса галактики составляет, как и в нашей модели, $10^{11} M_{\odot}$, а масса темного гало, которое простирается до 48 кпк, — $10^{12} M_{\odot}$. Таким образом, отношение M/L в данной модели за счет учета массы темного гало ≈ 10 , что соответствует значению в нашей модели и в большинстве спиральных галактик.

Для каждого вида пылинки в модели [93] задается единственное значение Q_{pr} (0.012, 0.12 и 1.9, соответственно). Значения Q_{pr} для пылинок с радиусами 0.01 микрона и 0.1 микрона взяты из работы [94] для излучения с температурой 6000 К. Значения Q_{pr} для 0.001 микрона рассчитаны в приближении рэлеевского рассеяния, т.е.:

$$Q_{\text{pr}} = \frac{2\pi a}{\lambda}, \quad (3.1)$$

где a — радиус пылинки.

Для сравнения в таблицах Б.1, Б.2, Б.3 мы представляем значения фактора эффективности давления излучения для графитовых пылинок, ПАУ и силикатов для различных значений эффективной температуры звезд (соответствующих температурам выбранных нами классов), рассчитанных по формуле (2.2). Сравнение значений в таблицах с используемыми в работе [93] показывает отклонения для многих групп звезд. На рис. 3.1 показаны значения фактора эффективности давления излучения как функция эффективной температуры звезды для графитовых пылинок, вычисленных по формуле (2.2) (синие кривые) и по формуле (3.1) (черные кривые) для трех размеров пылевых частиц ($10 \text{ \AA}$, $100 \text{ \AA}$, $1000 \text{ \AA}$).

Из графика видно, что рэлеевское приближение незначительно занижает значения Q_{pr} для мелких частиц и завышает это значение для крупной пы-

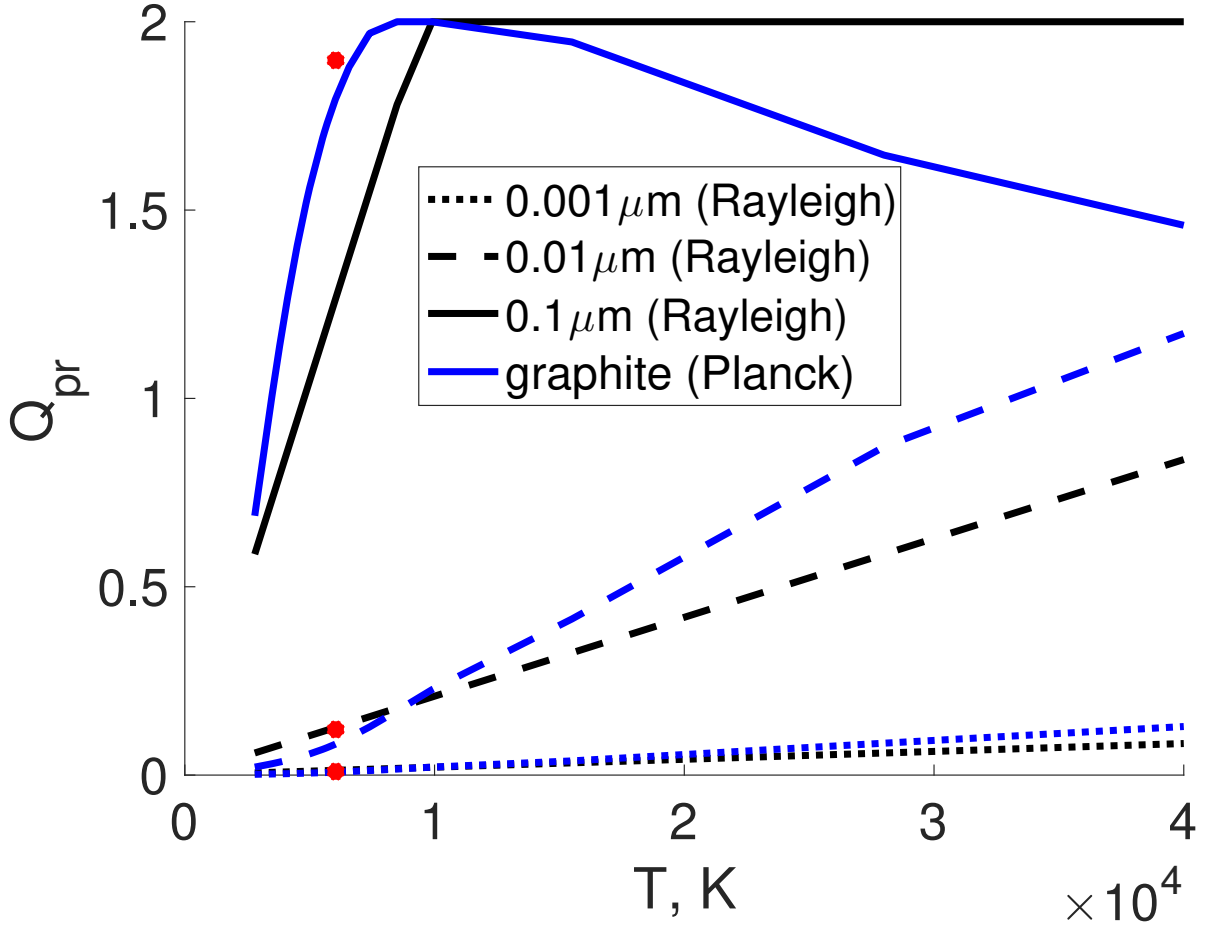


Рисунок 3.1 — Зависимость фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды для графитовых пылинок, вычисленного по формуле (2.2) (синие кривые) и по формуле (3.1) (черные кривые); пунктирная линия — $10 \text{ \AA}$, штриховая линия — $100 \text{ \AA}$, сплошная линия — $1000 \text{ \AA}$. Красными точками показаны значения, принятые в работе [93].

ли. Видно также, что для самых крупных частиц выбранное в [93] значение Q_{pr} близко к максимальному, и при учете звезд ранних спектральных классов (с эффективной температурой выше 6000 K) действие излучения на такие пылинки будет менее эффективным, в то время как мелкие и средние частицы, напротив, начнут эффективнее выметаться из галактического диска. Таким образом, эффективное выметание крупных частиц в модели [93] может быть следствием некорректного учета давления излучения. Также из рис. 2.2 (а) и таблиц Б.1 и Б.2 видно, что ПАУ должны выметаться эффективнее, чем графитовые пылинки (соотношение плотностей ПАУ и графитов также говорит в пользу этого утверждения), что и отражает график на рис. 2.3. В целом, влияние величины Q_{pr} на эффективность выметания пылинок из галактики требует более де-

тального рассмотрения. Особый интерес представляет влияние перехода между средними и крупными пылинками (показанного на рис. В.1) в зависимости Q_{pr} от эффективной температуры на эффективность выметания частиц из галактики. Из рис. 3.1 также следует, что эффективность выметания пыли должна зависеть от распределения типов звезд.

На рис. 3.2 показаны траектории пылинок, начинающих движение с одинаковой высоты для каждого из трех размеров пылинки, но при различных способах вычисления Q_{pr} . Расчеты траекторий выполнены в нашей программе до расчетного времени 10 млрд. лет. Начальное положение пылинки по галактоцентрическому радиусу для всех пылинок соответствовало центру галактики. Варьировался только параметр Q_{pr} и начальная галактоцентрическая высота.

Из графиков видно, что для пылинок мелких и средних размеров значения Q_{pr} , принятые в работе [93], как и значения Q_{pr} , посчитанные в рэлеевском приближении, несколько занижают эффективность выметания пылевых частиц. Значения же Q_{pr} для крупных пылинок из рэлеевского приближения, а также значения, принятые в работе [93], напротив, завышают действие давления излучения на выметание пылинок из Галактики.

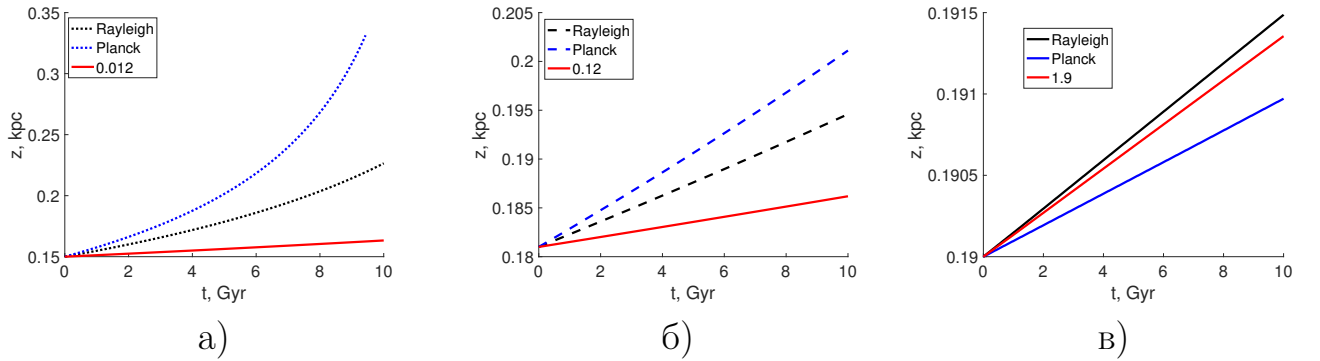


Рисунок 3.2 — Зависимость положения графитовой пылинки по галактической высоте от времени. а) Для пылинок с радиусом 10 Å; б) для пылинок с радиусом 100 Å; в) для пылинок с радиусом 1000 Å. Черные траектории посчитаны для значений Q_{pr} в приближении рэлеевского рассеяния; синие траектории посчитаны для значений Q_{pr} , усредненных по планковскому распределению энергии в спектре; красные траектории посчитаны для Q_{pr} , взятых из работы [93].

3.2.2 Разрушение пылинок в галактическом гало

В предыдущей главе мы показали, что крупные пылинки выметаются из галактического диска существенно менее эффективно, чем мелкие пылинки. Однако включение в модель процессов разрушения пыли приводит к тому, что крупные пылинки распадаются на мелкие частицы, которые постепенно с уменьшением массы набирают высоту. Таким образом пылинка радиуса $1000 \text{ \AA}$, начинающая движение на высоте около 200 пк , через 4.6 млрд. лет покидает пределы толстого диска, где она уже имеет размер $\sim 400 \text{ \AA}$. На рис. 3.3 показан пример траектории такой пылинки в расчете до 4.56 млрд. лет . В процессе потери массы, вещество пылинки переходит в осколки, размеры которых соответствуют размерам от молекул до небольших ПАУ. Таким образом межгалактическое пространство может пополняться мелкими пылевыми частицами и тяжелыми элементами, суммарно вносящими довольно значительный вклад в межгалактическую массу пыли.

При увеличении средней скорости столкновений темп разрушения также увеличивается, и начальная пылинка может разрушиться полностью, не успев покинуть пределы галактического диска за $\sim 10 \text{ млрд. лет}$. При этом осколки, появившиеся в процессе разрушения, сами по себе легче набирают скорость и вылетают в окологалактическое пространство. Разрушение пылинок меньшего начального радиуса, находящихся на той же начальной высоте, также происходит быстрее и может приводить к такому же результату.

3.3 Возможные приложения модели

Описанная модель при внесении некоторых изменений может применяться не только к Млечному Пути, но и к другим дисковым галактикам.

В контексте выметания пыли, а также тесно с ним связанного (как показано выше) процесса ее разрушения, важным параметром оказывается соотношение масса-светимость галактики. Поскольку в отсутствие каких-либо дополнительных механических сил (галактический ветер) основной силой, вы-

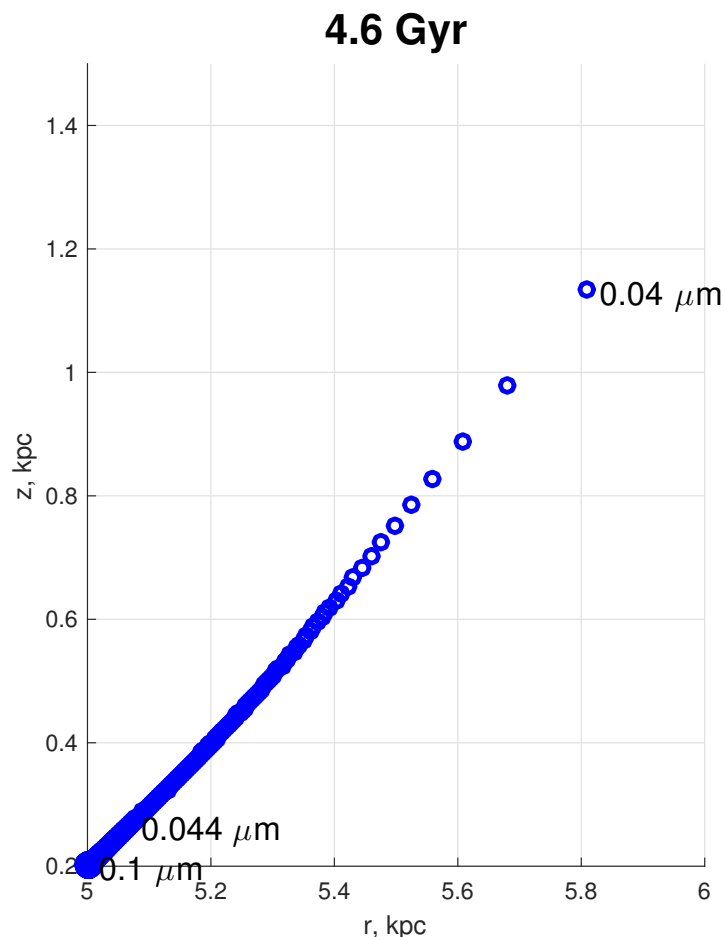


Рисунок 3.3 — Траектория пылинки с начальным радиусом $1000\text{\AA}$ за время 4.56 млрд. лет с учетом разрушения.

талкивающей пылевые частицы в окологалактическое и межгалактическое пространство, является сила давления излучения, критичным в задаче описания динамики пыли становится точное определение светимости галактики. Но ввиду того, что движение частицы определяется балансом всех действующих сил, не менее важным становится отношение M/L , которое, вообще говоря, и определяет характер движения частиц. Таким образом, содержание окологалактической пыли могло бы позволить судить о соотношении массы и светимости для наблюдаемой галактики.

Помимо отношения M/L , конечно, важную роль играет распределение газа в галактике. Но ввиду неравномерности его распределения, в т.ч. наличия каверн и областей повышенной плотности (в спиральных рукавах), точность вычислений может значительно снижаться. Количество газа и, следовательно, сила сопротивления, действующая на пылинку, также может качественно менять картину распределения окологалактической пыли. Нами проводились

расчеты с использованием редуцированного значения концентрации газа. При уменьшении концентрации газа в 1000 раз крупная пыль также не покидает пределы галактического диска за время жизни Галактики, а практически вся мелкая и средняя пыль покидает галактический диск. Одним из важных параметров, используемых при описании разрушения пыли в модели ее выметания из галактического диска, является соотношение пыль-газ, которое также может варьироваться.

Стоит упомянуть еще одно явление, способствующее выбросу пыли в межгалактическое пространство, — галактический ветер. Процессы, связанные с галактическим ветром, не были включены в нашу модель, поскольку требуют более детального учета эволюционных процессов в галактике. Но учет этих явлений возможен и представляется немаловажным. При наблюдении галактик можно судить об интенсивности этих процессов, в том числе, по содержанию пыли в окологалактическом пространстве. Поскольку в данном процессе возможно разрушение мелкой пыли, ответственной за дробление крупных пылинок, то благодаря галактическому ветру могут выживать и попадать в межгалактическое пространство средние и крупные пылевые частицы.

3.4 Выметание пылинок и градиент металличности

В настоящее время считается, что многие элементы, такие как C, N, O, Mg, Si, Fe, N, в той или иной степени связаны в пылевых частицах [95]. Если выметание пыли давлением излучения звезд вносит свой вклад в формирование радиальных градиентов металличности, градиенты содержания для элементов, входящих в состав пыли, должны отличаться от градиентов содержания элементов, которые в ее состав не входят. Конечно, эти элементы содержатся в пыли в различных соотношениях, а также, помимо механизма выметания пыли давлением излучения, немаловажную роль играет галактический ветер, моделирование которого в данной работе не проводилось.

С одной стороны, можно проследить некоторое отличие градиентов таких элементов как He, Ar, Ne [19] и сходство зависимостей для элементов, входящих в состав пыли [19; 96]. С другой стороны, данные [97] свидетельствуют о сход-

стве градиентов для большинства элементов, вне зависимости от того, входят ли они в состав межзвездной пыли. Впрочем, разброс величин градиентов металличности довольно высок, вследствие чего представляется возможным только качественное сравнение наблюдательных данных.

В настоящее время существуют различные модели, описывающие возможные сценарии возникновения радиального градиента металличности в дисковых галактиках, такие как, например, модели с радиально-зависимой аккрецией вещества [98;99]. Согласно этой модели падающий газ имеет более низкий момент импульса, чем газ в диске, и перемешивание с газом диска индуцирует радиальные течения. Эта модель предполагает наличие второго эпизода аккреции из начального газа, который разбавляет газ во внутренних областях, несмотря на химическое обогащение, а также предсказывает инверсию градиента в ранние времена: градиент имеет положительный наклон ($z \sim 2$), а затем выравнивается и достигает слегка отрицательного наклона. Объяснение инверсии градиента металличности основано на формировании диска «изнутри наружу» (inside-out): в раннюю эпоху ($z = 3$) эффективность химического обогащения (т. е. звездообразования) во внутренних областях высока, но скорость притока первичного газа доминирует, тем самым разбавляя газ больше во внутренних, чем во внешних областях. С течением времени приток первичного газа во внутренних областях уменьшается, и химическое обогащение берет верх. На еще более поздних этапах звездообразование во внутренних областях по-прежнему значительно интенсивнее, чем во внешней части диска, где плотность газа очень мала, но приток ниже, и градиенты становятся отрицательными и во внутренних областях. Эта инверсия градиента содержания кислорода была обнаружена при красном смещении $z = 3$ в некоторых галактиках [100]. В этой работе показано, что обилие кислорода уменьшается по направлению к центру Галактики, создавая положительный градиент. Эта инверсия уже была теоретически отмечена [101] и изучена [102] с точки зрения модели двойного втекания.

Однако модели с радиально-зависимой аккрецией, при всей своей успешности, требуют дополнительных предположений об этапах втекания вещества либо об определенных ограничениях скорости его притока. Также свойства некоторых галактик могут отличаться от начальных предположений этих моделей. Кроме того, в настоящее время отсутствует окончательное понимание и

согласие в вопросе происхождения первичного падающего газа и возможности второго этапа аккреции.

Современные космологические и хемодинамические модели включают как детальное химическое обогащение, так и действие активных ядер галактик [103–106]. Рассматриваются следующие эволюционные пути формирования градиентов: создание начальных крутых градиентов богатых газом галактик; эволюция за счет звездообразования и/или аккреции звезд на окраинах; уплотнение градиентов вследствие слияния галактик. В моделях с радиальным перераспределением вещества рассматриваются аккреция вещества с низким моментом импульса [107], вязкий перенос [108], гравитационное взаимодействие между газом и волнами плотности [109].

Безусловно важным результатом является установление вида траекторий движения пылевых частиц из диска Галактики, в том числе в контексте вопроса возникновения и вида радиального градиента металличности дисковых галактик. Представляет интерес анализ этой зависимости и ее эволюции, а также эволюция градиентов во времени в целом для дисковых галактик, т. е. сравнение результатов моделирования с наблюдениями галактик на больших z .

Интересно также проследить влияние зависимости масса-светимость для галактик на выметание пыли. Представляется возможным установить некую закономерность в количестве окологалактической пыли и этого соотношения.

Заключение

Проведено исследование разрушения пылевых частиц в различных условиях межзвездной среды, в том числе в условиях, типичных для зон ионизованного водорода и остатков сверхновых. Вычисления в программном коде **Shiva** для сетки параметров межзвездной среды, позволили составить детальную сетку шкал разрушения, а также провести сравнение с наблюдениями. Проанализирован вклад различных процессов в разрушение ансамбля пылевых частиц. Показано, что относительная эффективность разрушения пылинок различных видов сложным образом зависит от баланса процессов. В работе приводится объяснение кольцеобразной морфологии излучения пыли вокруг массивных звезд при помощи вычислений эволюции пылинок по размерам и степеням ароматизации. Полученные результаты можно использовать для интерпретации наблюдений областей ионизованного водорода и остатков сверхновых, поскольку они показывают качественное согласие с имеющимися наблюдательными данными.

Исследован механизм выметания пыли из галактик под действием давления излучения звезд с учетом сил гравитации и сопротивления межзвездного газа. Приводятся результаты моделирования для Млечного Пути. Показано, что крупные пылинки не могут покинуть диск даже за время порядка возраста Галактики, в отличие от мелких пылинок. Поскольку мелкие пылинки составляют большую часть всей массы межзвездной пыли [15], то они вносят существенный вклад в потерю массы за счет рассмотренных процессов. Оценен общий темп потери массы в виде пыли нашей галактикой, что составляет $\sim 0.02 M_{\odot}/\text{год}$. Такой результат указывает на значительное влияние давления излучения звезд на выметание вещества из галактических дисков.

Объединены модели разрушения и выметания пылевых частиц из галактик. Приводятся результаты вычислений, и обсуждается влияние различных параметров модели на результаты вычислений. Обсуждается возможность описания градиентов металличности в дисковых галактиках при помощи модели выметания пылевых частиц, а также другие возможные приложения модели.

Список литературы

1. *Draine B. T., Li A.* Infrared Emission from Interstellar Dust. IV. The Silicate-Graphite-PAH Model in the Post-Spitzer Era // . — 2007. — . — Vol. 657. — Pp. 810–837.
2. Dust evolution in the dwarf galaxy Holmberg II / D. S. Wiebe, M. S. Khramtsova, O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya // *Astronomy Letters*. — 2014. — May. — Vol. 40, no. 5. — Pp. 278–290.
3. Optical and infrared emission of H II complexes as a clue to the PAH life cycle / M. S. Khramtsova, D. S. Wiebe, T. A. Lozinskaya, O. V. Egorov // . — 2014. — Oct. — Vol. 444, no. 1. — Pp. 757–775.
4. Size Effects on Dissociation Rates of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Cations: Laboratory Studies and Astrophysical Implications / H. W. Jochims, E. Ruhl, H. Baumgartel et al. // . — 1994. — Jan. — Vol. 420. — P. 307.
5. *Allain T., Leach S., Sedlmayr E.* Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. I. Photodissociation rates for the loss of an acetylenic group. // . — 1996. — Jan. — Vol. 305. — P. 602.
6. *Allain T., Leach S., Sedlmayr E.* Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. II. Influence of the states of ionization and hydrogenation. // . — 1996. — . — Vol. 305. — P. 616.
7. *Draine B. T., Salpeter E. E.* On the physics of dust grains in hot gas // . — 1979. — . — Vol. 231. — Pp. 77–94.
8. The physics of grain-grain collisions and gas-grain sputtering in interstellar shocks / A. G. G. M. Tielens, C. F. McKee, C. G. Seab, D. J. Hollenbach // . — 1994. — . — Vol. 431. — Pp. 321–340.
9. *Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J.* Grain Shattering in Shocks: The Interstellar Grain Size Distribution // . — 1996. — . — Vol. 469. — P. 740.
10. *Hirashita H., Yan H.* Shattering and coagulation of dust grains in interstellar turbulence // . — 2009. — . — Vol. 394. — Pp. 1061–1074.

11. *Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H.* The size distribution of interstellar grains. // . — 1977. — Oct. — Vol. 217. — Pp. 425–433.
12. *Desert F.-X., Boulanger F., Puget J. L.* Interstellar dust models for extinction and emission // . — 1990. — . — Vol. 237. — Pp. 215–236.
13. *Li A., Draine B. T.* Infrared Emission from Interstellar Dust. II. The Diffuse Interstellar Medium // . — 2001. — . — Vol. 554. — Pp. 778–802.
14. *Zubko V., Dwek E., Arendt R. G.* Interstellar Dust Models Consistent with Extinction, Emission, and Abundance Constraints // . — 2004. — . — Vol. 152. — Pp. 211–249.
15. The evolution of amorphous hydrocarbons in the ISM: dust modelling from a new vantage point / A. P. Jones, L. Fanciullo, M. Köhler et al. // . — 2013. — . — Vol. 558. — P. A62.
16. *Siebenmorgen R., Voshchinnikov N. V., Bagnulo S.* Dust in the diffuse interstellar medium. Extinction, emission, linear and circular polarisation // . — 2014. — . — Vol. 561. — P. A82.
17. The global dust SED: tracing the nature and evolution of dust with DustEM / M. Compiègne, L. Verstraete, A. Jones et al. // . — 2011. — . — Vol. 525. — P. A103.
18. The global dust modelling framework THEMIS / A. P. Jones, M. Köhler, N. Ysard et al. // . — 2017. — . — Vol. 602. — P. A46.
19. *Hou J. L., Prantzos N., Boissier S.* Abundance gradients and their evolution in the Milky Way disk // . — 2000. — Oct. — Vol. 362. — Pp. 921–936.
20. *Shinn Jong-Ho.* Candidate List of Edge-on Galaxies with Substantial Extraplanar Dust // . — 2018. — Dec. — Vol. 239, no. 2. — P. 21.
21. *Sethi Shiv K., Shchekinov Yuri, Nath Biman B.* The Mysterious 6565 Å Absorption Feature of the Galactic Halo // . — 2017. — Dec. — Vol. 850, no. 2. — P. L20.
22. *Hawkins Isabel, Wright Edward L.* Needling the Early Universe // . — 1988. — Jan. — Vol. 324. — P. 46.

23. *Faber S. M., Gallagher J. S.* H I in early-type galaxies. II. Mass loss and galactic winds. // . — 1976. — Mar. — Vol. 204. — Pp. 365–378.
24. *Зельдович Я.Б. Сюняев Р.А.* Астрофизика и космическая физика. — Москва: Наука, 1984.
25. *Shustov B. M., Vibe D. Z.* The sweeping of dust out of the Galaxy // . — 1995. — Oct. — Vol. 72. — P. 650.
26. *Khoperskov S. A., Shchekinov Yu. A.* Transport of charged dust grains into the galactic halo // *arXiv e-prints*. — 2014. — Mar. — P. arXiv:1403.7075.
27. Metal Enrichment of the Intergalactic Medium in Cosmological Simulations / Anthony Aguirre, Lars Hernquist, Joop Schaye et al. // . — 2001. — Nov. — Vol. 561, no. 2. — Pp. 521–549.
28. *Bianchi Simone, Ferrara Andrea.* Intergalactic medium metal enrichment through dust sputtering // . — 2005. — Apr. — Vol. 358, no. 2. — Pp. 379–396.
29. Galactic winds driven by cosmic ray streaming / M. Uhlig, C. Pfrommer, M. Sharma et al. // . — 2012. — Jul. — Vol. 423, no. 3. — Pp. 2374–2396.
30. *Chiao R. Y., Wickramasinghe N. C.* Radiation-driven efflux and circulation of dust in spiral galaxies // . — 1972. — Jan. — Vol. 159. — P. 361.
31. *Savage B. D., de Boer K. S.* Ultraviolet absorption by interstellar gas at large distances from the galactic plane. // . — 1981. — Jan. — Vol. 243. — Pp. 460–484.
32. *Cowie Lennox L., Songaila Antoinette.* Heavy-element enrichment in low-density regions of the intergalactic medium // . — 1998. — Jul. — Vol. 394, no. 6688. — Pp. 44–46.
33. *Gail H.-P., Sedlmayr E.* Physics and Chemistry of Circumstellar Dust Shells. — Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
34. The Structure, Origin, and Evolution of Interstellar Hydrocarbon Grains / J. E. Chiar, A. G. G. M. Tielens, A. J. Adamson, A. Ricca // . — 2013. — . — Vol. 770. — P. 78.

35. *García-Hernández D. A., Górný S. K.* Chemical abundances in Galactic planetary nebulae with Spitzer spectra // . — 2014. — . — Vol. 567. — P. A12.
36. *Duley W. W., Williams D. A.* The infrared spectrum of interstellar dust - Surface functional groups on carbon // . — 1981. — . — Vol. 196. — Pp. 269–274.
37. *Duley W. W.* Fluctuations in Interstellar Grain Temperatures // . — 1973. — . — Vol. 23. — Pp. 43–50.
38. *Sellgren K., Werner M. W., Dinerstein H. L.* Extended near-infrared emission from visual reflection nebulae // . — 1983. — . — Vol. 271. — Pp. L13–L17.
39. *Jones A. P.* Variations on a theme - the evolution of hydrocarbon solids. I. Compositional and spectral modelling - the eRCN and DG models // . — 2012. — . — Vol. 540. — P. A1.
40. *Jones A. P.* Variations on a theme - the evolution of hydrocarbon solids. II. Optical property modelling - the optEC_(s) model // . — 2012. — . — Vol. 540. — P. A2.
41. *Jones A. P.* Variations on a theme - the evolution of hydrocarbon solids. III. Size-dependent properties - the optEC_(s)(a) model // . — 2012. — . — Vol. 542. — P. A98.
42. *Jones A. P.* Variations on a theme - the evolution of hydrocarbon solids (Corrigendum). II. Optical property modelling - the optEC_(s) model // . — 2012. — . — Vol. 545. — P. C2.
43. *Jones A. P.* Variations on a theme - the evolution of hydrocarbon solids (Corrigendum). III. Size-dependent properties - the optEC_(s)(a) model // . — 2012. — . — Vol. 545. — P. C3.
44. *Voshchinnikov N. V., Il'in V. B., Henning T.* Modelling the optical properties of composite and porous interstellar grains // . — 2005. — . — Vol. 429. — Pp. 371–381.
45. *Observational Studies on the Near-infrared Unidentified Emission Bands in Galactic H II Regions / T. I. Mori, T. Onaka, I. Sakon et al.* // . — 2014. — . — Vol. 784. — P. 53.

46. Spatial Variation of the 3.29 and 3.40 Micron Emission Bands within Reflection Nebulae and the Photochemical Evolution of Methylated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons / C. Joblin, A. G. G. M. Tielens, L. J. Allamandola, T. R. Geballe // . — 1996. — . — Vol. 458. — P. 610.
47. *Hirashita H., Yan H.* Shattering and coagulation of dust grains in interstellar turbulence // . — 2009. — . — Vol. 394. — Pp. 1061–1074.
48. *Guillet V., Pineau Des Forêts G., Jones A. P.* Shocks in dense clouds. III. Dust processing and feedback effects in C-type shocks // . — 2011. — . — Vol. 527. — P. A123.
49. *Mathis J. S., Mezger P. G., Panagia N.* Interstellar radiation field and dust temperatures in the diffuse interstellar matter and in giant molecular clouds. // . — 1983. — Nov. — Vol. 500. — Pp. 259–276.
50. *Weingartner J. C., Draine B. T.* Dust Grain Size Distributions and Extinction in the Milky Way, LMC, and SMC // American Astronomical Society Meeting Abstracts. — Vol. 197. — 2000. — Dec. — P. 42.07.
51. *Smoluchowski M. V.* Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Bewegung und Koagulation von Kolloidteilchen // *Zeitschrift für Physik*. — 1916. — Vol. 17. — Pp. 557–585.
52. *Dullemond C. P., Dominik C.* Dust coagulation in protoplanetary disks: A rapid depletion of small grains // . — 2005. — . — Vol. 434. — Pp. 971–986.
53. *Akimkin V. V.* A possible mechanism for overcoming the electrostatic barrier against dust growth in protoplanetary disks // *Astronomy Reports*. — 2015. — . — Vol. 59. — Pp. 747–761.
54. SUNDIALS: Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers / Alan C Hindmarsh, Peter N Brown, Keith E Grant et al. // *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*. — 2005. — Vol. 31, no. 3. — Pp. 363–396.
55. *Micelotta E. R., Jones A. P., Tielens A. G. G. M.* Polycyclic aromatic hydrocarbon processing in a hot gas // . — 2010. — . — Vol. 510. — P. A37.

56. Small hydrocarbon particle erosion in a hot gas. A comparative study / M. Bocchio, E. R. Micelotta, A.-L. Gautier, A. P. Jones // . — 2012. — . — Vol. 545. — P. A124.
57. *J.F. Ziegler J.P. Biersack U. Littmark*. The stopping and range of ions in solids. — New York, USA: Pergamon, 1985.
58. *Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J.* Grain Shattering in Shocks: The Interstellar Grain Size Distribution // . — 1996. — . — Vol. 469. — P. 740.
59. *Serra Díaz-Cano L., Jones A. P.* Carbonaceous dust in interstellar shock waves: hydrogenated amorphous carbon (a-C:H) vs. graphite // . — 2008. — . — Vol. 492. — Pp. 127–133.
60. *Hirashita H.* Shattering by turbulence as a production source of very small grains // . — 2010. — . — Vol. 407. — Pp. L49–L53.
61. *Smith F. W.* Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. I. Photodissociation rates for the loss of an acetylenic group. // *Journal of Applied Physics*. — 1984. — Vol. 55. — P. 764.
62. UV photodestruction of CH bonds and the evolution of the 3.4 μm feature carrier. II. The case of hydrogenated carbon grains / V. Mennella, G. M. Muñoz Caro, R. Ruiterkamp et al. // . — 2001. — Feb. — Vol. 367. — Pp. 355–361.
63. Laboratory and Theoretical Simulation of 3.4 μm Spectra of Hydrocarbons in Interstellar Sources / W. W. Duley, V. I. Grishko, J. Kenel et al. // . — 2005. — Jun. — Vol. 626, no. 2. — Pp. 933–939.
64. *Tamor M. A., Wu C. H.* Graphitic network models of “diamondlike” carbon // *Journal of Applied Physics*. — 1990. — Jan. — Vol. 67, no. 2. — Pp. 1007–1012.
65. *Jones A. P.* Carbon atom clusters in random covalent networks: PAHs as an integral component of interstellar HAC // . — 1990. — Nov. — Vol. 247. — Pp. 305–310.
66. *Gadallah K. A. K., Mutschke H., Jäger C.* UV irradiated hydrogenated amorphous carbon (HAC) materials as a carrier candidate of the interstellar UV bump at 217.5 nm // . — 2011. — Apr. — Vol. 528. — P. A56.

67. Laboratory Formation of Fullerenes from PAHs: Top-down Interstellar Chemistry / Junfeng Zhen, Pablo Castellanos, Daniel M. Paardekooper et al. // . — 2014. — Dec. — Vol. 797, no. 2. — P. L30.
68. *M. Nic J. Jirat B. Kosata*. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, (the "Gold Book"), online version. — Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1997.
69. Dust Destruction in a Non-radiative Shock in the Cygnus Loop Supernova Remnant / R. Sankrit, B. J. Williams, K. J. Borkowski et al. // . — 2010. — . — Vol. 712. — Pp. 1092–1099.
70. Grain Destruction in a Supernova Remnant Shock Wave / John C. Raymond, Parviz Ghavamian, Brian J. Williams et al. // . — 2013. — Dec. — Vol. 778, no. 2. — P. 161.
71. The dust properties of bubble H II regions as seen by Herschel / L. D. Anderson, A. Zavagno, L. Deharveng et al. // . — 2012. — . — Vol. 542. — P. A10.
72. *Pavlyuchenkov Y. N., Kirsanova M. S., Wiebe D. S.* Infrared emission and the destruction of dust in HII regions // *Astronomy Reports*. — 2013. — . — Vol. 57. — Pp. 573–585.
73. Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains / V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe // . — 2015. — . — Vol. 449. — Pp. 440–450.
74. Detecting stellar-wind bubbles through infrared arcs in H II regions / J. Mackey, T. J. Haworth, V. V. Gvaramadze et al. // . — 2016. — . — Vol. 586. — P. A114.
75. *Draine B. T.* On Radiation Pressure in Static, Dusty H II Regions // . — 2011. — . — Vol. 732. — P. 100.
76. A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material / L. Deharveng, F. Schuller, L. D. Anderson et al. // . — 2010. — . — Vol. 523. — P. A6.

77. *Hirashita Hiroyuki, Lin Chih-Yu.* Dust abundance and grain size in galaxy halos // *arXiv e-prints*. — 2018. — Apr. — P. arXiv:1804.00848.
78. Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. I. The solar neighbourhood / S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, R. E. Luck et al. // . — 2002. — Jan. — Vol. 381. — Pp. 32–50.
79. *Luck R. E., Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M.* The Distribution of the Elements in the Galactic Disk // . — 2006. — Aug. — Vol. 132, no. 2. — Pp. 902–918.
80. A mechanism for the formation of oxygen and iron bimodal radial distribution in the disc of our Galaxy / I. A. Acharova, J. R. D. Lépine, Yu. N. Mishurov et al. // . — 2010. — Feb. — Vol. 402, no. 2. — Pp. 1149–1155.
81. *Gehrz R. D. eds. Allamandola L. J., Tielens A. G. G. M.* Interstellar dust // *Springer, Dordrecht*. — 1989. — P. 445.
82. *Wickramasinghe N. C.* On the injection of grains into interstellar clouds // . — 1972. — Jan. — Vol. 159. — P. 269.
83. *Siebert A., Bienaymé O., Soubiran C.* Vertical distribution of Galactic disk stars. II. The surface mass density in the Galactic plane // . — 2003. — Feb. — Vol. 399. — Pp. 531–541.
84. *B.T. Draine.* Preprint № 231. — Princeton: Princeton Observatory, 1987.
85. Anomalous Silicate Dust Emission in the Type 1 Liner Nucleus of M81 / Howard A. Smith, Aigen Li, M. P. Li et al. // . — 2010. — Jun. — Vol. 716, no. 1. — Pp. 490–503.
86. Rosseland and Planck mean opacities for protoplanetary discs / D. Semenov, Th. Henning, Ch. Helling et al. // . — 2003. — Nov. — Vol. 410. — Pp. 611–621.
87. *Sofue Yoshiaki, Fujimoto Mitsuaki.* The vertical large-scale magnetic fields in spiral galaxies // . — 1987. — Jan. — Vol. 39, no. 6. — Pp. 843–848.
88. *Андреасян Р. Р. Макаров А. Н.* // *Астрофизика*. — 1989. — Vol. 130. — P. 170.

89. *К.У. Аллен.* Астрофизические величины. — Москва: Мир, 1977.
90. *Kalberla Peter M. W., Kerp Jürgen.* The Hi Distribution of the Milky Way // . — 2009. — Sep. — Vol. 47, no. 1. — Pp. 27–61.
91. *Cherchneff I.* The formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in evolved circumstellar environments // EAS Publications Series / Ed. by C. Joblin, A. G. G. M. Tielens. — Vol. 46 of *EAS Publications Series*. — 2011. — Mar. — Pp. 177–189.
92. *Bresolin Fabio, Kennicutt Robert C., Ryan-Weber Emma.* Gas Metallicities in the Extended Disks of NGC 1512 and NGC 3621. Chemical Signatures of Metal Mixing or Enriched Gas Accretion? // . — 2012. — May. — Vol. 750, no. 2. — P. 122.
93. The expulsion and retention of dust grains by galactic discs / J. I. Davies, P. Alton, S. Bianchi, M. Trewhella // . — 1998. — Nov. — Vol. 300, no. 4. — Pp. 1006–1014.
94. Large-scale behaviour of dust grains in a galactic environment. / B. Barsella, F. Ferrini, J. M. Greenberg, S. Aiello // . — 1989. — Jan. — Vol. 209. — Pp. 349–360.
95. *Sofia U. J., Cardelli J. A., Savage B. D.* The Abundant Elements in Interstellar Dust // American Astronomical Society Meeting Abstracts. — Vol. 183. — 1993. — Dec. — P. 14.01.
96. Chemical abundance gradients from open clusters in the Milky Way disk: Results from the APOGEE survey / K. Cunha, P. M. Frinchaboy, D. Souto et al. // *Astronomische Nachrichten*. — 2016. — Sep. — Vol. 337, no. 8-9. — P. 922.
97. *Luck R. Earle, Lambert David L.* The Distribution of the Elements in the Galactic Disk. III. A Reconsideration of Cepheids from $l = 30$ to 250 // . — 2011. — Oct. — Vol. 142, no. 4. — P. 136.
98. *Spitoni E., Matteucci F.* The effect of radial gas flows on the chemical evolution of the Milky Way and M31 // *arXiv e-prints*. — 2015. — Feb. — P. arXiv:1502.01836.

99. *Prantzos N., Boissier S.* Chemo-spectrophotometric evolution of spiral galaxies - III. Abundance and colour gradients in discs // . — 2000. — Apr. — Vol. 313, no. 2. — Pp. 338–346.
100. Gas accretion as the origin of chemical abundance gradients in distant galaxies / G. Cresci, F. Mannucci, R. Maiolino et al. // . — 2010. — Oct. — Vol. 467, no. 7317. — Pp. 811–813.
101. *Chiappini C.* A New Picture for the Chemical Evolution of the Galaxy: the Two Infall Model // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series. — Vol. 11. — 2001. — Jul. — P. 171.
102. *Mott A., Spitoni E., Matteucci F.* Abundance gradients in spiral discs: is the gradient inversion at high redshift real? // . — 2013. — Nov. — Vol. 435, no. 4. — Pp. 2918–2930.
103. *Taylor Philip, Kobayashi Chiaki.* The metallicity and elemental abundance gradients of simulated galaxies and their environmental dependence // . — 2017. — Nov. — Vol. 471, no. 4. — Pp. 3856–3870.
104. The Pristine survey IV: approaching the Galactic metallicity floor with the discovery of an ultra-metal-poor star / Else Starkenburg, David S. Aguado, Piercarlo Bonifacio et al. // . — 2018. — Dec. — Vol. 481, no. 3. — Pp. 3838–3852.
105. *Grisoni V., Spitoni E., Matteucci F.* Abundance gradients along the Galactic disc from chemical evolution models // . — 2018. — Dec. — Vol. 481, no. 2. — Pp. 2570–2580.
106. The Origin of the Milky Way’s Halo Age Distribution / Daniela Carollo, Patricia B. Tissera, Timothy C. Beers et al. // . — 2018. — May. — Vol. 859, no. 1. — P. L7.
107. *Lacey C. G., Fall S. M.* Chemical evolution of the galactic disk with radial gas flows. // . — 1985. — Mar. — Vol. 290. — Pp. 154–170.
108. *Simakov S. G.* On the chemical evolution of the disc galaxies. // . — 1993. — Apr. — Vol. 70. — Pp. 277–291.

109. *Portinari L., Chiosi C.* On radial gas flows, the Galactic Bar and chemical evolution in the Galactic Disc // . — 2000. — Mar. — Vol. 355. — Pp. 929–948.

Список рисунков

1.1	Зависимость фактора эффективности поглощения Q_{abs} от длины волны при фиксированном значении $E_{\text{gap}} = 0.1$ эВ для углеводородных пылинок с радиусами от 3.3 до 30 000 Å (при уменьшении размера цвет меняется от оранжевого к черному). а) Полностью ароматизованные пылинки с радиусом не больше 200 Å. Для более крупных пылинок предполагается, что ароматизована только оболочка толщиной 200 Å. б) Полностью ароматизованные пылинки независимо от размера.	15
1.2	Зависимость фактора эффективности поглощения Q_{abs} от длины волны для пылинок радиусом 10 Å и значений E_{gap} от 2.67 до 0.1 эВ (при увеличении E_{gap} цвет меняется от оранжевого к синему).	16
1.3	Эволюция распределения пылинок по размерам при температуре $T = 10^5$ К, скорости столкновений с частицами газа 100 км/с, концентрации газа 1 см^{-3}	27
1.4	Эволюция распределения пылинок по размерам при температуре $T = 10^4$ К, скорости столкновений с частицами газа 1 км/с, концентрации газа 100 см^{-3}	28
1.5	Разрушение ансамбля пылевых частиц. Зависимость общей массы пыли от времени.	29
1.6	Изменение массы пылевого ансамбля. t_e — характерное время разрушения.	30
1.7	Изменение массы пылевого ансамбля и отдельных видов пылинок.	31
1.8	Разрушение пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 1$ км/с, $T = 10^6$ К, $N = 0.1 \text{ см}^{-3}$ а) за счет дробления, б) за счет столкновений с частицами газа.	31
1.9	Разрушение пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 1$ км/с, $T = 10^6$ К, $N = 1000 \text{ см}^{-3}$ а) за счет дробления, б) за счет столкновений с частицами газа	32
1.10	Зависимость темпа разрушения пыли от температуры и скорости столкновений с частицами газа.	33

1.11	Зависимость темпа разрушения ПАУ от температуры и скорости столкновений с частицами газа.	34
1.12	Зависимость темпа разрушения крупной пыли от температуры и скорости столкновений с частицами газа.	34
1.13	Зависимость массы пыли от времени для условий, соответствующих остатку сверхновой в созвездии Лебеда.	35
1.14	Зависимость распределения пыли по размерам от времени для условий, соответствующих остатку сверхновой в созвездии Лебеда.	36
1.15	Радиальное распределение концентрации пылинок а-С:Н и а-С с радиусом $5 \text{ \AA}$ для различных моментов времени. 1 — начальное распределение пыли (все пылинки гидрогенизированны); 2 — распределение пылинок а-С через 10 тыс. лет; 3 — распределение пылинок а-С:Н через 10 тыс. лет; 4 — распределение пылинок а-С через 100 тыс. лет; 5 — распределение пылинок а-С через 100 тыс. лет.	38
1.16	То же, что на рис. 1.15 для пылинок с радиусом $9 \text{ \AA}$	39
1.17	То же, что на рис. 1.15 для пылинок с радиусом $100 \text{ \AA}$	40
1.18	То же, что на рис. 1.15 для пылинок с радиусом $2500 \text{ \AA}$	40
1.19	Ароматизация пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 100 \text{ км/с}$, $T = 10^6 \text{ К}$, $N = 0.1 \text{ см}^{-3}$	41
1.20	Ароматизация пылинок в случае $v_{\text{gas}} = 1 \text{ км/с}$, $T = 10^4 \text{ К}$, $N = 100 \text{ см}^{-3}$	42
2.1	Зависимость фактора эффективности давления излучения от длины волны. а) Для графитовых пылинок (синие кривые) и для ПАУ (красные кривые). Пунктирные линии — $10 \text{ \AA}$, штриховые линии — $100 \text{ \AA}$, сплошная линия — $1000 \text{ \AA}$; б) для силикатных пылинок (зеленые кривые) и для пористых силикатных пылинок с пористостью 50% (черные кривые), красная кривая показывает зависимость для пористых силикатных пылинок с пористостью 70%. Пунктирные линии — $10 \text{ \AA}$, штриховые линии — $100 \text{ \AA}$, сплошные линии — $1000 \text{ \AA}$	47

2.2	Зависимость фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды. а) Для графитовых пылинок (синие кривые) и для ПАУ (красные кривые). Пунктирные линии — $10 \text{ \AA}$, штриховые линии — $100 \text{ \AA}$, сплошная линия — $1000 \text{ \AA}$; б) для силикатных пылинок (зеленые кривые) и для пористых силикатных пылинок с пористостью 50% (черные кривые). Пунктирные линии — $10 \text{ \AA}$, штриховые линии — $100 \text{ \AA}$, сплошные линии — $1000 \text{ \AA}$	48
2.3	Зависимость высоты, начиная с которой пыль покидает пределы диска Галактики, от начальной координаты вдоль галактического радиуса; пунктирная линия — $10 \text{ \AA}$, штриховая линия — $100 \text{ \AA}$, сплошная линия — $1000 \text{ \AA}$	52
2.4	Примеры треков пылинок; пунктирная линия — $10 \text{ \AA}$, сплошная линия — $100 \text{ \AA}$. Начальное положение по галактоцентрическому радиусу: а) 5 кпк, б) 10 кпк, в) 15 кпк	53
2.5	Зависимость поверхностной плотности скорости потери массы в зависимости от галактоцентрического расстояния для углеводородных пылинок. Пунктирная линия — $10 \text{ \AA}$, штриховая линия — $100 \text{ \AA}$, сплошная линия — $1000 \text{ \AA}$	54
2.6	Зависимость поверхностной плотности скорости потери пылевой массы в абсолютных величинах (оранжевая линия) и нормированной поверхностной плотностью газа (синяя линия), от галактоцентрического расстояния.	55
2.7	Распределение пылинок в окологалактическом пространстве.	56
2.8	Распределение плотности пыли в окологалактическом пространстве. При уменьшении плотности пыли цвет меняется от желтого к синему.	57
3.1	Зависимость фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды для графитовых пылинок, вычисленного по формуле (2.2) (синие кривые) и по формуле (3.1) (черные кривые); пунктирная линия — $10 \text{ \AA}$, штриховая линия — $100 \text{ \AA}$, сплошная линия — $1000 \text{ \AA}$. Красными точками показаны значения, принятые в работе [93].	64

3.2	Зависимость положения графитовой пылинки по галактической высоте от времени. а) Для пылинок с радиусом $10 \text{ \AA}$; б) для пылинок с радиусом $100 \text{ \AA}$; в) для пылинок с радиусом $1000 \text{ \AA}$. Черные траектории посчитаны для значений Q_{pr} в приближении рэлеевского рассеяния; синие траектории посчитаны для значений Q_{pr} , усредненных по планковскому распределению энергии в спектре; красные траектории посчитаны для Q_{pr} , взятых из работы [93].	65
3.3	Траектория пылинки с начальным радиусом $1000 \text{ \AA}$ за время 4.56 млрд. лет с учетом разрушения.	67
A.1	Зависимость показателя скорости разрушения пыли от начальной концентрации.	88
B.1	Зависимость фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды для различных размеров графитовых пылинок от 100 до $1000 \text{ \AA}$	92

Список таблиц

3.1	Параметры типов звезд в упрощенной модели.	60
Б.1	Значения фактора эффективности давления излучения для трех значений радиуса графитовой пылинки	89
Б.2	Значения фактора эффективности давления излучения для двух значений радиуса ПАУ	90
Б.3	Значения фактора эффективности давления излучения для трех значений радиуса силикатной пылинки	91

Приложение А

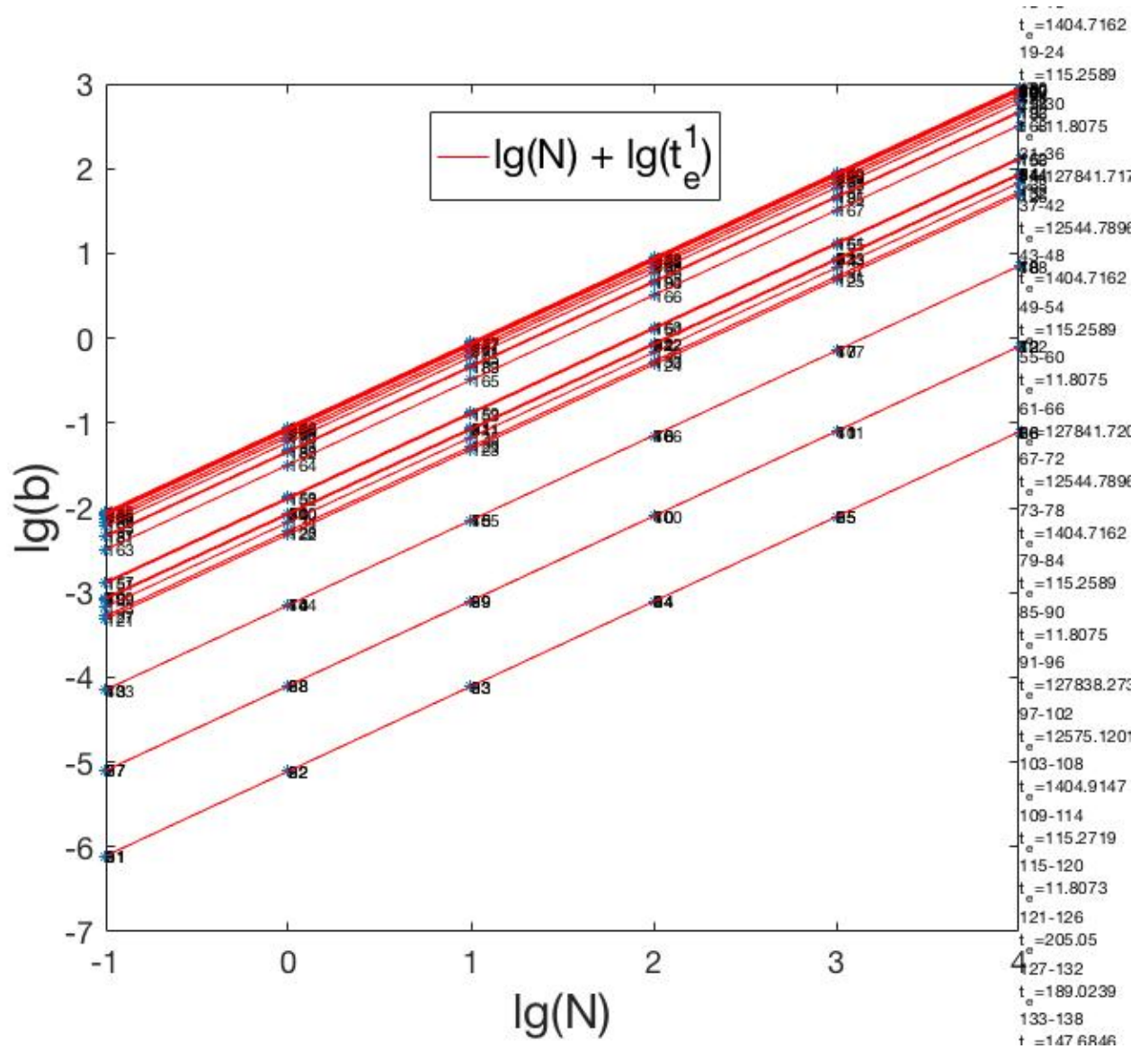


Рисунок А.1 — Зависимость показателя скорости разрушения пыли от начальной концентрации.

Приложение Б

Таблица Б.1

Значения фактора эффективности давления излучения для трех
значений радиуса графитовой пылинки

$T_{eff}, \text{ K}$	$a = 10\text{\AA}$	$a = 100\text{\AA}$	$a = 1000\text{\AA}$
40000	0.128926	1.172596	1.459587
28000	0.084668	0.871460	1.645877
15500	0.037686	0.414373	1.946251
9900	0.021169	0.226903	2.0
8500	0.015957	0.170771	2.0
7400	0.011975	0.127835	1.969263
6580	0.009318	0.099043	1.879935
6030	0.007760	0.082101	1.794049
5520	0.006496	0.068344	1.691331
4900	0.005186	0.054140	1.531285
4130	0.003856	0.039841	1.272093
3480	0.002921	0.029951	1.002337
2800	0.002074	0.021137	0.688461
5600	0.006682	0.070375	1.709066
5000	0.005382	0.056253	1.559926
4500	0.004460	0.046304	1.405247
3800	0.003364	0.034614	1.140368
5700	0.006922	0.072981	1.730360
4850	0.005091	0.053107	1.516539
4100	0.003810	0.039347	1.260608
3500	0.002948	0.030232	1.011220

Таблица Б.2

Значения фактора эффективности давления излучения для двух значений радиуса ПАУ

$T_{eff}, \text{ K}$	$a = 10\text{\AA}$	$a = 100\text{\AA}$
40000	0.179633	1.269701
28000	0.130667	0.941169
15500	0.063436	0.444857
9900	0.034076	0.241993
8500	0.025018	0.181300
7400	0.017879	0.134646
6580	0.012920	0.103162
6030	0.009923	0.084544
5520	0.007456	0.069389
4900	0.004925	0.053764
4130	0.002553	0.038251
3480	0.001214	0.027883
2800	0.000408	0.019105
5600	0.007821	0.071628
5000	0.005296	0.056083
4500	0.003585	0.045214
3800	0.001799	0.032716
5700	0.008289	0.074499
4850	0.004745	0.179123
4100	0.002478	0.052633
3500	0.001247	0.028171

Таблица Б.3

Значения фактора эффективности давления излучения для трех значений радиуса силикатной пылинки

T_{eff}, K	$a = 10\text{\AA}$	$a = 100\text{\AA}$	$a = 1000\text{\AA}$
40000	0.048231	0.471905	1.152518
28000	0.030822	0.317693	1.085144
15500	0.006142	0.068234	0.697832
9900	0.001020	0.011259	0.354004
8500	0.000606	0.006526	0.266036
7400	0.000431	0.004534	0.202337
6580	0.000354	0.003661	0.159531
6030	0.000316	0.003245	0.133515
5520	0.000287	0.002929	0.111495
4900	0.000256	0.002594	0.087547
4130	0.000219	0.002208	0.062125
3480	0.000188	0.001896	0.044332
2800	0.000158	0.001585	0.029404
5600	0.000292	0.002976	0.114811
5000	0.000261	0.002645	0.091199
4500	0.000236	0.002391	0.073749
3800	0.000203	0.002049	0.052673
5700	0.000297	0.003035	0.119030
4850	0.000253	0.002568	0.085752
4100	0.000217	0.002194	0.061230
3500	0.000189	0.001906	0.044829

Приложение В

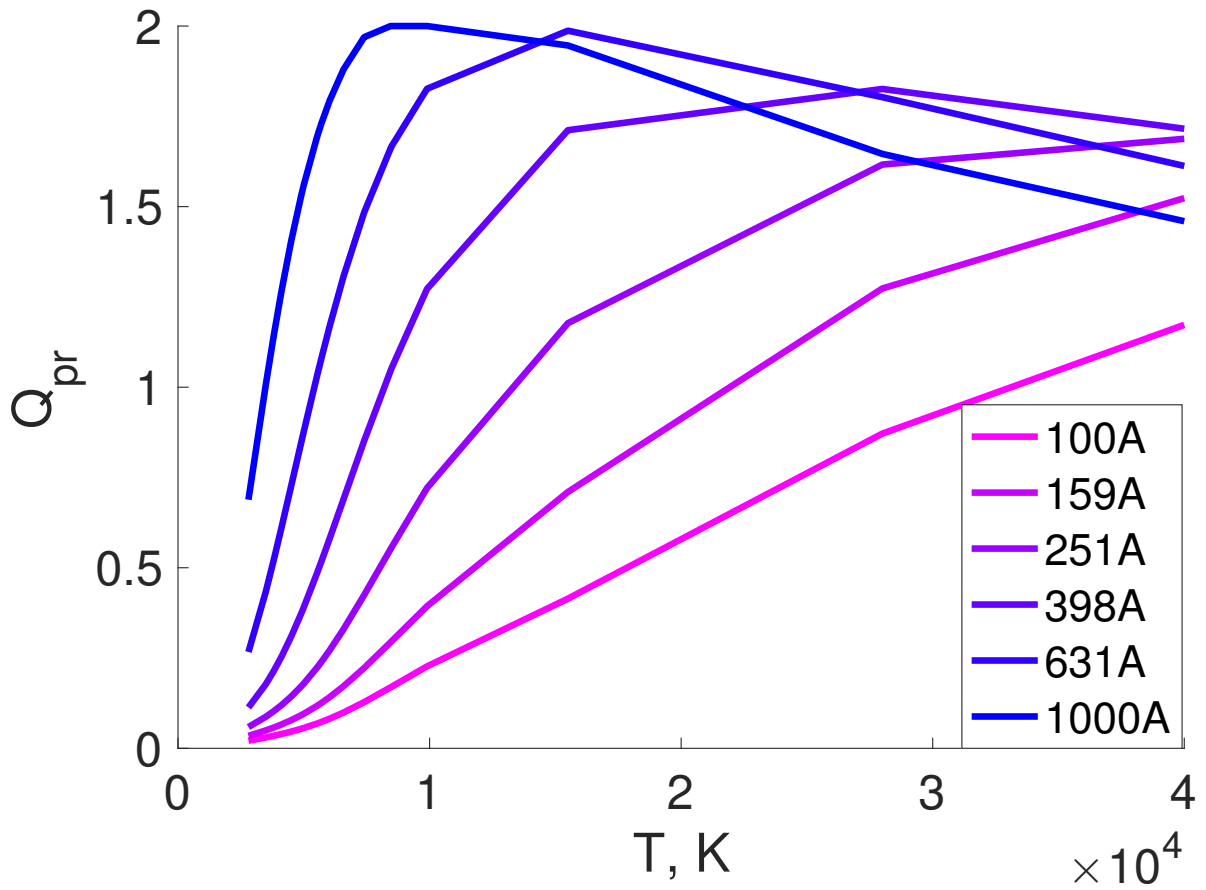


Рисунок В.1 — Зависимость фактора эффективности давления излучения от эффективной температуры звезды для различных размеров графитовых пылинок от 100 до 1000 Å.