**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»   
им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | И | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | И1 | | | | | | |
|  |  | |  |  | | | | |  | | | | | |  | | |
| Выпускающая кафедра | И1 | |  | | Борейшо А.С. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  |  | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | И1M41 | |  | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | | | | | 20\_\_\_ г. | | |
|  |  | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | о научно-исследовательской работе | | | | | | | | | | | | | | | | |  |
| наименование практики | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Сементина Владимира Валерьевича | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | | | | 12.04.05 | | | |  | | Лазерная техника и лазерные | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | | | | код | | | | |  | | полное наименование направления/специальности | | | | |
| технологии | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики:** | | | | | | | Борейшо А.С., д.т.н., профессор кафедры И1 | | | | | | | | | | | |
|  | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | | | с | | 03.09.2018 | | | | | | | г. |  | по | 15.12.2018 | | г. |
| **Должность обучающегося на практике:** | | | | | | | | младший научный сотрудник | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель практики:** | | | |  | |  | |
|  | |  | | Борейшо А.С. | |  | |
| Подпись | |  | | Фамилия ИО | |  | |
| «\_\_\_» | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | 20\_\_г. | |  | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

Оглавление

[Введение 3](#_Toc533117490)

[1 Организация труда на научно-производственном предприятии 5](#_Toc533117491)

[2 Анализ современного состояния научной проблемы 9](#_Toc533117492)

[2.1 Состояние вопроса на текущий момент 9](#_Toc533117493)

[2.2. Теоретическое обоснование 15](#_Toc533117494)

[Заключение 24](#_Toc533117495)

[Список использованных источников 26](#_Toc533117496)

# Введение

Солнечная система, помимо крупных и карликовых объектов, содержит в себе также множество мелкодисперсных пылевых частиц. Мелкодисперсные пылевые частицы обнаруживаются в межпланетном космическом пространстве, в плазме ионосфер и магнитосфер планет Солнечной системы, в планетарных кольцах, в окрестностях космических тел, которые не обладают собственной атмосферы — Луна, Меркурий, астероиды, кометы и др. Пожалуй, есть лишь одно исключение из этого правила — собственно Солнце и область в непосредственной близости от него, где из-за высоких температур пыль в мелкодисперсном твердом виде существовать не может. Рассеяние солнечного излучения на частицах межпланетной пыли формирует F-компоненту спектра солнечной короны.

Научный интерес представляет оценка влияния лазерного излучения на свободные пылевые макрочастицы. Исследование процессов фотоэлектронной и термоэлектронной эмиссии при воздействии коротких лазерных импульсов на пылевые макрочастицы накладывает некоторые ограничения, основное из которых – невозможность наблюдения вышеописанных эффектов в условиях атмосферы, ведь для их поддержания требуется наличие вакуума. Данное обстоятельство в свою очередь накладывает конструктивные особенности на лабораторную установку.

Кроме того, если время импульса будет достаточно малым, а пиковая мощность – большой, то при соответствующей большой плотности мощности (достигаемая уменьшением размера лазерного пучка) может наблюдаться такое явление, как многофотонная ионизация [1]. Иными словами, для наблюдения данного явления требуются высокие интенсивности света, достаточные для реализации многофотонных процессов, когда в элементарном акте взаимодействия поглощается несколько фотонов. Теория этого явления была известна еще до изобретения лазеров, но только с их появлением стало возможным экспериментальное наблюдение вышеописанных эффектов. Результатом всех вышеописанных процессов может являться возникновение пылевой плазмы, обладающей характерными особенностями, например, способностью в условиях микрогравитации и электростатического поля выстраиваться в пространственные структуры, выстраиваться в определенные структуры и, будучи в агрегатном состоянии ионизированного газа, проявлять свойства твердых тел и жидкостей [2]. Пылевая плазма, иначе называемая коллоидной или комплексной, появляется в результате воздействия внешних факторов на пылевые частицы или мельчайшие капли. Такая плазма существенно влияет на свойства и динамику среды.

Таким образом, цель данной работы – исследовать процессы эмиссий различной природы на свободно падающих в вакууме твердых макроскопических частицах. Для достижения цели требуется выполнить ряд задач, одна из которых – разработка макетного стенда, обеспечивающий необходимые условия и параметры для проведения экспериментов по исследованию эмиссии электронов. Также одной из задач является экспериментальная оценка и анализ эмиссий электронов с пылевых макрочастиц при помощи измерительной системы.

# 1 Организация труда на научно-производственном предприятии

Организация предприятия, предоставляющего поле исследований и практику в сфере лазерных технологий АО «Лазерные системы» (бывший НПП «Лазерные системы»), представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 - Структура предприятия

Все научные исследования происходят внутри научного отдела предприятия, а научный руководитель предприятия отвечает за курирование проектов, за контролем процесса работ научных сотрудников. Как видно, научный отдел работает независимо от других отделов предприятия, но, несмотря на это, все они поддерживают работу как научного отдела, так и предприятия в целом.

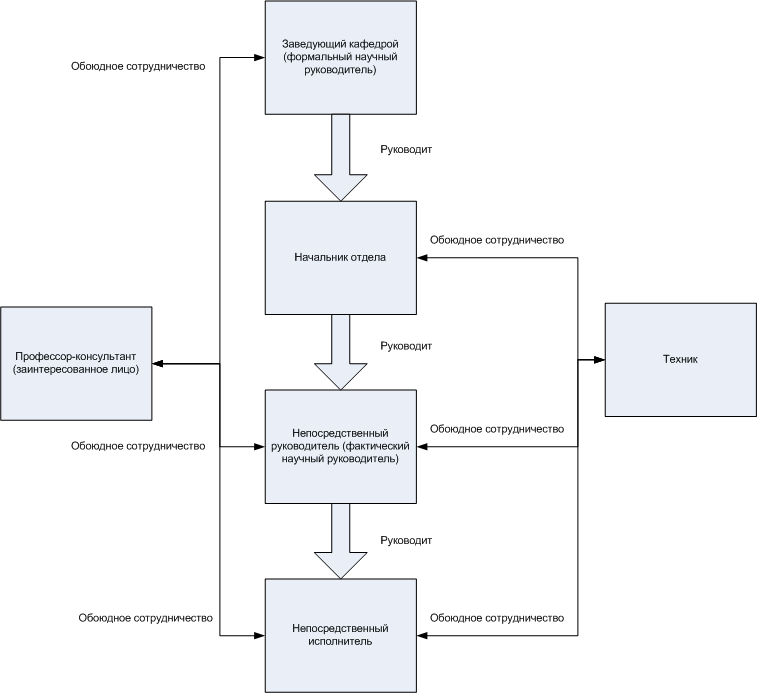
Рассмотрим более частную структуру – структуру заинтересованных в эксперименте по исследованию эмиссии электронов с пылевых макрочастиц сотрудников. Организационная структура заинтересованных в эксперименте лиц представлена на рисунке 2.

Рисунок 2 - Организационная структура

Итак, эксперимент исполняется при поддержке довольно большой группы заинтересованных лиц, основное из которых - непосредственный исполнитель эксперимента, коим является автор работы. В его задачи входит контроль оборудования (совокупности всех рабочих узлов) и его первичное обслуживание, мелкий ремонт, контроль методики проведения эксперимента, непосредственное проведение эксперимента, первичная обработка результата, оптимизация процесса измерений и обработки результатов.

Вышеописанного работника курирует его непосредственный руководитель – фактический научный руководитель. Его обязанности практически такие же, как и у непосредственного исполнителя, плюс к этому, непосредственный начальник является связующим звеном с вышестоящим начальством, а также помогает решать вопросы по деталям экспериментов и решать более серьезные проблемы, возникающие по ходу деятельности проекта.

Далее по иерархии идет руководитель отдела. В его обязанности касаемо эксперимента входит контроль нижестоящих по иерархии работников, сотрудничество с другими кафедрами, университетами, планирование проводимых работ.

Также заинтересованным лицом в эксперименте является заведующий кафедры, находящийся по иерархии выше руководителя отдела. Заведующий кафедры управляет проектами кафедры, а также курирует эксперименты кафедры (в том числе и описанных в данной работе) и организует работу научных сотрудников.

Помимо вышеописанных людей, экспериментом заинтересованы, пусть и косвенно, люди вне основной иерархии, такие как профессор-консультант, который оказывает теоретическую поддержку, техник, который более детально разбирается в оборудовании, и так далее.

Деятельность отдельно взятого сотрудника, заинтересованного в эксперименте, зависит от его должности и степени заинтересованности. Так, деятельность непосредственного исполнителя заключается в поддержке установки в удобоваримом состоянии (своевременно проводить необходимый ремонт узлов системы, не достигать предельных значений во избежание поломки), проведении экспериментов и обработке полученных результатов (изначально результаты обрабатывает человек, но есть возможность автоматизации процесса посредством специального ПО). Непосредственный исполнитель подготавливает установку к эксперименту (откачивает воздух из камеры, включает лазер, юстирует оптические элементы, подает напряжение между электродами), снимает результаты с осциллографа при проведении эксперимента и обрабатывает полученные результаты в виде двоичных файлов (сигналы с осциллографа) в программном пакете WaveStudio, получая текстовые файлы с массивом данных, пригодных для интеграции в программный пакет Microsoft Excel. В данном пакете исполнитель производит построение графиков, проводит различные операции над массивами данных для выявления закономерностей.

Деятельность фактического научного руководителя заключается, в основном, в курировании непосредственного исполнителя эксперимента, и помощи ему в спорных вопросах. В целом, деятельность фактического научного руководителя схожа с деятельностью непосредственного исполнителя.

Деятельность руководителя отдела заключается в контроле проектов и организации работы внутри отдела, в курировании подчиненных ему сотрудников.

Деятельность заведующего кафедра заключается в курировании экспериментов внутри кафедры и сотрудников кафедры, в сотрудничестве с другими университетами и предприятиями, близкими по общей тематике исследований.

Деятельность профессора-консультанта заключается в окончательной обработке результатов эксперимента, в просвещении сотрудников теоретическими данными, а деятельность техника – в организации хозяйства внутри лаборатории, контроле оборудования, его ремонте и так далее.

Описанные выше виды деятельности рассмотрены исключительно в рамках проекта, действительные обязанности описанных выше лиц намного шире и затрагивают другие проекты тоже.

# 2 Анализ современного состояния научной проблемы

### 2.1 Состояние вопроса на текущий момент

Исследование процессов многофотонной эмиссии началось уже спустя несколько лет после появления первого лазера. К примеру, в первых экспериментах, выполненных различными авторами в 1963—1965 годах [3], наблюдалась эмиссия электронов с поверхности металлических мишеней под действием импульсов лазеров, работающих в режиме свободной генерации, когда импульсы света имели длительность порядка 1 мс при средней мощности порядка 10 кВт и состояли из набора случайных нерегулярных пичков. Возникновение эмиссии было объяснено нагреванием мишени светом, а из-за ≪пичковости≫ импульсов количественные результаты не были получены. Для проведения количественных измерений требовались импульсы с хорошо измеримыми временными и спектральными характеристиками, контролируемым распределением интенсивности излучения по площади светового пучка и регулируемой пиковой интенсивностью. Такие импульсы, часто называемые гигантскими, могут быть получены при работе лазеров в режиме модуляции добротности. Форма импульсов близка к гауссовой с полушириной ~ 108 *с,* а пиковая мощность составляет в типичном случае 108 Вт/см2. Импульсы рубинового лазера с такими характеристиками использовались в первых работах Рэди, который на основании измерений тока с поверхности вольфрамовых мишеней пришел к выводу о термоэмиссионной природе эффекта. Несколько позже Нехт в близких экспериментальных условиях получил результаты, которые не удалось объяснить исключительно нагревом мишени [1].

Описанный выше эксперимент наиболее сопоставим с экспериментом, описанным в данной работе, правда, не следует ограничиваться только лишь им. Проводились похожие эксперименты, в которых ставилась задача исследования свойств пылевой плазмы.   
 Исследования поведения ансамбля макрочастиц, заряд которых индуцировался солнечным излучением, проводились в условиях микрогравитации на орбитальном комплексе "Мир". Использовалась установка, состоящая из следующих основных частей: стеклянные ампулы, содержащие частицы из бронзы с монослоем цезия радиусом 25 - 50 мкм; источник излучения — полупроводниковый лазер (рабочая длина волны 0,67 мкм, мощность 30 мВт); система регистрации — видеокамера и видеомодуль. В начальном состоянии частицы находились на стенках ампулы, поэтому эксперимент проводился по следующей схеме: динамическое воздействие (толчок) на систему; релаксация в течение 3-4 с для уменьшения случайных скоростей, сообщенных частицам при внешнем воздействии; освещение системы солнечным излучением в течение нескольких минут с релаксацией к исходному состоянию — уходом частиц обратно на стенки. Сильную корреляцию межчастичных расстояний экспериментально наблюдать не удалось. Полученные бинарные корреля-ционные функции позволяют сделать вывод о формировании в данных экспериментальных условиях неидеальных структур с близким порядком [4].

Также, в Университете Юты проводились похожие эксперименты, где в качестве пылевых макрочастиц использовался кремнезем как имитатор лунной пыли. Предполагалась оценка солнечного излучения на лунную пыль. Цели эксперимента заключались в следующем: во-первых, определение заряда, который получает частица в результате воздействия на нее короткого лазерного импульса, во-вторых, оценка взаимодействия заряженных частиц друг с другом, в-третьих, исходя из полученного заряда частиц, определить их размер [5]. В плане конструкции экспериментального стенда и преследуемых задач, данный эксперимент схож с экспериментом, описанным в данной работе.

Вообще, интерес к описанию пылевой космической плазмы резко возрос в конце 1990-х годов, что было связано с разработкой к тому времени теоретических методов исследования пылевой плазмы. [4]. Ключевой ее признак — быстрая зарядка пылевых частиц, протекающая за счет ряда процессов, среди которых можно выделить рекомбинацию электронов и ионов на поверхности пылевых частиц, фотоэффект и др. Наличие заряженных пылевых частиц отображается существенным образом на процессах, связанных с наличием колебаний или шумов, имеющих некоторое значение амплитуды (взаимодействие которых с частицами влияет на макроскопические свойства плазмы), на процессах самоорганизации в среде, а также на ее диссипативных свойствах. Присутствие массивных (по сравнению с ионами и электронами) заряженных пылевых частиц изменяет характерные пространственные и временные масштабы в плазме, а в ряде ситуаций даже порождает новую физику тех или иных явлений. Изменяемость (в зависимости от текущих параметров плазмы) зарядов пылевых частиц модифицирует спектры волн, распространяющихся в среде, влияет на эффекты затухания волн, определяет характер развития неустойчивостей и нелинейных процессов. Процессы самоорганизации в пылевой плазме приводят к формированию капель, облаков, плазменно-пылевых кристаллов и разного рода структур.

Также, относительно недавно усилился интерес и к непосредственному изучению космических пылевых частиц. Для изучения была организована миссия НАСА Stardust («Звездная пыль»), основная цель целей которой — сбор и доставка на Землю частиц из окрестностей ядра кометы 81P/Wild 2 — была успешно реализована 15 января 2006 г., когда капсула с образцами кометного вещества вернулась на Землю [6]. В недавней американской миссии LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer — «исследователь лунной атмосферы и пылевой среды») [7] лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты. А в России тем временем идет процесс подготовки миссий «Луна-25» и «Луна-27». На посадочных модулях станций «Луна-25 и 27» предполагается разместить аппаратуру [8], которая будет исследовать свойства пылевой плазмы над поверхностью Луны. Внешний вид модуля представлен на рисунке 3. Отмечены инструменты регистрации пылевой плазмы: пьезоэлектрические ударные сенсоры IS; выносные датчики электрического поля ES; камеры для оптических наблюдений (стереокамера Cam S и обзорные камеры Cam O).

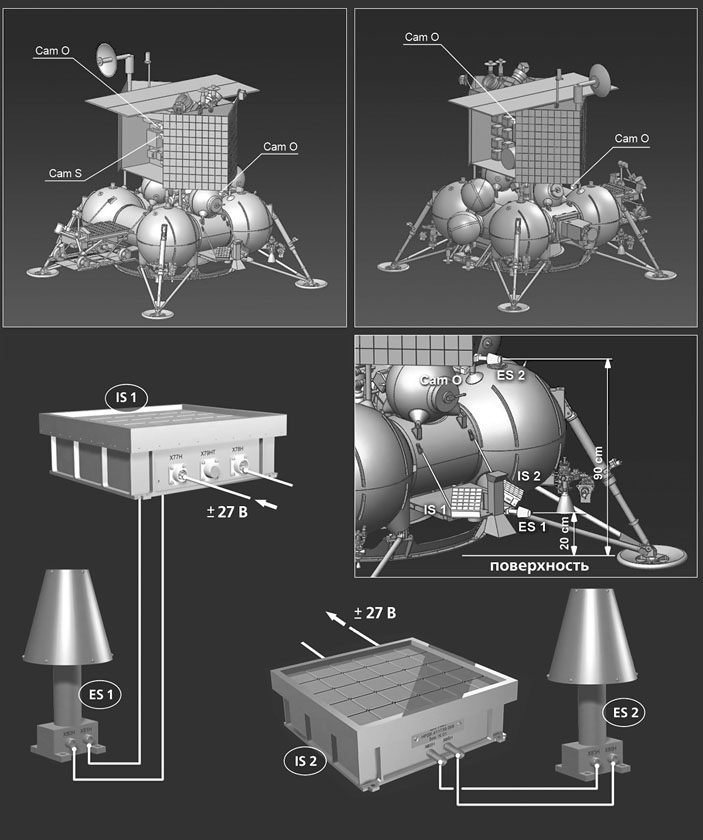


Рисунок 3 - Схема расположения аппаратуры для исследования пылевой плазмы у поверхности Луны на станциях «Луна-25 и 27»

Мелкодисперсными объектами Солнечной системы, обеспечивающими возникновения пылевой плазмы, являются: зодиакальное пылевое облако – межпланетная пыль, заполняющая пространство между Землей и Солнцем; кометная пыль; пыль в магнитосфере Земли; лунная пыль[9].

В недавнее время было проведено исследование мелкодисперсных частиц на одном из объектов Солнечной системы – спутнике Марса Фобосе. Сам по себе Фобос не является большим объектом, имеющим средний диаметр всего 22 км.

Обнаружилось, что на поверхностном слое над освещенной частью Фобоса за счет фотоэлектрических и электростатических процессов происходит формирование пылевой плазмы. Также из-за малой гравитации над поверхностью Фобоса поднимаются более крупные пылевые частицы, чем частицы над поверхностью Луны. При этом роль адгезии, которая представляется существенным процессом, препятствующим отрыву пылевых частиц от лунной поверхности, на Фобосе значительно уменьшается. Таким образом, Фобос вследствие своих размеров и степени освещенности Солнцем является довольно удачным объектом по исследованиям процессов, происходящих с пылевыми частицами, в результате которых рождается пылевая плазма.

В настоящее время существенное влияние уделяется исследованию системы Марса космическими аппаратами. Успешно функционируют аппараты Mars Express, ExoMars Trace Gas Orbiter, а поверхность Марса исследуют марсоходы Mars Exploration Rover Opportunity и Mars Science Laboratory Curiosity. Кроме того, готовится миссия Phobos-Grunt2 на спутник Марса - Фобос. Интерес к исследованию Фобоса обусловлен, в частности, тем, что из-за слабого гравитационного поля Фобос оказывается более доступным для пилотируемых полетов, чем Марс. Ускорение свободного падения на Фобосе составляет приблизительно 0.0057 м/с2, и посадка на него космического аппарата более близка к стыковке с другим аппаратом, чем приземление на планету. Согласно наблюдениям космических аппаратов, исследующих Фобос, его поверхность покрыта пылью, которая состоит из несвязанных друг с другом небольших частиц реголита, образовавшегося в результате микрометеороидной бомбардировки. Слабая гравитация усиливает роль пыли на Фобосе, в этом случае даже слабое возмущение может привести к формированию массивного пылевого облака над поверхностью этого спутника Марса. В рамках миссии Phobos-Grunt 2 предполагается обнаружение пылевых частиц на орбите вокруг Марса и у поверхности Фобоса, а также определение основных параметров пылевых частиц (импульса, массы, скорости, заряда). Также ожидается измерение параметров плазмы и определение локального электрического поля у поверхности Фобоса.

Фобос, как и Луна, является безатмосферным космическим телом. Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменнопылевой системы. Ожидается, что аналогичная ситуация складывается и над поверхностью Фобоса. Поверхность Фобоса заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца и плазмы солнечного ветра. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Фобоса испускает электроны в результате тепловой или фото-эмиссии, что приводит к формированию над поверхностью слоя электронов. К появлению электронов приводит также их испускание пылевыми частицами, присутствующими над поверхностью Фобоса, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Фобоса или в приповерхностном слое, поглощают электроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра. Все вышеописанные процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Фобоса, подъему и движению пыли. Также, немаловажную роль в формировании плазменно-пылевой системы в окрестности Фобоса играет ударов метеороидов о его поверхность. Образовавшиеся в результате бомбардировки метеороидами вторичные частицы, выбитые с поверхности Фобоса, приобретают скорость, превышающую вторую космическую скорость (для Фобоса равную 10 м/с) и покидают его. При этом, если скорость вторичных частиц оказывается меньше орбитальной скорости Фобоса (2.1 км/с), частицы могут оказаться на орбитах вокруг Марса. С учетом аналогичных процессов у другого спутника Марса – Деймоса возможным оказывается формирование пылевого гало вблизи орбит Фобоса и Деймоса[10].

Таким образом, описанные выше эксперименты и исследования частично дают ответы на поставленные нами вопросы, и, исходя из опыта и результатов прошедших экспериментов и опыта более ранних исследований, можем исследовать процессы эмиссий различной природы с пылевых макрочастиц под действием лазера более детально, а также изучить параметры возникающей в случае эмиссии электронов пылевой плазмы.

### 2.2. Теоретическое обоснование

Процесс выбивания электрона с поверхности металла или металлической пыли неоднороден, результирующий ток состоит из токов разной природы. Таким образом, различают термоток, возникающий вследствие теплового воздействия, фототок и шумовой ток, которые являются результатом термоэлектронной, фотоэлектронной эмиссии и  автоэлектронной эмиссией соответственно. Рассмотрим эти про-цессы подробнее.   
 а) Термоэлектронная эмиссия – процесс испускания электронов с металла в вакуум или другую среду вследствие его нагрева. Так как концентрация свободных электронов в металле довольно большая,  то даже при средних температурах вследствие распределения электронов по скоростям (по энергии) некоторые электроны обладают достаточной энергией для преодоления [потенциального барьера](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B1%D0%B0%D1%80%D1%8C%D0%B5%D1%80) на границе [металла](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB). К тому же, с повышением температуры число электронов, [кинетическая энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) теплового движения которых больше [работы выхода](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0_%D0%B2%D1%8B%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0), растёт, и явление термоэлектронной эмиссии становится более заметным.  
 Наблюдать и изучать процессы и зависимости термоэлектронной эмиссии представляется возможным с использованием простейшей установки – вакуумного диода. Вакуумный диод представляет собой двухэлектродную лампу, в которой поддерживается вакуум, и которая содержит два электрода – анод и катод. Катодом является нить из тугоплавкого материала (как правило, вольфрама). Анод представлен в виде металлического цилиндра. Катод распогается внутри анода. Если подключить вакуумный диод к источнику питания, подав на анод относительно катода положительное напряжение, то в цепи появляется ток. При смене полярности батареи, либо при обратной схеме подключения диода, ток не появляется. Отсюда следует вывод, что катод испускает электроны, то есть отрицательные частицы.  
 Зависимость термоэлектронного тока от анодного напряжения носит нелинейный характер, описывается законом трех вторых (в случае невысоких и положительных напряжений):

*I = BU3/2*  (2.2.1)

где B – коэффициент, зависящий от формы, размеров электродов и их взаимного расположения.  
 При увеличении анодного напряжения термоэлектронный ток достигает некого предельного значения, называющийся током насыщения. Обусловлен он тем, что при данном напряжении все электроны, вылетающие с катода, достигают анода, а следовательно, дальнейшее увеличение напряжения не приведет к увеличению эмиссионного тока. Таким образом, плотность тока насыщения характеризует способность к эмиссии катода.  
 Плотность тока насыщения определяется формулой Ричардсона — Дешмана, выведенной теоретически на основе квантовой статистики [11]:

*j = (1 – hRi)A\*T2\*eϕ/kT* (2.2.2)

где *hRi -* усреднённое по спектру термоэлектронов значение коэффициента отражения электронов от потенциального порога;  
A - термоэлектрическая постоянная, равная {\displaystyle 120,4{\Big [}{\cfrac {A}{K^{2}cm^{2}}}{\Big ]};}120,4 [];   
*ϕ* - работа выхода электронов из катода;  
*k* – постоянная Больцмана;

*Т* – термодинамическая температура.

При уменьшении работы выхода резко возрастает плотность тока насыщения. Таким образом, имеет смысл покрывать катоды оксидами, которые имеют малую работу выхода, порядка 1 эВ.

Вследствие того, что для прогрева частиц требуется некоторое время, термоэлектронная эмиссия – процесс инерционный, то есть, существует задержка после воздействия короткого лазерного импульса. Таким образом, когда пылевая макрочастица прогреется до определенной температуры, то начнет происходить эмиссия электронов.

При мощности излучения, превышающий порог абляции, в результате теплового воздействия излучения возникает абляция – процесс испарения вещества с поверхности под действием лазерных импульсов. При такой плотности мощности, которая превышает порог возникновения абляции, на поверхности пылевой макрочастицы происходит мини-взрыв с образованием кратера, и часть вещества (твердые макрочастицы и жидкие аэрозоли) разлетается. На месте этого взрыва образуется также и плазма, придающая частице реактивное ускорение.

б) Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект) – процесс испускания металлом электронов под действием электромагнитного излучения. При этом во внешнем электрическом поле образуется упорядоченное движение электронов, вылетевших в вакуум или в среду, называемое фототоком.   
 Как и в случае с термоэлектронной эмиссии, фотоэлектронную эмиссию можно наблюдать в простейшей схеме – вакуумном диоде. Электрод, эмитирующий электроны и подвергающийся воздействию электромагнитного излучения, называется фотокатод. Вылетевшие электроны под действием электрического поля достигают анода, появляется фототок. При этом часть электронов достигает анода и при отсутствии электрического поля, под действием собственных энергий.  
 Фотоэлектронная эмиссия подчиняется трем законам внешнего фотоэффекта (законы Столетова):

1) Первый закон фотоэффекта – сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности излучения, падающего на фотокатод;

2) Второй закон фотоэффекта – максимальная кинетическая энергия электронов, вылетевших с катода, прямо пропорциональна частоте излучения, но не зависит от  его интенсивности.

3) Третий закон фотоэффекта – для каждого материала при определенных параметрах его поверхности существует нижний предел частоты излучения, и при освещении излучением с частотой ниже предельной фотоэффект не наблюдается. Такая частота называется красной границей фотоэффекта.  
 Природа фотоэффекта была объяснена в 1905 году Альбертом Эйнштейном на основе гипотез Макса Планка о квантовой природе света. Исходя из закона сохранения энергии Эйнштейном была выведена формула:

*hν = Aв +*  (2.2.3)

где *ν* - частота падающего фотона, *Aв*– работа выхода, - максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона, *h* – постоянная Планка.  
 Также, основные физические процессы в металле при фотоэлектронной эмиссии объясняются теорией Фаулера [12], которая утверждает, что после того, как фотон попадет на металл, его энергия переходит в энергию электронов проводимости, и таким образом электронный газ в металле состоит из частиц с нормальным распределением Ферми - Дирака и частиц, возбужденных под действием кванта света. Плотность тока определяется формулой Фаулера:

|  |  |
| --- | --- |
| *j =* | (2.2.4) |

где *B1, B2, B3* – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств облучаемого металла. Однако, данная теория имеет смысл только при падении света по нормали к поверхности и при энергиях, не превышающих работу выхода облучаемого металла более чем на несколько электрон-вольт.

Кроме того, было установлено, что фотоэффект происходит безынерционно, то есть, процесс вылета электронов начинался сразу же с момента начала воздействия излучения. Благодаря этой характерной черте имеется возможность выделять фотоэлектронную эмиссию на фоне сторонних процессов (как правило, термоэлектронной эмиссии).  
 в) Все описанное выше затрагивало в основном однофотонную ионизацию. Однако, при весьма большой интенсивности света значительно возрастает вероятность такого события, что два или более фотона проучаствуют в одном акте ионизации, и выбъется один электрон. Такой процесс называется многофотонной ионизацией. Рассмотрим подробнее данную ситуацию.  
 Итак, многофотонная ионизация – процесс ионизации частицы в поле электромагнитной волны путем поглощения двух и более фотонов. Необходимым условием наблюдения многофотонной ионизации является выполнение условия hν < eIp , где hν — [энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) фотона ,  eIp — [энергия ионизации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F_%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8) (Ip — [потенциал ионизации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB_%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8)). В то же время полная энергия поглощённых фотонов Nhν (где N — число фотонов, поглощённых в одном элементарном акте) должна быть больше энергии ионизации.

Вероятность ионизации w зависит от интенсивности излучения I и связана с ней степенным законом:

*w = αN IN*  (2.2.5)

где *αN*– константа, зависящая от вида ионизируемого атома, а также от частоты и [поляризации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD) (для несферических молекул) излучения.

Вообще, многофотонная ионизация не является пороговым эффектом, то есть теоретически может наблюдаться при сколь угодно малых интенсивностях излучения. Правда, на практике, для экспериментального наблюдения эффекта требуются относительно высокие интенсивности, достижимые только с использованием [лазеров](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80). Кроме того, многофотонная ионизация может быть получена только в условиях высокого вакуума (>>1, где λ – длина свободного пробега электрона, d – диаметр вакуумной камеры). При не столь высоком вакууме (при давлении более нескольких [торр](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D1%80%D1%80)) доминирует [лавинная ионизация](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9B%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F&action=edit&redlink=1).

Процесс многофотонной ионизации атомов обладает следующими характерными особенностями:

1) Теория Келдыша – устанавливает фундаментальные зависимости процесса ионизации в сильном световом поле. Зависимость вероятности ионизации атома в сильном световом поле от основных параметров, характеризующих атом (потенциал ионизации I) и поле (частота ν и напряженность E), была выяснена Келдышем путем решения модельной задачи вырывания электрона из прямоугольной потенциальной ямы, глубина которой I >> hν. Физически реализация многоквантового или туннельного характера процесса ионизации определяется тем обстоятельством, поспевает ли электрон за один период изменения светового поля пройти потенциальный барьер. Если время прохождения барьера меньше, чем время, за которое изменяется фаза поля, то переход носит характер туннелирования.

В одном предельном случае вероятность вырывания электрона зависит от напряженности поля степенной зависимостью. В другом предельном случае, при большей напряженности поля или меньшей частоте излучения, вероятность вырывания электрона будет экспоненциально зависеть от напряженности поля.

2) Прямой процесс ионизации – если энергии основных состояний отличаются от энергий квазистационарных состояний на величину, которая больше, чем ширина этих состояний, то переходы, совершаемые электроном, носят виртуальный характер. Вероятность прямого процесса в этом случае связана с напряженностью поля.

3) Резонансный процесс ионизации – при плавном изменении частоты света реализуется ситуация, когда энергия некоторого числа квантов будет равна энергии некого квазистационарного состояния электрона в атоме, в результате чего возникает промежуточный резонанс. При возникновении промежуточного резонанса процесс ионизации существенно определяется возмущением резонансного состояния в световом поле.

4) Туннельный процесс ионизации – происходит тогда, когда энергии основных состояний много меньше энергий квазистационарных состояний. В этом случае процесс описывается экспоненциальным соотношением между вероятностью ионизации и напряженностью поля и характеризуется отсутствием зависимости вероятности ионизации от частоты излучения. Очень трудный в достижении эффект, так как требуется создать поле напряженностью, сравнимой с внутриатомной [13].

Вероятность наблюдения многофотонной ионизации существенно меньше, чем термоэлектронной или фотоэлектронной эмиссий, за счет требований к входным параметрам эксперимента.

г) Автоэлектронная эмиссия – эмиссия, возникающая за счет действия внешнего электрического поля без возбуждения электронов в веществе. В отличие от остальных видов эмиссий, в случае с автоэлектронной эмиссией нет предварительного поглощения энергии веществом, не требуется дополнительный подвод энергии извне. При приложении внешнего электрического поля потенциальный барьер искривляется, чем объясняется процесс туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер.  
 Явление автоэлектронной эмиссии теоретически было обосновано в 1928 году Фаулером и Нордгеймом [14]. Они вывели формулу, которая описывает зависимость плотности автоэлектронного тока от напряженности электрического поля. Формула Фаулера-Нордгейма имеет вид:

(2.2.6)

где *j* – плотность тока эмиссии, *a, b* – параметры, зависящие от работы выхода и геометрии, *E* – напряженность электирческого поля, *ϕ* - работа выхода. Формула применяется в случае эмиссии электронов через потенциальный барьер на границе металл-вакуум, а также при условии, что линии поля проходят перпендикулярно по отношению к поверхности. Зависимость плотности тока при автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля в общих чертах аналогична зависимости плотности тока при термоэлектронной эмисси от температуры.

При напряженностях поля порядка 103 – 104 В/мм влияние автоэлектронной эмиссии, как правило, незначительно, и ей пренебрегают при условии, что поверхности электродов были тщательно зачищены от заусенцев и неровностей, в противном случае на таких участках будет просходить концентрация эмитированных электронов, что существенно исказит картину эксперимента.

Таким образом, чтобы явление автоэлектронной эмиссии на поверхности металла стало заметным, напряженности поля должны быть предельно большими, вплоть до 107 – 108 В/см. Однако если поверхность металла заостренная, или сама поверхность микронного размера, то явление автоэлектронной эмиссии может наблюдаться и при меньшей величине поля [15].

Вообще, автоэлектронная эмиссия нашла широкое применение в науке и технике [15], но в эксперименте по исследованию эмиссий электронов под действием лазерного излучения данное явление является паразитным. Эмиссия электронов происходит в случайные моменты времени, в то время как в случае с фотоэлектронной и термоэлектронной эмиссией вылет электронов происходит в зависимости от лазерного импульса. То есть, явление автоэлектронной эмиссии не является предсказуемым.

В данной главе было проведено теоретическое обоснование явления эмиссии электронов. Эмиссии электронов бывают разной природы, в зависимости от вида воздействия. Лазер обеспечивает одновременно и тепловое воздействие (термоэлектронная эмиссия, абляция), и воздействие фотонами (фотоэлектронная эмиссия), и многофотонную ионизацию. При наличии напряженности поля вероятно наблюдение автоэлектронной эмиссии, которая в данном эксперименте является паразитным явлением и представляет собой случайные по времени и амплитуде импульсы.

# Заключение

Исследование процессов фотоэлектронной и термоэлектронной эмиссии при воздействии коротких лазерных импульсов на пылевые макрочастицы накладывает определенные требования к конструкции экспериментального стенда. Для выполнения этих требований необходимо преодолеть фундаментальные ограничения, основное из которых – невозможность наблюдения вышеописанных эффектов в условиях атмосферы, ведь для их поддержания требуется наличие вакуума. Также требования накладываются и на оптическую систему направления лазерного излучения, ведь помимо компактного расположения направляющих оптических элементов на доступном оптическом столе, требуется также и задание параметров лазерного излучения, таких как длительность лазерного импульса и длина волны излучения, которые, в общем-то, и определяют конфигурацию эксперимента. Система для подачи пылевых макрочастиц обеспечивает равномерный поток частиц. Измерительная система, она же – система регистрации эмитирующих электронов, обеспечивает непосредственную регистрацию явлений эмиссии электронов, а также вывод результатов в виде осциллограмм и массивов данных, пригодных для обработки и анализа.

Также, при больших интенсивностях света могло наблюдаться такое явление, как многофотонная ионизация - процесс, при котором в элементарном акте взаимодействия поглощается несколько фотонов. Правда, и вероятность появления данного эффекта очень низкая, но, тем не менее, эффект интересный как с точки зрения физики возникновения, так и с точки зрения экспериментальных исследований.

В рамках данной работы был проведен обзор литературы на тематику будущей диссертации, была описана предметная область исследования, организационная структура предприятия, предоставляющего поле для исследований, и структура заинтересованных в данном проекте лиц. В общих словах, был проведен анализ теоретических данных и подготовка базы для дальнейших исследований в области комплексной плазмы и, как частный случай, эмиссии электронов с пылевых частиц в результате разного вида воздействий.

# Список использованных источников

1. Анисимов С.И., Бендерский В.А., Фаркаш Д. Нелинейный фотоэлектрический эффект в металлах под действием лазерного излучения. М*.:* Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау,1977. – 38 с.
2. Эксперимент «Плазменный кристалл» и наука на МКС / Научно-познавательный ресурс Geektimes. [М.,2013]. URL: <https://geektimes.com/post/203460/> (дата обращения: 15.02.2018).
3. Рэди Дж. [Ready J.]. Действие мощного лазерного излучения [Текст] / Перевод с англ. В. А. Батанова и И. К. Красюка ; Под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. И. Анисимова. М., 1974. - 468 с.
4. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. Пылевая плазма. М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2004.
5. Isert S., Petersen L., Ragsdale V., Lanier D. (Eds.). Photoelectric Charging by Ultraviolet Light of a Lunar Dust Simulant in a Microgravity Environment. Logan: Utah State University, 2008. – 29 с.
6. Brownlee D. E. The Stardust comet mission: Studying sediments from the Solar System’s frozen attic // Elements. 2012. V. 8. № 5. P. 327–328.
7. Elphic R. C., Delory G. T., Hine B. P. et al. The lunar atmosphere and dust environment explorer mission // Space Sci. Rev. 2014. V. 185. № 1–4. P. 3–25.
8. Попель С.И., Голубь А.П., Извекова Ю.Н. и др. К вопросу о распределениях фотоэлектронов над освещенной частью Луны // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. № 3. С. 131–137.
9. Попель С.И . Пыль и пылевая плазма в Солнечной системе // Научно-популярный журнал «Природа». М., 2015. – 9 с.
10. Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М. Пылевая плазма у поверхности Фобоса. М.: Институт космических исследований РАН, 2017. - 469–475 с.
11. Фридрихов С.А., Мовнин С.М.  Физические основы эмиссионной электроники // Физические основы электронной техники.  М.: Высшная школа, 1982. – 608 с.
12. Л. Н. Добрецов, М. В. Гомоюнова. [Эмиссионная электроника](http://www.accel.ru/vt/djvu/%D0%94%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B5%D1%86%D0%BE%D0%B2%20%D0%9B.%D0%9D.%20%D0%B8%20%D0%B4%D1%80.%20%D0%AD%D0%BC%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0.djvu).  М.: Наука, 1966. – 564 с.
13. Делоне Н.Б. Многофотонная ионизация атомов. М.: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 1975. – 41 с.
14. Шредник В. Н. [Автоэлектронная эмиссия](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0034.html) // Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988. – 342 с.
15. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия. СПб.: Соросовский образовательный журнал, 2000. – 8 с.