

УДК 533.9:613:629.785

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ НА МКС – НОВЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОТКРЫТИЯ И ВЫГОДЫ ДЛЯ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Г. Морфилл

Проф., докт. наук, Почетный доктор, директор по информационной безопасности компании «Терраплазма» (terraplasma GmbH), директор Института внеземной физики Макса Планка (1984–2010) Г. Морфилл

Исследования плазмы на борту Международной космической станции (МКС) – для чего они? Особенно с учетом того, что космос – сложная непривычная среда: к месту проведения исследований ведет нелегкий путь; эксперименты должны выполнять космонавты после специальной подготовки; голосовая и видеосвязь с учеными на Земле осложнена громадным расстоянием; скорость передачи данных и реагирования на них с Земли низкая и так далее, и так далее... Однако если для проведения исследований требуются условия микрогравитации, если физика процессов изучена недостаточно и требуется непрерывное участие в них человека в реальном времени, если область исследований является новой и задачи исследований подразумевают наличие сотен разнообразных настроек – тогда все трудности становятся стимулирующим фактором, а не препятствием к достижению нужных целей. Именно так обстоит дело с особыми условиями исследований плазмы, которые ведутся на борту МКС с начала ее регулярной эксплуатации. В этой статье я затрону разные области фундаментальной физики (начиная с плазменных кристаллов, жидкой плазмы, включая «атомистические» исследования перехода плавления, сдвиговых потоков, ударных волн, реологии, суперкоагуляции и самоорганизации плазмы), а затем коснусь достижений на Земле в области медицины, гигиены, дезодорации и сельского хозяйства, которые связаны с этими исследованиями. При таком большом количестве различных открытий и достижений я, конечно, не могу глубоко вникать в сопутствующие темы – заинтересованный читатель должен следить за этим по цитируемым оригинальным статьям.

Ключевые слова: плазма, плазменный кристалл, Международная космическая станция, космонавты, эксперименты, микрогравитация, исследования плазмы в космосе, фундаментальная физика, медицина, гигиена, дезодорация, сельское хозяйство

Plasma Research on the ISS – Fundamental New Discoveries and Benefits on Earth. G. Morfill

Plasma research on the International Space Station (ISS) – why would one want to do that? The environment is difficult, the travel to the plasma laboratories is laborious, the experiments must be carried out by trained specialists – the cosmonauts, with voice and video contact to the scientists on Earth delayed by huge distances, data rates are low, reaction times are slow etc... However, if the experiments require microgravity, if the physics is not well established

and requires real time human intervention, if the research field is new and has a research scope requiring hundreds of different set-ups – then all the difficulties are an incentive rather than a hindrance towards achieving the desired goals. This is the case in the special plasma physics regime studied on the ISS since the beginning of regular operation. In this article, I will touch on different areas of fundamental physics (starting with plasma crystals, liquid plasmas including “atomistic” studies of the melting transition, shear flows, shock waves, plasma rheology, supercoagulation and self-organization) and then follow this with spin-off advances made on Earth (medicine, hygiene, agriculture and odor control). With so many different discoveries and advances, I cannot, of course, delve deeply into the different subjects – interested readers may follow this up by looking at the cited original articles.

Keywords: plasma, plasma crystal, International Space Station, cosmonauts, experiments, microgravity, plasma research on Space, fundamental physics, medicine, hygiene, odor control, agriculture

Введение

Серьезные исследования плазмы в условиях микрогравитации были начаты первым экипажем МКС, старт которого состоялся 2 ноября 2000 г. [1, 2]. До этого велись некоторые работы в ходе параболических полетов, полетов по исследованию верхних слоев атмосферы и на станции «Мир». Однако это были весьма ограниченные эксперименты, которые имели целью наработать навыки для запланированных крупных исследований с использованием универсальной лаборатории в космосе. Эта лаборатория, названная просто ПКЭ (что означает «Эксперимент с плазменным кристаллом»), стала результатом удивительно-го сотрудничества Германии и России с участием Общества Макса Планка, Немецкого центра авиации и космонавтики (DLR) и Kayser-Threde GmbH в Германии, а также Российской академии наук, Роскосмоса и корпорации «Энергия». Тогда мы еще не знали, что это сотрудничество продлится в течение двух десятилетий и станет самой успешной исследовательской работой в области фундаментальной физики, которая обогатит нас новыми технологиями на Земле в области медицины, гигиены, сельского хозяйства, в области контроля запахового загрязнения – и это всего несколько приложений.

Во-первых, я должен выразить искреннюю благодарность моему другу и коллеге, профессору Владимиру Фортову [7, 10, 29], который, к сожалению, умер 29 ноября 2020 г. в результате заражения коронавирусом. Без Владимира ничего из того, о чем я здесь рассказываю, не произошло бы. Очень грустно, что он не может стать свидетелем пользы, приобретенной человечеством в результате космических исследований. Во-вторых, я должен поблагодарить космонавтов, которые прошли подготовку на Земле с моделями новых плазменных лабораторий (ПКЭ, ПКЗ-Плюс, ПК4) и проводили сложные эксперименты в условиях невесомости. И вновь подчеркиваю, без этих прекрасных экспериментаторов ничего из того, о чем я здесь рассказываю, не могло состояться.

Плазма – четвертое состояние вещества (остальные состояния – твердые тела, жидкости и газы) – признана наиболее неупорядоченным состоянием [6, 9]. Плазма состоит из электронов и ионов и в целом нейтральна по заряду. Частицы взаимодействуют посредством слабых электростатических сил, поэтому сильной связи быть не может. Это считалось общеизвестным. Тем не менее многие известные физики – Ландау, Вигнер, Вильсон, де Женн, Костерлиц, Таулесс и другие – были заинтригованы концепцией сильно связанной плазмы, возможно, даже приводящей к формированию «плазменных кристаллов», некоторые получили Нобелевскую премию за близкие уникальные открытия. Поэтому, когда мы опубликовали наши первые результаты, большим сюрпризом для сообщества физиков стало то, что «плазменные кристаллы» действительно могут производиться и самоорганизовываться в лаборатории (Томас, Морфилл и др., 1994) [3].



В. Фортов и Г. Морфилл

С. Крикалев с лабораторией ПКЭ
(эксперимент «Плазменный кристалл»)
сразу после доставки на МКС [31]

Способ получения «плазменных кристаллов» в принципе довольно прост, если знать как... При увеличении заряда частиц плазмы в 1000–10 000 раз превышающий элементарный заряд сила взаимодействия увеличивается в 1–100 миллионов раз, что предполагает сильную электростатическую связь. Как внедрить высокочarged частицы плазмы? Этого можно добиться, загружая в плазму микрочастицы. Микрочастицы автоматически заряжаются до этих высоких значений и становятся доминирующими носителями заряда в этой «коллоидной плазме». Эта коллоидная плазма состоит из отрицательно заряженных микрочастиц и положительных ионов с небольшим компонентом электронов и некоторыми нейтральными частицами. Поскольку система является диссипативной (т. е. электроны и ионы рекомбинируют на микрочастицах), для поддержания плазменного кристалла необходимо постоянно подавать энергию.

На этом этапе важную роль начинает играть микрогравитация. Микрочастицы (диаметром несколько микрон) имеют массу $\sim 10^9$ атомов. Они тяжелые!

Это означает, что на Земле такая структура должна поддерживаться, компенсируя силу тяжести, поэтому легко создаются только очень плоские системы. Без сомнения, это интересно и для изучения динамики мембран на уровне отдельных частиц в реальном времени и пространстве. В условиях микрогравитации можно создавать трехмерные структуры и расширять исследования от преимущественно поверхностных структур до объемных – действительно захватывающая перспектива.

Микрочастицы можно легко визуализировать, осветив лазером, и при микроскопии. Тяжелая масса резко замедляет их движение (по сравнению с движением атомов, тепловые скорости в том же температурном масштабе равны $1/\sqrt{m}$), а фоновые нейтральные частицы *практически не дают затухания*. Это означает, что основные процессы можно наблюдать в «замедленном режиме» и анализировать, что невозможно с атомами (движения слишком быстрые) или с коллоидными суспензиями в жидкостях (слишком сильное вязкостное затухание).

В этом смысле «коллоидная плазма» открыла еще одну тему для фундаментальных исследований в дополнение к «коллоидным жидкостям» и «моделированию системы частиц».

Теперь немного о терминологии. В «сложных жидкостях» (термин для «коллоидных жидкостей») введен лауреатом Нобелевской премии Пьером-Жилем де Женном) жидкость обеспечивает значительное вязкое затухание погруженных коллоидных частиц, поэтому экспериментально исследовать быстрые процессы на наиболее важных частотах Дебая и Эйнштейна не представляется возможным.

В «сложных плазмах» (термин для «коллоидной плазмы») введен Г. Морфиллом и его коллегами по аналогии с терминологией де Женна) [28] разреженная плазма практически не обеспечивает затухания, поэтому можно проводить экспериментальные исследования быстрых кинетических процессов на одночастичном уровне. Само собой разумеется, что изучение основных физических процессов на «атомном уровне» в реальном пространстве и времени обеспечит исследовательские возможности и новые знания на многие годы вперед при условии, что существует возможность изучать трехмерные системы на этом уровне в космосе, а также двумерные системы на Земле.

Фундаментальные научные исследования

Фундаментальные научные исследования «коллоидной, или сложной, плазмы», направленные на расширение наших знаний в целом о физике мира, в котором мы живем, позволили сделать ряд открытий и выдвинуть новые идеи в отношении плазменных кристаллов, жидкой плазмы, включая «атомистические» исследования перехода плавления, сдвиговых потоков и турбулентности, ударных волн, реологии плазмы, критической точки, суперкоагуляции и самоорганизации [4, 23, 24, 28]. И это лишь несколько примеров. Теперь кратко коснусь некоторых из этих тем.

Плазменные кристаллы

Сначала кратко о результатах двухмерных исследований на Земле

Эти открытия представляли интерес и сами по себе (наблюдать динамику таких систем в реальном времени и пространстве на уровне одной частицы без избыточного демпфирования раньше было невозможно).

На рис. 1 показана типичная кристаллическая решетка однослойного плазменного кристалла, а также типичное смещение. Итак:

- «основное состояние» 2D-кристалла – это гексагональная структура;
- краевая дислокация – это кристаллографический дефект, когда в кристалл «вставляется» дополнительная полулиния микрочастиц;
- ядром дислокации является пара изолированных 5- и 7-кратных дефектов в гексагональной решетке.

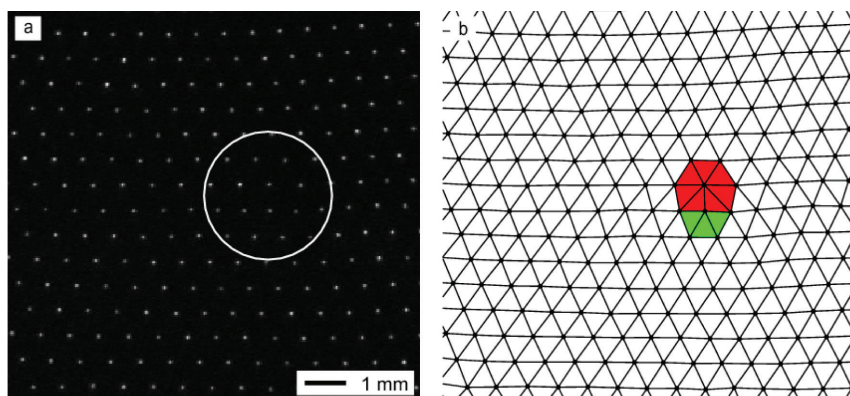


Рис. 1. Кристаллическая решетка однослойного плазменного кристалла

Эти наблюдения неувидительны. Равновесная структура подтверждает то, что наблюдалось ранее в сложных жидкостях и о чем свидетельствует теория.

Гораздо больший интерес представляет вопрос о скорости распространения таких кристаллических дефектов. В то время это была спорная тема: распространено мнение, что скользящая краевая дислокация не может превысить скорости звука поперечных волн C_T , т. к. излучаемая при дислокации энергия становится бесконечной при C_T .

Однако Эшелби давно предсказал (Eshelby, Proceedings of the Royal Society of London, 1949), что краевая дислокация при определенной скорости $-\sqrt{2} C_T$ – может скользить, не излучая энергии вообще.

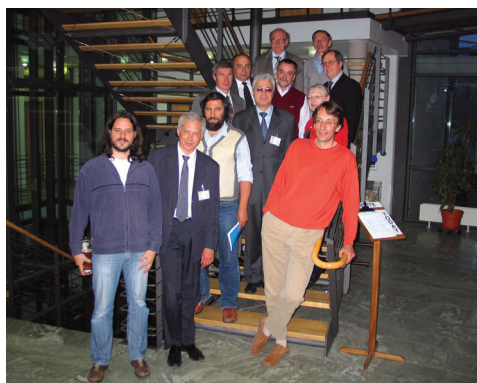
Чтобы разрешить противоречие, было проведено численное моделирование, но остался вопрос: можно ли наблюдать это экспериментально на атомном уровне?

Для измерений требуются очень большие двухмерные плазменные кристаллы, а также отслеживание отдельных частиц во времени. Вот краткие

результаты исследований: «Экспериментальные результаты по динамике дислокаций в двумерном плазменном кристалле. Краевые дислокации в решетке создавались парами там, где внутреннее напряжение сдвига превышало пороговое значение, а затем раздвигались в плоскости скольжения со скоростью, превышающей скорость звука поперечных волн C_T). Экспериментальная система «плазменный кристалл» позволяла наблюдать этот процесс на атомном (кинетическом) уровне. Этот процесс на раннем этапе определяется как дефект кристаллической структуры (дефект упаковки). На более позднем этапе сверхзвуковые перемещения дислокаций породили сдвиговые конусы Маха.



Научная аппаратура
«Плазменный кристалл»



Участники эксперимента
«Плазменный кристалл»

Дислокации, которые движутся со сверхзвуковой скоростью, создают отчетливую сигнатуру, т. е. конус Маха поперечной волны (рис. 2). Конус Маха – это V-образный след движущегося сверхзвукового возмущения.

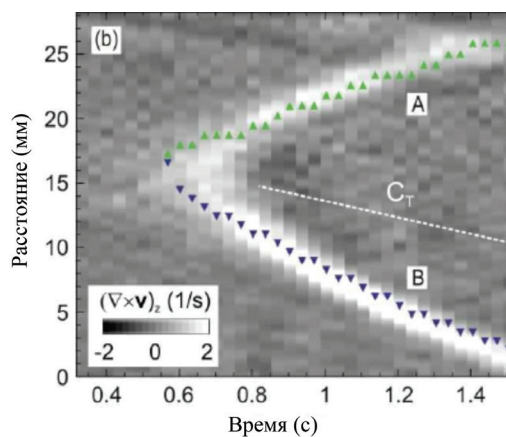


Рис. 2. Конус Маха поперечной волны:
расстояние (мм); время (с) [32]

Конусы Маха подчиняются соотношению углов конусов Маха $\sin \mu = C/U$, где μ – угол раскрытия конуса, C – скорость звука и U – скорость сверхзвукового возмущения. Исходя из углов конуса Маха, получаем относительные скорости дислокаций А и В на рисунке, $U_A = 1,7 C_T$ и $U_B = 1,9 C_T$. Местная скорость звука тоже показана (пунктирная линия)».

Некоторые трехмерные результаты полученные в космосе

Трехмерный плазменный кристалл (рис. 3) был измерен в космосе в условиях микрогравитации. Лазерный лист пропускался сквозь облако частиц, и их положение фиксировалось с помощью микроскопа. Кристаллическая структура содержит более 15 000 частиц.

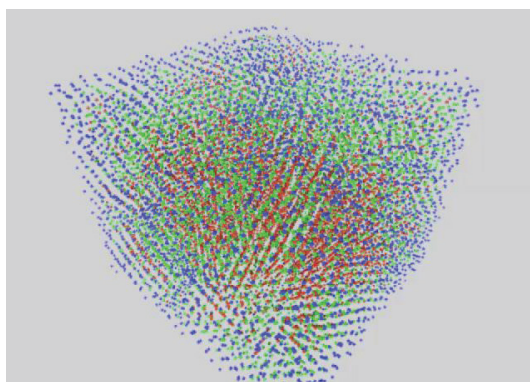


Рис. 3. Цветовое кодирование измерений реальной сложной плазмы:

красные точки FCC – гранецентрированный кубический;
зеленые точки HCP – гексагональный плотноупакованный;
синие точки Fluid – структура отсутствует.
Снимок получен с помощью РК-3Plus (2007)

Интересным фактом в этом примере (сравнительно) макроскопической структуры является то, что внешне порядок потерян: еще есть сильная связь, но система больше похожа на жидкость. Внутри имеются режимы кристаллических структур ГПУ и ГЦК, которые образуются в результате самоорганизации. И неожиданно, вызывая возмущение кристалла (например, импульсивно изменяя электрическое поле), можно видеть, как протекает медленная самоорганизация изнутри наружу посредством фононов, которые перераспределяют энергию.

Плазменная реология

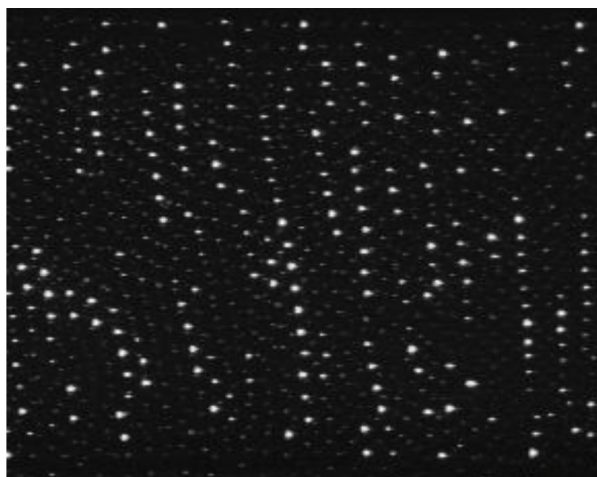
Удивительное открытие сделали астронавт ЕКА Т. Рейтер и его российские коллеги М. Тюрин и П. Виноградов. Они впервые наблюдали новое явление – самоорганизацию сложной плазменной жидкости в «струнную плазму», где все частицы выстраиваются в определенном направлении. На рисунках ниже показана сложная плазма в жидкой фазе.



Последовательность с небольшой модулирующей амплитудой переменного тока (26 V полный размах) показывает характерную изотропную жидкостную фазу сложной плазмы.

Снимок получен с помощью ПК-3Плюс, Т. Райтер (2006) [33]

«Обычные» электрореологические (ЭР) жидкости состоят из суспензий микрочастиц обычно в непроводящих жидкостях с различной диэлектрической константой. Взаимодействие между частицами, а следовательно, и реология ЭР жидкостей определяется внешним электрическим полем, которое поляризует зерна и тем самым вызывает дополнительную диполь-дипольную связь. Электрическое поле играет роль новой степени свободы, позволяющей «настраивать» взаимодействие между частицами, что делает фазовую диаграмму ЭР жидкостей чрезвычайно разнообразной.



Последовательность с высокой амплитудой модулирующего переменного тока (66 V полный размах). Первое наблюдение фазового перехода изотропной сложной плазменной жидкости в ЭР «струнную плазму».

Снимок получен с помощью ПК-3Плюс, Т. Райтер (2006) [33]

До сих пор коллоидные суспензии были основным направлением ЭР исследований и давали очень много информации. Открытие того факта, что сложная плазма также обладает ЭР свойствами, дает дополнительные возможности для временных и пространственных исследований и изучения новых феноменов: ансамбли микрочастиц в сложной плазме могут выступать как моновидовая система с очень слабым затуханием. Это сильно отличается от коллоидов и является следствием того, что плотность нейтрального газа в сложной плазме примерно в 10^6 – 10^8 раз меньше плотности жидкости в коллоидах. Таким образом, сложная ЭР плазма позволяет исследовать ранее недоступные быстрые элементарные процессы, которые управляют динамическим поведением ЭР жидкостей на уровне отдельных частиц. В частности, такие исследования могут позволить изучить критические явления, сопровождающие фазовые переходы второго порядка [5, 8].

На рис. 4 схематически показан физический процесс, который создает асимметричную связь между частицами и в конечном итоге приводит к образованию струн. Внешнее поле переменного тока, приложенное к облаку сложной плазмы, искажает облако локального заряда вокруг микрочастицы (рис. 4, с) при условии, что частота переменного поля достаточно высока, чтобы влиять на более легкие ионы, но не на тяжелые микрочастицы. При правильном выборе получим ЭР.

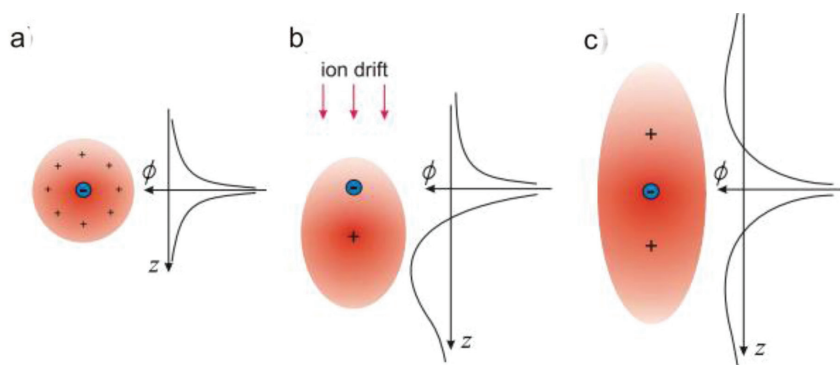


Рис. 4. Схема физического процесса между частицами [33]

Суперкоагуляция

Еще одно неожиданное открытие сделал Ю. Батурина. В ходе большой серии экспериментов он обнаружил «суперкоагуляцию» – процесс, при котором тысячи микрочастиц объединяются в агломерат за считанные секунды. Это открытие было названо «эффектом Батурина» [27].

На рис. 5 даны несколько примеров крупных агломератов микрочастиц. По размеру понятно, что эти структуры должны содержать от десятков тысяч и до миллиона микрочастиц.

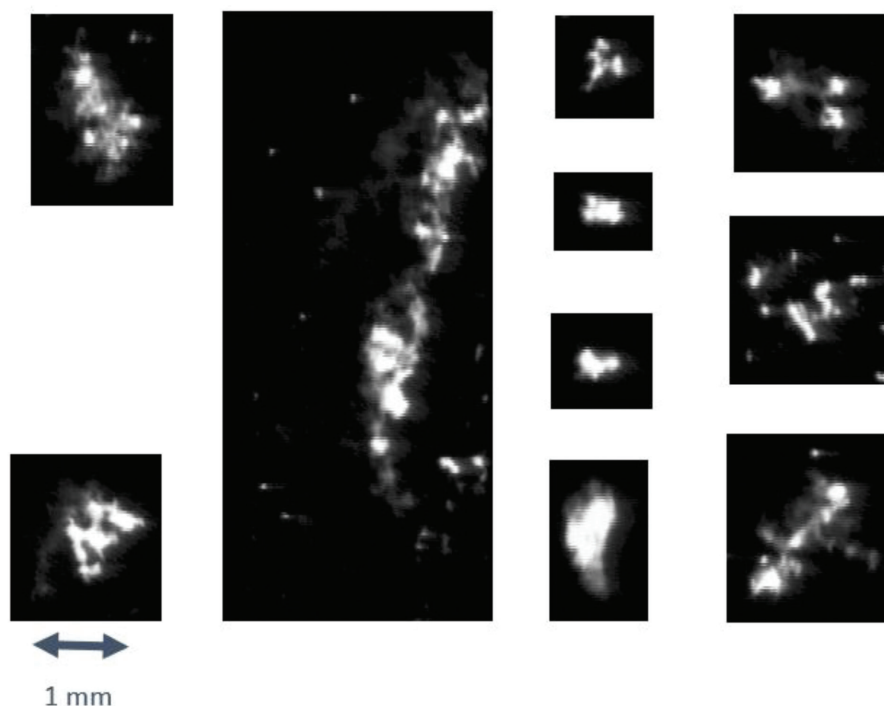


Рис. 5. Зарядовое гелеобразование микрочастиц [34]

Этот процесс суперкоагуляции нельзя обнаружить на Земле, т. к. гравитация удалила бы частицы и помешала детальному анализу.

Вполне возможно, что без этого процесса нас бы вообще не было! Это объясняется следующим образом: при звездном нуклеосинтезе образуются конденсируемые элементы. Они выбрасываются (вместе с H, He) в звездные ветры. Расширяющийся ветер охлаждает и создает условия для конденсации твердых частиц. Образуются и переносятся в межзвездную среду мелкие частицы пыли, где мы наблюдаем их в виде так называемых темных облаков, поскольку пыль поглощает звездный свет и переизлучает его в инфракрасном диапазоне.

Физика пылевой плазмы имеет первостепенное значение для термодинамики, химии и эволюции межзвездной среды и особенно звездообразования. Новые звезды рождаются в межзвездных облаках. Эти облака состоят из газа (H, He и др.) и частиц пыли (обычно 1 % по массе). Пыль необходима для охлаждения облака, что может вызвать гравитационный коллапс, поэтому пыль можно рассматривать как «спусковой крючок» звездообразования. Затем пыль попадает в звезду или выживает на планетах.

Для формирования планет коагуляция пыли является начальным и самым важным процессом. Более крупные агломераты коагулированных частиц могут быстрее оседать в средней плоскости околозвездного пылегазового

облака и вызывать дальнейшую нестабильность, которая приводит к образованию сначала планетезималей, а затем планет.

Очевидно, если бы процесс суперкоагуляции, открытый на МКС Ю. Батуриным, действовал и в облаке ранней Солнечной системы, то формирование планет могло бы происходить быстрее, и вероятность появления Солнечной системы в том виде, в каком мы ее знаем, становится более реальной. Все это вопрос временных масштабов: планеты должны сформироваться до того, как на звезде (Солнце) разовьется сильный звездный (солнечный) ветер, который разгонит околозвездное (околосолнечное) облако [23, 26].

Другие важные открытия на МКС касаются физики сдвиговых течений, структуры и толщины ударных фронтов, новых типов волновых явлений, критических явлений, фазовых переходов, процессов фазового расслоения – всего слишком много, чтобы упоминать здесь. Надеюсь, мне удалось передать часть волнения и трепета, которые подарили нам 20 лет исследований на МКС.

Заинтересованный читатель может обратиться к оригинальным публикациям в списке литературы.

Применение на Земле

Применение на Земле основано на технологических достижениях, которые были необходимы для проведения исследований коллоидной плазмы. Микрочастицы для этих исследований должны быть максимально однородными по размеру, чтобы их электрический заряд (который в равновесии пропорционален радиусу частиц) был одинаковым. Конечно, будут статистические вариации, но эти эффекты невелики, если микрочастицы несут большое число элементарных зарядов. В качестве микрочастиц использовались полимеры с низкой температурой плавления. Таким образом, чтобы эти частицы могли выжить в плазменной среде, плазма должна быть «холодной» – комнатной температуры.

Технологически это означает, что следует разработать источники плазмы, обеспечивающие достаточный запас заряженных частиц при низкой температуре ионов и высокой температуре электронов, так называемую холодную плазму [14].

Холодная атмосферная плазма

Если образование плазмы происходит в воздухе (речь идет о холодной атмосферной плазме), тогда рассматриваются три наиболее важных компонента: кислород, азот и водяной пар. Образование плазмы в такой среде определено более сложный процесс, чем в благородном газе. Всего происходит более 600 химических и физических реакций.

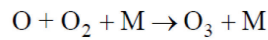
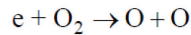
Отрицательные частицы: $e, O^-, O_2^-, O_3^-, O_4^-, H^-, OH^-, NO^-, N_2O^-, NO_2^-, NO_3^-$

Положительные частицы: $N^+, N_2^+, N_3^+, N_4^+, O^+, O_2^+, O_4^+, NO^+, N_2O^+, NO_2^+, H^+, H_2^+, H_3^+, OH^+, H_2O^+, H_3O^+$

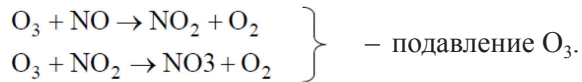
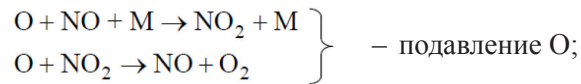
Нейтральные частицы: $N, N^*, N_2, N_2^*, N_2^{**}, O, O^*, O_2, O_2^*, O_3, NO, N_2O, NO_2, NO_3, N_2O_3, N_2O_4, N_2O_5, H, H_2, OH, H_2O, HO_2, H_2O_2, HNO, HNO_2, HNO_3$

Особый интерес для многих приложений представляют режимы азота и кислорода. Кислородный режим (еще называется озоновым режимом, поскольку озон является самой распространенной молекулой, получаемой в процессе плазмохимии) тесно связан и с химией воды. В основном имеем:

- Режим озона (бесшумный разряд, низкая энергия потребления)



- Режим оксидов азота (токсичный разряд, высокая энергия потребления)



Этот богатый химический состав можно использовать для различных целей при условии, что возможно спроектировать (или контролировать) особенности производства плазмы. Самое интересное – это создание «медицинской плазмы», способной инактивировать бактерии и вирусы и одновременно ускорять заживление ран [11–13]. Для этой цели в 2013 г. была создана стартап-компания «Терраплазма» – дочернее предприятие Общества Макса Планка. Название компании было выбрано, чтобы подчеркнуть, что ее место работы на Земле, хотя некоторые из разрабатываемых продуктов могут оказаться, по мнению космонавтов, весьма полезными для человека и в космосе [29, 30].

Плазменное лечение ран

Ниже (рис. 6) представлен первый медицинский плазменный аппарат, разработанный в дочерней компании Terraplasma Medical. Это ручное индуктивно перезаряжаемое устройство, которое требуется применять 60 секунд в день, чтобы обеззаразить рану и ускорить ее заживление.



Рис. 6. Плазменный медицинский аппарат:

а – прибор на зарядке; *б* – прибор в рабочем состоянии; *в* – насадка Plasma Care, стерильная, одноразовая, дополнительная

Данное плазменное устройство сначала оказывает сильное бактерицидное действие, а затем воздействует на способность к регенерации тканей (рис. 7).

Полное заживление наблюдается уже через неделю (лечение: 3 раза по 2 минуты через день). Рана была получена во время катания на лыжах здоровым молодым мужчиной (с разрешения Terraplasma GmbH).

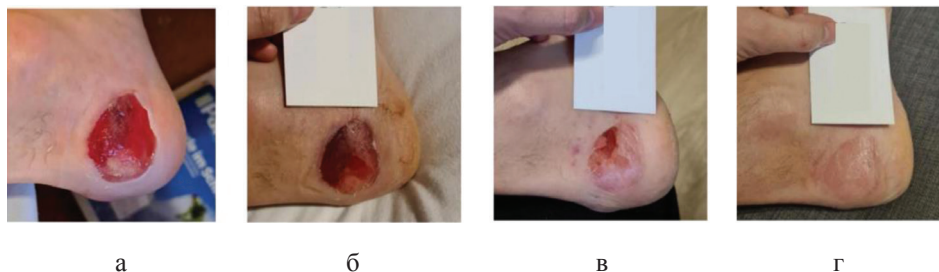


Рис. 7. Пример обработки раны:

а – начальная ситуация; *б* – после 1-го применения; *в* – после 2-го применения; *г* – после 3-го применения

Плазменная гигиена

Гигиенические стандарты сильно различаются по всему миру. Около 15 % всех смертей в мире вызваны инфекционными заболеваниями. При этом существует еще одна растущая и значительная угроза – устойчивые к антибиотикам бактерии. Вот цитата из недавнего международного отчета: «Глобальный рост устойчивости к антибиотикам представляет собой серьезную угрозу, поскольку снижает эффективность обычных антибиотиков против широко распространенных бактериальных инфекций».

В докладе Глобальной системы надзора за устойчивостью и применением противомикробных препаратов (GLASS) за 2022 г. отмечаются тревожные показатели устойчивости среди распространенных бактериальных патогенов. Серьезную озабоченность вызывают медианные зарегистрированные показатели в 76 странах, составляющие 42 % для цефалоспорино-резистентной *E. coli* третьего поколения и 35 % для метициллин-резистентного *Staphylococcus aureus* (MRSA). При инфекциях мочевыводящих путей, вызванных *E. coli*, в 2020 г. в одном из пяти случаев наблюдалась сниженная чувствительность к таким стандартным антибиотикам, как ампициллин, ко-тримоксазол и фторхинолоны, что затрудняет эффективное лечение распространенных инфекций.

Распространенная кишечная бактерия *Klebsiella pneumoniae* также показала повышенный уровень устойчивости к важнейшим антибиотикам.

Особую озабоченность вызывает появление и распространение инвазивной грибковой инфекции *Candida auris* с множественной лекарственной устойчивостью. Разработка перечня приоритетных грибковых патогенов ВОЗ включает всесторонний обзор грибковых инфекций и лекарственно-устойчивых грибов во всем мире ¹.

Особую озабоченность вызывают внутрибольничные инфекции. В Европе (карта 2008 г.) ситуация была такой, как показано на рис. 8.

Хотя с тех пор и отмечены некоторые улучшения, но ситуация существенно не изменилась.

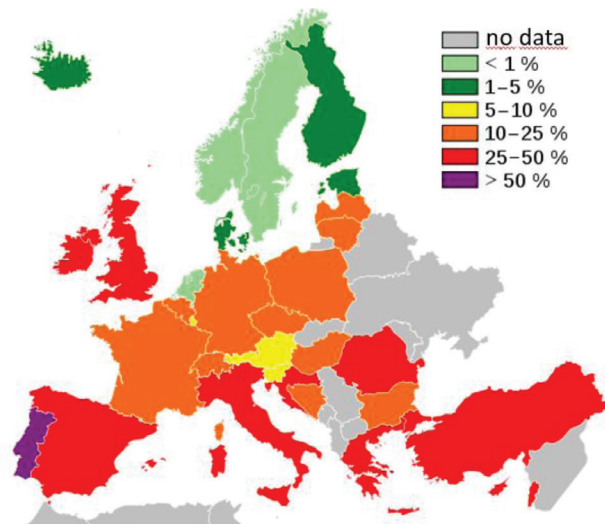


Рис. 8. Внутрибольничные инфекции (2008)

¹ Сотрудничество по борьбе с противомикробной устойчивостью. Глобальное бремя бактериальной устойчивости к противомикробным препаратам в 2019 г.: систематический анализ // *Ланцет*. – 2022. – № 399(10325). – С. 629–655. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0).

Как может помочь холодная атмосферная плазма?

На рис. 9 показаны результаты воздействия холодной атмосферной плазмы на MRSA – бактерию с высокой устойчивостью к антибиотикам. В течение 15 секунд обработки плазмой все бактерии (10 миллионов) были инактивированы.



Рис. 9. Инактивация бактерий после обработки плазмой

Холодная атмосферная плазма атакует бактерии (и вирусы) разными способами – механически, электрически, термически и химически. Из-за такого множества процессов очень сложно, если вообще возможно, развить устойчивость к плазменной обработке. Кроме того, поскольку плазма газоподобна, она может достигать небольших участков (например, кожи), куда не могут проникнуть мази и бальзамы. К тому же отсутствуют побочные эффекты. Ниже показан противомикробный эффект плазменного лечения.

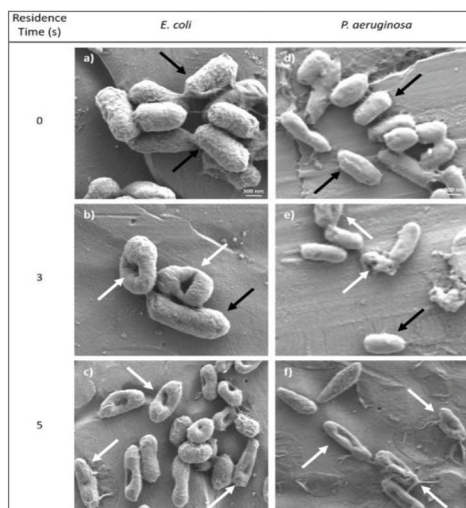


Рис. 10. *E. coli* (a, b, c) и *P. aeruginosa* (d, e, f) до и после обработки плазмой:

a, d – необработанные контрольные изображения;
b, e – бактерии после 3-секундной обработки плазмой;
c, f – бактерии после 5-секундной обработки плазмой.

Снимки получены с помощью СЭМ [35]

Таким образом, холодная атмосферная плазма очень эффективна для гигиены поверхностей, воды, пищевых продуктов, воздуха – все это области текущих исследований [16, 17, 20]. Практическое применение плазмы для этих целей находится в стадии разработки.

Дезинфекция одежды

Напоследок небольшой экскурс в мир коммерции. Плазменный аппарат для удаления запаха с одежды разработала компания «Терраплазма» совместно с немецкой компанией Bosch (рис. 11). Это устройство нужно просто включить и провести по одежде (или любым тканям) и после нескольких движений все введшиеся в материал запахи будут устранены, а не скрыты как при применении большинства химических аэрозолей для борьбы с запахом. В нашем случае молекулы запаха улавливаются плазмой и расщепляются.

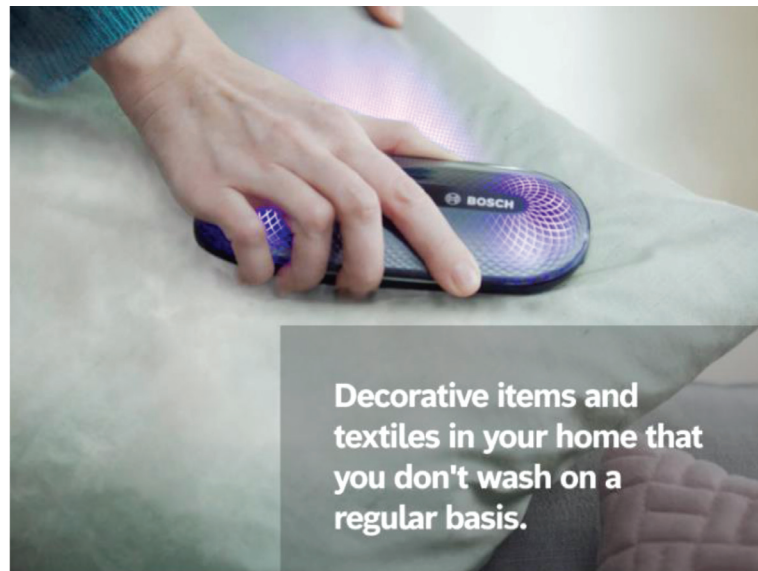


Рис. 11. Плазменный аппарат для удаления запаха с одежды

Это устройство, по мнению космонавтов, было бы очень кстати и на МКС. Однако согласно фундаментальным исследованиям применение плазмы гораздо шире. В настоящее время ведется множество исследований: в сельском хозяйстве плазма обеспечивает усиление роста растений без загрязнения грунтовых вод удобрениями; в очистке воды – солнечная энергия позволяет дезинфицировать ее и производить питьевую воду хорошего качества; в лечении рака – выборочно инактивирует раковые клетки, не затрагивая здоровые, усиливает действие лекарств и повышает эффективность препаратов местного применения и т. д. [15, 18, 19, 21, 22, 25].

Краткие выводы

Надеюсь, этот краткий экскурс в плазменный мир достиг двух целей:

во-первых, подтвердил, что исследования в космосе не только расширяют знания о фундаментальных процессах, но и стимулируют неожиданные идеи и приносят пользу для людей на Земле;

во-вторых, заинтересовал читателя, а также позволил отдать должное памяти одного из самых замечательных ученых мира – Владимира Фортова.

Перевод с английского языка. Оригинальный текст статьи размещена на сайте ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» на странице научного журнала «Пилотируемые полеты в космос». https://www.gctc.ru/media/files/Periodicheskie_izdaniya/ppk_2024_3_total_52/Plasma_Research.on.the.ISS.pdf

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Плазменный кристалл: кулоновская кристаллизация в пылевой плазме / Х. Томас, Г. Морфилл, В. Деммель [и др.] // Письма по физике. – 1994. – № 73(5). – С. 652.
- [2] Томас, Х.М. Динамика плавления плазменного кристалла / Х.М. Томас, Г. Морфилл // Природа. – 1996. – № 379(6568). – С. 806–809.
- [3] Кристаллические структуры сильносвязанной пылевой плазмы в слоях тлеющего разряда постоянного тока / В.Е. Фортов, А.П. Нефедов, В.М. Торчинский, В.И. Молотков [и др.] // Письма по физике. – 1997. – № 229(5). – С. 317–322.
- [4] Пылевая плазма, индуцированная солнечной радиацией в условиях микрогравитации: эксперимент на борту орбитальной станции «Мир» / В.Е. Фортов, А.П. Нефедов, О.С. Ваулина, А.М. Липаев [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1998. – № 87. – С. 1087–1097.
- [5] Конденсированная плазма в условиях микрогравитации / Г. Морфилл, Х.М. Томас, У. Конопка, Х. Ротермель [и др.] // Письма по физике. – 1999. – № 83(8). – С. 1598.
- [6] Сложная (пылевая) плазма: современное состояние, открытые вопросы, перспективы / В.Е. Фортов, А.В. Ивлев, С.А. Храпак, А.Г. Храпак [и др.] // Отчеты по физике. – 2005. – № 421(1, 2). – С. 1–103.
- [7] ПКЭ-Нефедов: эксперименты с плазменными кристаллами на Международной космической станции / А.П. Нефедов, Г. Морфилл, В.Е. Фортов, Х.М. Томас [и др.] // Новый журнал физики. – 2003. – № 5(1). – С. 33.
- [8] Комплексная плазменная лаборатория ПК-3 плюс на Международной космической станции / Х.М. Томас, Г. Морфилл, В.Е. Фортов, А.В. Ивлев [и др.] // Новый физический журнал. – 2008. – № 10(3). – С. 033036.
- [9] Морфилл, Г. Сложная плазма: междисциплинарная область исследований / Г. Морфилл, А.В. Ивлев // Обзоры современной физики. – 2009. – № 81(4). – С. 1353.
- [10] Пылевая плазма / В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, С.А. Храпак, В.И. Молотков [и др.] // Успехи физики. – 2004. – № 47(5). – С. 447.
- [11] Плазменная медицина: вводный обзор / М.Г. Конг, Г. Кроезен, Г. Морфилл, Т. Носенко [и др.] // Новый журнал физики. – 2009. – № 11(11). – С. 115012.

- [12] Морфилл, Г. Фокус на плазменную медицину / Г. Морфилл, М.Г. Конг, Дж.Л. Циммерманн // Новый журнал физики. – 2009. – № 11(11). – С. 115011.
- [13] Первое перспективное рандомизированное контролируемое исследование по снижению бактериальной нагрузки с использованием холодной атмосферной плазмы при лечении хронических ран у пациентов / Дж. Исбари, Г. Морфилл, Х.У. Шмидт, М. Георги [и др.] // Британский журнал дерматологии. – 2010. – № 163(1). – С. 78–82.
- [14] Успешное и безопасное использование 2-минутной холодной атмосферной аргоновой плазмы при хронических ранах: результаты рандомизированного контролируемого исследования / Г. Исбари, Дж. Хейнлин, Т. Симидзу, Дж.Л. Циммерманн [и др.] // Британский журнал дерматологии. – 2012. – № 167(2). – С. 404–410.
- [15] Применение плазмы в медицине с особым акцентом на дерматологию / Дж. Хейнлин, Г. Исбари, В. Штольц, Г. Морфилл [и др.] // Журнал Европейской академии дерматологии и венерологии. – 2011. – № 25(1). – С. 1–11.
- [16] Деколонизация *MRSA*, *S. aureus* и *E. coli* холодной атмосферной плазмой с использованием свиной кожи *in vitro* / Т. Майш, Т. Симидзу, Ю.Ф. Ли, Дж. Хейнлин [и др.] // PloS one. – 2012. – № 7 (4). – С. e34610.
- [17] Холодная атмосферная плазма (ХАП) изменяет экспрессию генов ключевых молекул механизма заживления ран и улучшает заживление ран *in vitro* и *in vivo* / С. Арндт, П. Унгер, Э. Вакер, Т. Симидзу [и др.] – DOI:10.1371/journal.pone.0079325 // PloS one. – 2013. – № 8(11). – С. e79325.
- [18] Холодная атмосферная плазма: новая стратегия индукции старения клеток меланомы / С. Арндт, Э. Вакер, Ю.Ф. Ли, Т. Симидзу [и др.] // Экспериментальная дерматология. – 2013. – № 22(4). – С. 284–289.
- [19] Восстановление чувствительности химиорезистентных клеток глиомы холодной атмосферной плазмой / Дж. Керитцер, В. Боксхаммер, А. Шефер, Т. Симидзу [и др.] // PloS one. – 2013. – № 8(5). – С. e64498.
- [20] Плазмохимическая модель поверхностного микроразряда во влажном воздухе и динамика активных нейтральных частиц / Ю. Сакияма, Д.Б. Грейвс, Х.В. Чанг, Т. Симидзу [и др.] // Журнал физики D: Прикладная физика. – 2012. – № 45(42). – С. 425201.
- [21] Инактивация поверхностно переносимых микроорганизмов и повышение прорастания образцов семян холодной атмосферной плазмой / А. Митра, Ю.Ф. Ли, Т.Г. Клемпфл, Т. Симидзу [и др.] // Пищевые и биотехнологические технологии. – 2014. – № 7. – С. 645–653.
- [22] Сивачандиран, Л. Усиление прорастания семян и роста растений с помощью плазмы холодного воздуха при атмосферном давлении: комбинированный эффект обработки семян и воды / Л. Сивачандиран, А. Хачеф. – DOI:10.1039/C6RA24762H // RSC Advances. – 2017. – № 7. – С. 1822–1832.
- [23] Вуд, Дж.А. Обзор моделей солнечных туманностей: в книге Метеориты и ранняя Солнечная система Дж.Ф. Керриджа и М.С. Мэтьюса (ред.) / Дж.А. Вуд, Г. Морфилл. – Тусон: Аризона Пресс, 1988. – С. 329–347.
- [24] Дюбрюль, Б. Пылевой субдиск в протопланетной туманности / Б. Дюбрюль, Г. Морфилл, М. Стерзик // Icarus. – 1995. – № 114(2). – С. 237–246.
- [25] Рост и форма планетарных саженцев: результаты эксперимента по агрегации в условиях микрогравитации / Дж. Блюм, Г. Вурм, С. Кемпф, Т. Поппе [и др.] // Письма по физике. – 2000. – № 85(12). – С. 2426.

- [26] Элементарная физика сложной плазмы / В. Цитович, Г. Морфилл, С. Владимиров, Х. Томас // Конспект лекций по физике. – Спрингер, 2008. – № 731. – ISBN 978-3-540-29000-1. – Текст: непосредственный.
- [27] Сложная и пылевая плазма: от лаборатории до космоса / В.Е. Фортов, Г.Э. Морфилл // CRC Пресс. – 2010. – ISBN 978-1-4200-8311-8. – Текст: непосредственный.
- [28] Сложная плазма и коллоидные дисперсии: исследования классических жидкостей и твердых тел с разрешением частиц / А. Ивлев, Х. Лоуэн, Г. Морфилл, П. Ройалл // World Scientific. – 2012. – ISBN-13:978-9814350068. – Текст: непосредственный.
- [29] Морфилл, Г. Исследования плазмы на пределе – от Международной космической станции до применения на Земле / Г. Морфилл, Ю. Батулин, В. Фортов. – Издательство Имперского колледжа, 2013. – ISBN 978-1-908977-24-3. – Текст: непосредственный.
- [30] Плазменная медицина: применение низкотемпературной газовой плазмы в медицине и биологии / М. Ларусси, М. Конг, Г. Морфилл, В. Штольц. – Изд-во Кембриджского университета, 2012. – 364 с. – ISBN-13: 978-1107006430. – Текст: непосредственный.
- [31] ПКЕ-Нефедов: Эксперименты с плазменными кристаллами на Международной космической станции / А. Нефедов [и др.]. – DOI:10.1088/1367-2630/5/1/333 // Новый физический журнал. – 2003. – № 5(1). – С. 33.1–33.10.
- [32] Сверхзвуковые дислокации, наблюдаемые в плазменном кристалле / В. Носенко, С.К. Жданов, Г.Е. Морфилл. – DOI:10.1103/PhysRevLett.99.025002 // Письма по физике. – 2007. – № 99(2). – 025002 p.
- [33] Первое наблюдение ЭР плазмы / А. В. Ивлев, Г. Морфилл, Х.М. Томас, К. Рот [и др.]. – DOI:10.1103/PhysRevLett.100.095003 // Письма по физике.– 2008. – № 100(9). – 095003 C.
- [34] Зарядовое гелеобразование микрочастиц / Ю. Конопка, Ф. Маклер, А.В. Ивлев, М. Кречмер [и др.]. – DOI:10.1088/1367-2630/7/1/227 // Новый физический журнал. – 2005. – № 7(1). – С. 227.
- [35] Нетепловая плазменная инактивация бактерий в воде с использованием микрожидкостного реактора / Л. Патингар [и др.]. – DOI:10.1016/j.watres. 2021.117321 // Water Research. – 2021. – № 201. – С. 9.

REFERENCES

- [1] Plasma Crystal: Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma / H. Thomas, G. Morfill, V. Demmel [et al.] // Physical Review Letters. – 1994. – No 73(5). – P. 652.
- [2] Thomas, H.M. Melting Dynamics of a Plasma Crystal / H.M. Thomas, G.E. Morfill // Nature. – 1996. – No 379(6568). – P. 806–809.
- [3] Crystalline Structures of Strongly Coupled Dusty Plasmas in dc Glow Discharge Strata / V.E. Fortov, A.P. Nefedov, V.M. Torchinsky, V.I. Molotkov [et al.] // Physics Letters. – 1997. – No 229(5). – P. 317–322.
- [4] Dusty Plasma Induced by Solar Radiation Under Microgravitational Conditions: an Experiment on Board the Mir Orbiting Space Station / V.E. Fortov, A.P. Nefedov, O.S. Vaulina, A.M. Lipaev [et al.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1998. – No 87. – P. 1087–1097.
- [5] Condensed Plasmas Under Microgravity / G. Morfill, H.M. Thomas, U. Konopka, H. Rothermel [et al.] // Physical Review Letters. – 1999. – No 83(8). – P. 1598.

- [6] Complex (dusty) Plasmas: Current Status, Open Issues, Perspectives / V.E. Fortov, A.V. Ivlev, S.A. Khrapak, A.G. Khrapak [et al.] // *Physics Reports*. – 2005. – No 421(1, 2). – P. 1–103.
- [7] PKE-Nefedov: Plasma Crystal Experiments on the International Space Station / A.P. Nefedov, G. Morfill, V.E. Fortov, H.M. Thomas [et al.] // *New Journal of Physics*. – 2003. – No 5(1). – P. 33.
- [8] Complex Plasma Laboratory PK-3 Plus on the International Space Station / H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov, A.V. Ivlev [et al.] // *New Journal of Physics*. – 2008. – No 10(3). – P. 033036.
- [9] Morfill, G.E. Complex Plasmas: An Interdisciplinary Research Field / G. Morfill, A.V. Ivlev // *Reviews of Modern Physics*. – 2009. – No 81(4). – P. 1353.
- [10] Dusty Plasmas / V.E. Fortov, A.G. Khrapak, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov [et al.] // *Physics-Uspekhi*. – 2004. – No 47(5). – P. 447.
- [11] Plasma Medicine: an Introductory Review / M.G. Kong, G. Kroesen, G. Morfill, T. Nosenko [et al.] // *New Journal of Physics*. – 2009. – No 11(11). – P. 115012.
- [12] Focus on Plasma Medicine / G.E. Morfill, M.G. Kong, J.L. Zimmermann // *New Journal of Physics*. – 2009. – No 11(11). – P. 115011.
- [13] A First Prospective Randomized Controlled Trial to Decrease Bacterial Load Using Cold Atmospheric Plasma on Chronic Wounds in Patients / G. Isbary, G. Morfill, H.U. Schmidt, M. Georgi [et al.] // *British Journal of Dermatology*. – 2010. – No 163(1). – P. 78–82.
- [14] Successful and Safe Use of 2 Min Cold Atmospheric Argon Plasma in Chronic Wounds: Results of a Randomized Controlled Trial / G. Isbary, J. Heinlin, T. Shimizu, J.L. Zimmermann [et al.] // *British Journal of Dermatology*. – 2012. – No 167(2). – P. 404–410.
- [15] Plasma Applications in Medicine With a Special Focus on Dermatology / J. Heinlin, G. Isbary, W. Stolz, G. Morfill [et al.] // *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*. – 2011. – No 25(1). – P. 1–11.
- [16] Decolonization of MRSA, *S. Aureus* and *E. Coli* by Cold-Atmospheric Plasma Using a Porcine Skin in vitro / T. Maisch, T. Shimizu, Y.F. Li, J. Heinlin [et al.] // *PloS one*. – 2012. – No 7(4). – P. e34610.
- [17] Cold Atmospheric Plasma (CAP) Changes Gene Expression of Key Molecules of the Wound Healing Machinery and Improves Wound Healing in vitro and in vivo / S. Arndt, P. Unger, E. Wacker, T. Shimizu [et al.] // *PloS one*. – 2013. – No 8(11). – P. e79325.
- [18] Cold Atmospheric Plasma, a New Strategy to Induce Senescence in Melanoma Cells / S. Arndt, E. Wacker, Y.F. Li, T. Shimizu [et al.] // *Experimental Dermatology*. – 2013. – No 22(4). – P. 284–289.
- [19] Restoration of Sensitivity in Chemo – Resistant Glioma Cells by Cold Atmospheric Plasma / J. Köritzer, V. Boxhammer, A. Schäfer, T. Shimizu [et al.] // *PloS one*. – 2013. – No 8(5). – P. e64498.
- [20] Plasma Chemistry Model of Surface Microdischarge in Humid Air and Dynamics of Reactive Neutral Species / Y. Sakiyama, D.B. Graves, H.W. Chang, T. Shimizu [et al.]. – DOI:10.1088/0022-3727/45/42/425201 // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2012. – No 45(42). – P. 425201.
- [21] Inactivation of Surface-Borne Microorganisms and Increased Germination of Seed Specimen by Cold Atmospheric Plasma / A. Mitra, Y.F. Li, T. Shimizu, J. Jeon [et al.] // *Food and Bioprocess Technology*. – 2014. – No 7. – P. 645–653.

- [22] Sivachandiran, L. Enhanced Seed Germination and Plant Growth by Atmospheric Pressure Cold air Plasma: Combined Effect of Seed and Water Treatment / L. Sivachandiran, A. Khacef. – DOI: 10.1039/C6RA24762H // RAC Advances. – 2017. – No 7(4). – P. 1822–1832.
- [23] Wood, J.A. A Review of Models of Solar Nebulae: in Meteorites and the Early Solar System by J.F. Kerridge and M.S. Matthews (eds.) / J.A. Wood, G. Morfill. – Tucson: Arizona Press, 1988. – P. 329–347.
- [24] Dubrulle, B. The Dust Subdisk in the Protoplanetary Nebula / B. Dubrulle, G. Morfill, M. Sterzik // Icarus. – 1995. – No 114(2). – P. 237–246.
- [25] Growth and Form of Planetary Seedlings: Results From a Microgravity Aggregation Experiment / J. Blum, G. Wurm, S. Kempf, T. Poppe, [et al.]. – Physical Review Letters. – 2000. – No 85(12). – P. 2426.
- [26] Recommended Books of Possible Interest: Elementary Physics of Complex Plasmas (Lecture Notes in Physics 731) / V. Tsytovich, G. Morfill, S. Vladimirov, H. Thomas. – Springer, 2008. – 384 p. – ISBN 978-3-540-29000-1. – Text: direct.
- [27] Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space / V.E. Fortov, G. Morfill. – CRC Press, 2010. – 440 p. – ISBN 978-1420083118. – Text: direct.
- [28] Complex Plasmas and Colloidal Dispersions: Particle-Resolved Studies of Classical Liquids and Solids / A. Ivlev, H. Loewen, G. Morfill, P. Royall // World Scientific Publishing Company, 2012. – 336 p. – ISBN-13:978-9814350068. – Text: direct.
- [29] Plasma Research at the Limit: From the International Space Station to Applications on Earth / G. Morfill, Yu. Baturin, V. Fortov. – Imperial College Press, 2013. – 312 p. – ISBN-13: 978-1908977243. – Text: direct.
- [30] Plasma Medicine: Applications of Low-Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology / M. Laroussi, M. Kong, G. Morfill, W. Stolz. – Cambridge University Press, 2012. – 364 p. – ISBN-13: 978-1107006430. – Text: direct.
- [31] PKE-Nefedov: Plasma Crystal Experiments on the International Space Station / A. Nefedov [et al.]. – DOI:10.1088/1367-2630/5/1/333 // New Journal of Physics. – 2003. – No 5(1). – P. 33.1–33.10.
- [32] Supersonic Dislocations Observed in a Plasma Crystal / V. Nosenko, S.K. Zhdanov, G. Morfill. – DOI:10.1103/PhysRevLett.99.025002 // Physical Review Letters. – 2007. – No 99. – 025002 p.
- [33] First Observation of Electrorheological Plasmas / A.V. Ivlev, G. Morfill, H.M. Thomas, C. R ath [et al.]. – DOI:10.1103/PhysRevLett.100.095003 // Physical Review Letters. – 2008. – No 100(9). – 095003 p.
- [34] Charge-induced gelation of microparticles / Yu. Konopka, F. Makler, A.V. Ivlev, M. Kretschmer [et al.]. – DOI:10.1088/1367-2630/7/1/227 // New Journal of Physics. – 2005. – No 7(1). – P. 227.
- [35] Non-Thermal Plasma-Based Inactivation of Bacteria in Water Using a Microfluidic Reactor / L. Patinglag [et al.]. – DOI:10.1016/j.watres.2021.117321 // Water Research. – 2021. – No 201. – P. 9.