

## НАНОСТРУКТУРЫ

### *Наноструктуры в природе. Для адгезии пауков важна каждая щетинка*

Иерархическая структура щетинок на конечностях гекконов и некоторых пауков (например, бродячего паука *Cupiennius salei*) позволяет им перемещаться по вертикальным стенкам и даже потолку без выделения клейкой жидкости, которую используют мухи и другие насекомые. Исследователи убедительно доказали, что “сухая адгезия” гекконов обусловлена силами Ван-дер-Ваальса (см. *Перст* [1]). Взаимодействие лапок пауков с поверхностью по-прежнему является предметом изучения. Современные методы исследований помогли выяснить, что лапки прикрепляются к поверхности с помощью тысячи щетинок, объединенных в плотную “щётку”, и двух коготков. Щетинки покрыты микровыростами (микротрихиями) с нанопластинками-“шпателями” на концах. Эти контактные элементы обеспечивают адгезию за счет сил Ван-дер-Ваальса. Нагрузки, возникающие при контакте с поверхностью или отрыве от нее, распределяются равномерно благодаря специфическому расположению в щетинках упрочняющих кристаллов хитина (подробнее см. *Перст* [2]). Но что помогает паукам легко прикрепляться и к неровным, и к гладким поверхностям? Исследователи из Kiel Univ. (Германия) недавно опубликовали новую информацию, полезную для создания эффективного “сухого клея” [3]. Они впервые измерили адгезию индивидуальных щетинок паука *Cupiennius salei* к поверхностям разного типа и показали, что она определяется морфологией щетинки и особенно формой ее кончика. Интересно, что даже у соседних щетинок эти формы могут быть разными (рис. 1).

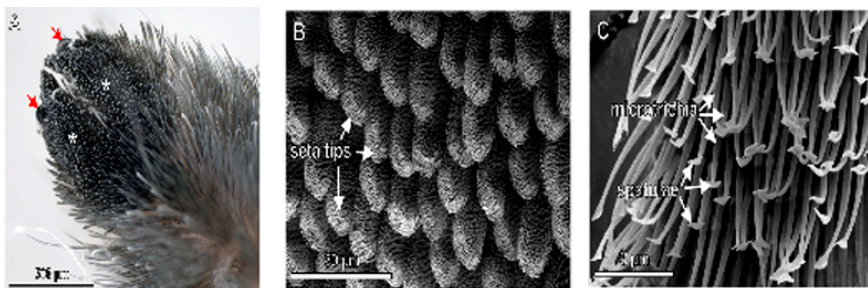


Рис. 1. (А) – Лапка паука *C. salei* (вид снизу). Звездочками показана двудольная “щетка” из примерно 2 тысяч щетинок. Стрелки указывают на коготки. (В, С) – SEM изображения кончиков щетинок (seta tips) и контактных элементов-шпателей (spatulae) на концах микротрихий.

И далее ...

## ФОТОНИКА

2 Волнорезы для плазмонов

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

4 Противораковые лекарства на борных фуллеренах

## СПИНТРОНИКА

4 Скирмион проходит пробы на роль кубита

## ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

6 Вторая Международная конференция “Физика конденсированных состояний” (ФКС-2021)

## 7 КОНФЕРЕНЦИИ

Международный семинар “Достижения современной физики: от капли Гелия до Вселенной”, (“Advances in modern physics: From a Helium droplet to the Universe”), посвященный 75-летию Григория Воловика, 6-7 сентября 2021 г., ИТФ им. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

Несколько щетинок произвольно выдернули из середины “щетки” на нижней поверхности лапки и закрепили в специальных держателях, позволяющих измерять силу адгезии. Сначала провели эксперименты на подложке из стекла. Исследователи ожидали, что для всех щетинок оптимальный угол контакта с поверхностью будет одним и тем же. Неожиданно оказалось, что максимальная адгезия для разных щетинок проявляется при разных углах контакта –  $45^\circ$ ,  $85^\circ$  и  $90^\circ$  для щетинок 1, 2 и 3, показанных на рис. 2. Вероятно, существуют щетинки и с другими оптимальными углами контакта.

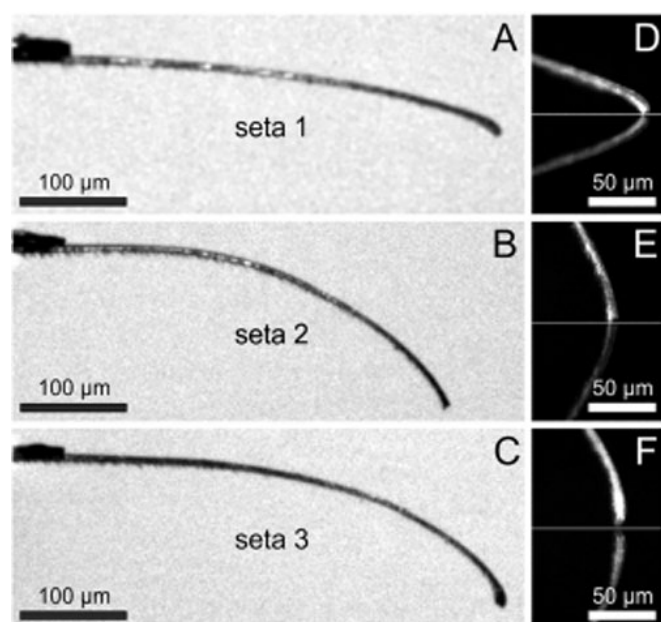


Рис. 2. Отдельные щетинки, закрепленные в держателе для измерения силы адгезии к стеклу. Щетинки, выдернутые произвольно из центра “щетке”, имеют разную кривизну и форму кончиков. Максимальная адгезия для щетинки 1 получена при угле контакта  $45^\circ$ , для щетинки 2 при  $85^\circ$  и для щетинки 3 при  $\sim 90^\circ$ . Справа показаны зеркальные отображения кончиков щетинок.

Для дальнейших измерений адгезии выбирали контактный угол, оптимальный для данной щетинки. Использовали подложки с гладкой поверхностью (стекло, эпоксидная резина, силикон, фторопласт) и подложки из эпоксидной резины с различной степенью шероховатости. В экспериментах с гладкими поверхностями максимальная адгезия наблюдалась для щетинок на гидрофильной стеклянной подложке, а минимальная – на гидрофобном фторопласте (30% от величины для стекла). Для эпоксидной резины и силикона с небольшой гидрофильностью результаты оказались промежуточными. Это говорит о том, что для адгезии паука *C. salei* важны не только силы Ван-дер-Ваальса,

но и водородные связи. Максимальную адгезию к неровной поверхности зафиксировали у щетинки 1 (при этом сила адгезии увеличивалась с ростом шероховатости). Щетинка 3 показала минимальную адгезию. По мнению авторов [3] форма кончика щетинки при контакте с подложкой влияет на распределение гибких микротрихий (и, соответственно, нанопластинок-“шпателей”) и играет ключевую роль в возникновении адгезии. Можно предположить, что природа оптимизировала морфологию индивидуальных щетинок (особенно форму кончиков) и их положение в общем “оркестре” на нижней поверхности лапки так, чтобы обеспечить эффективное взаимодействие с самыми разными поверхностями в местах обитания пауков.

Конечно, синтезировать такие сложные структуры как у паука практически невозможно, но исследователи надеются, что полученные ими новые результаты помогут создать более эффективные адгезивы на основе нановолокон из целлюлозы, углеродных нанотрубок или других наноматериалов.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 13, вып. 6, с.4 \(2006\).](#)
2. [ПерсТ 26, вып. 5/6, с.4 \(2019\).](#)
3. *V.Poerschke et al., Front. Mech.Eng. 7, 70 2297 (2021).*

## ФОТОНИКА

### Волнорезы для плазмонов

Дифракция, согласно школьному определению – это проникновение света в область геометрической тени за счет его волновой природы. Однако волновые свойства в фотонике могут проявляться и с точностью до наоборот – в те области, куда по законам геометрической оптики должен проникать свет, он не идет. Подобный эффект для другого типа волн – поверхностных гравитационных волн на воде – известен давно, и активно используется для защиты пляжей от размывания и сильных волн. Группа исследователей из Израиля, Германии и США в недавней статье [1] предложила новый тип волновода, состоящий из периодической системы металлических наноблоков, подобных волнорезам на море (рис. 1а).

Авторы теоретически и экспериментально исследовали волноводный эффект для поверхностных плазмон-поляритонных волн. Экспе-

римент основан на исследовании волнового поля с помощью сканирующего зондового оптического микроскопа. Лазер генерирует оптическую волну ближнего ИК-диапазона, затем с помощью согласующей решетки на поверхности металла возбуждается поверхностная плазмон-поляритонная волна (рис. 1б).

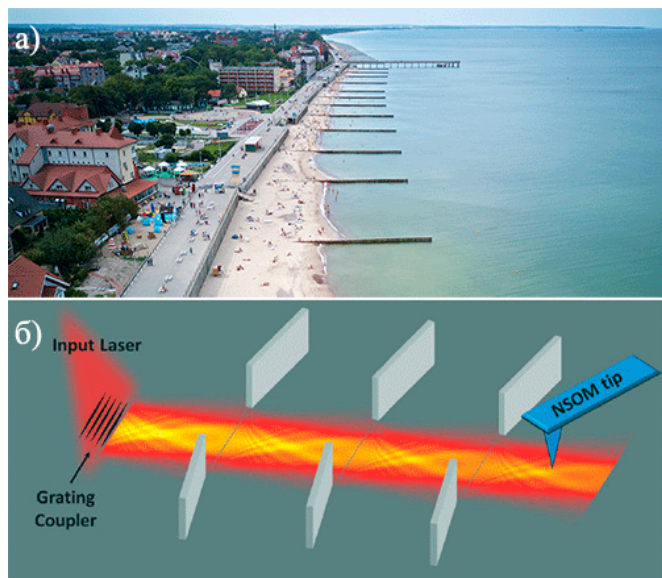


Рис. 1. а - Волнорезы на Балтийском море (г. Зеленоградск), б - Схема эксперимента из статьи [1].

Волноводом служит система щелей, состоящая из периодически расположенных металлических плоскостей, стоящих перпендикулярно направлению распространения волны. Теоретическое рассмотрение основано на решении уравнения Гельмгольца и нахождении системы собственных функций для периодической решетки. На рис. 2 приведено сравнение теории и эксперимента для основной моды. Видно, что волноводный эффект имеет место, в эксперименте также присутствует затухание плазмон-поляритонной волны.

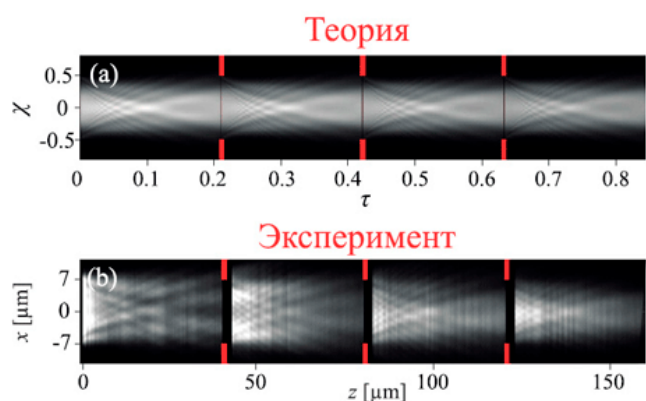


Рис. 2. Теоретический расчет и экспериментальная картина распространения плазмон-поляритонных волн в волноводе – системе щелей.

Механизм возникновения волноводного эффекта в данном случае заключается в периодическом “обрезании” тех частей волны, которые пытаются уйти в свободное пространство за счет дифракционного расплывания. При этом волна остается запертой в волноводе, несмотря на то, что между “волнорезами” есть свободное пространство. Здесь важным является соотношение длины волны и периода решетки, которое было теоретически рассчитано авторами статьи.

Изменение геометрии такого “щелевого” волновода можно использовать и для фокусировки волны. На рис. 3 приведен теоретический расчет фокусировки плазмон-поляритонной волны, происходящей при постепенном ограничении волнорезами.

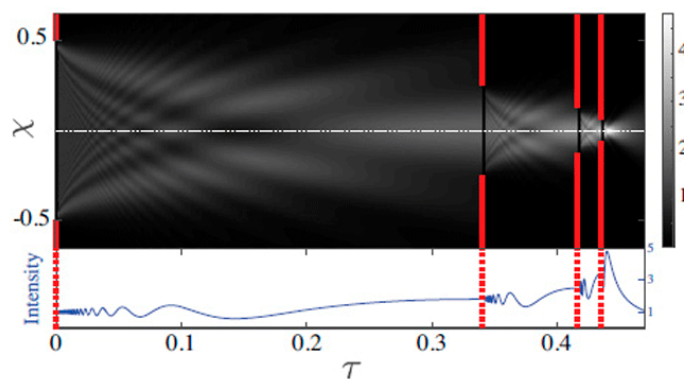


Рис. 3. Расчет фокусировки волны в системе сужающихся щелей. Ширина каждой следующей щели в два раза меньше предыдущей. На вставке внизу – интенсивность волны вдоль оси волновода.

Итак, дифракция дает нам новый способ управления волнами. Подобные системы перспективны для управления не только оптическими волнами, но и волнами терагерцового диапазона, для которых создание эффективных волноводов является актуальной задачей.

З. Пятакова

1. D.Weisman et al., *Phys. Rev. Lett.* **127**, 014303 (2021).



## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Противораковые лекарства на борных фуллеренах

Ученые из Shahid Chamran Univ. of Ahvaz (Иран) [1] провели теоретический анализ взаимодействия между известным противоопухолевым препаратом недаплатином (NedaPt) и полностью борными фуллереноподобными системами  $B_{40}$ , содержащими, в том числе, атомы лития и натрия. По их мнению, полученные в результате данные должны способствовать развитию эффективных систем доставки лекарственных средств на основе борсодержащих материалов. Исследователи выполнили детальные расчеты с помощью теории функционала плотности в программе DMol<sup>3</sup> с функционалом PBE и учетом слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия. Компьютерное моделирование проводили как в газовой фазе, так и в водном растворе. Авторы убедились, что молекула недаплатина стремится к ковалентному связыванию с поверхностью борной клетки посредством атома кислорода (см. рис.), при этом они рассмотрели возможность присоединения как одной, так и одновременно двух молекул препарата к внешней стенке фуллера.

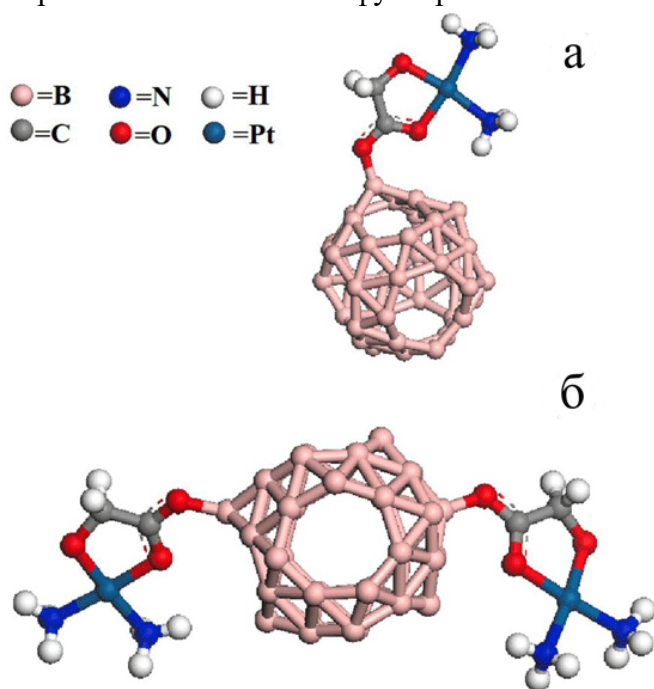


Рис. Атомные комплексы борного фуллера с одной NedaPt- $B_{40}$  (а) и двумя 2NedaPt- $B_{40}$  (б) молекулами лекарства недаплатина (NedaPt).

Авторы отмечают, что присутствие внутри борного каркаса атомов лития и натрия существенно усиливает адсорбцию как в газовой фазе, так и в водном растворе. Так, например, энергия адсорбции в расчете на молекулу

недаплатина составляет около 28 ккал/моль для эндоэдральных комплексов  $Li@B_{40}$  и  $Na@B_{40}$ , что значительно выше, чем для классического незамещенного  $B_{40}$ . Кроме процессов адсорбции авторы оценили также электронные характеристики соединений, такие как пограничные энергии НОМО и LUMO, НОМО-LUMO щель и дипольный момент. Как выяснилось, присоединение молекул лекарства к  $B_{40}$  существенно влияет на эти характеристики. Например, НОМО-LUMO щель заметно уменьшается, что может послужить дополнительным критерием, для определения присутствия препарата. Дипольные моменты у комплексов фуллерен-лекарство, напротив, выше, чем у клеток  $B_{40}$ . По мнению авторов, высокие дипольные моменты свидетельствуют о хорошей растворимости исследуемых систем в полярных средах, например, в воде, что является одним из ключевых факторов при разработке носителей лекарственных средств. Подводя итог, можно предположить, что борные фуллерены и их эндоэдральные комплексы являются неплохими кандидатами для разработки на их основе систем доставки лекарственных средств следующего поколения и дальнейшего развития наномедицины.

М. Маслов

1. E.Shakerzadeh, *Comp. Theor. Chem.* **1202**, 113339 (2021).

## СПИНТРОНИКА

### Скирмион проходит пробы на роль кубита

Для реализации квантового компьютера, прежде всего, необходимо определиться с тем физическим объектом, который будет выполнять роль кубита – аналога бита информации при квантовых вычислениях. Это не так просто, поскольку физическая реализация кубита должна удовлетворять ряду строгих и, на первый взгляд, противоречащих друг другу требований, названных по имени американского теоретика критериями Ди Винченцо [1]. Так, с одной стороны, кубиты должны практически не взаимодействовать с окружающей средой, длительное время находясь в когерентном состоянии, с другой стороны, они не должны оставаться “вещью в себе”: их нужно уметь установить в нулевое состояние, произвести над ними вычислительные операции при помощи вентиляционных устройств – аналогов транзисторов, и наконец, считать полученное состояние. В качестве кандидатов на роль кубита в разное вре-

ПерсТ, 2021, том 28, выпуск 13/16

мя предлагались холодные атомы в ловушках, квантовые точки, фотоны, сверхпроводящие контуры. В недавней работе в *Physical Review Letter* [2] двух авторов – Кристины Псарудакис и Христоса Панагопулоса теоретически обосновывается возможность создания бита на магнитных скирмионах.

Магнитные скирмионы – вихреобразные конфигурации намагниченности (рис. 1а) предполагается создавать в магнитных слоях сэндвич-

структуры, разделенных диамagnetной прослойкой, толщина которой задает обменное взаимодействие между двумя скирмионами (рис. 1с). Управление скирмионом осуществляется с помощью электрического поля за счет неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, возникающего при пространственной модуляции намагниченности в таких микромагнитных структурах, как доменные стенки, линии Блоха или магнитные вихри [3].

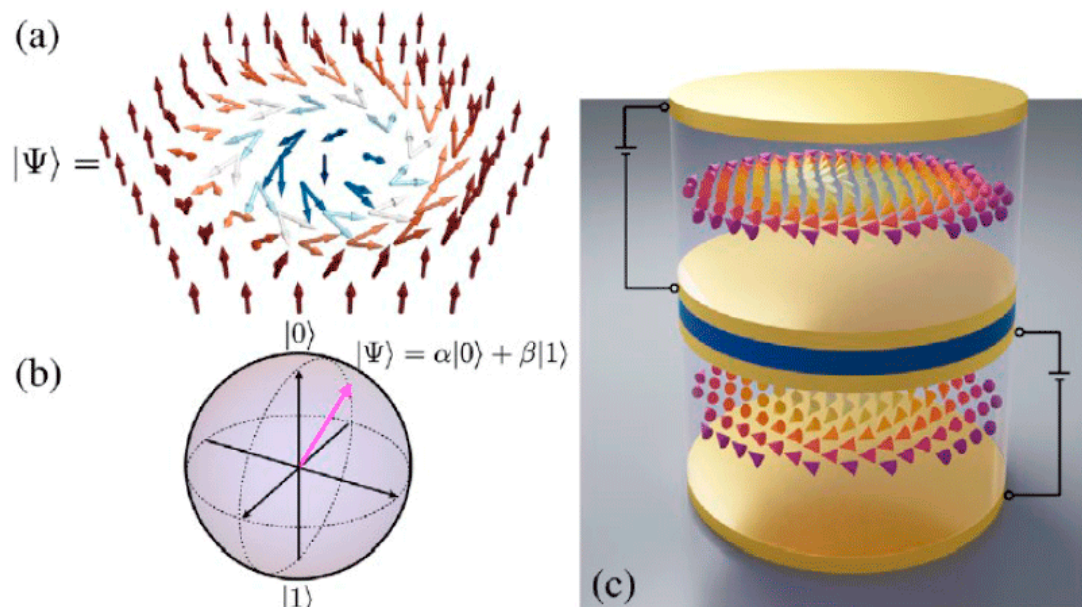


Рис. 1. Концепция кубита на скирмионе: а - скирмион смешанного типа как суперпозиция двух состояний “неелевского” и “блоховского”; б - сфера Блоха для двух состояний; с - схема узла квантового компьютера на основе сэндвич-структуры из двух скирмионов.

В качестве величины, характеризующей состояние кубита, авторы выбирают “спиральность” (helicity) скирмиона, которая показывает угол, образованный плоскостью вращения намагниченности с направлением модуляции: по аналогии с доменными границами угол  $\pi/2$  соответствует скирмиону блоховского типа, а нуль и  $\pi$  – неелевского. Подбирая комбинацию из электрического поля и градиентного магнитного поля, авторы моделируют двухъямный профиль потенциальной энергии скирмиона, что в квантовом представлении соответствует двухуровневой системе с состояниями  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ .

Основному состоянию соответствует блоховский скирмион с одним направлением разворота, а возбужденному уровню – метастабильное состояние с противоположным направлением вращения.

Оценки времени декогеренции, сделанные авторами [2], дают обнадеживающие значения – несколько микросекунд, что достаточно для ре-

ализации квантовых вычислений. Что касается других критериев ДиВинченцо – масштабируемости (возможности создания большого количества идентичных кубитов) и наличия механизмов, позволяющих считать состояние, то здесь тоже все неплохо: скирмионы известны своей способностью образовывать решетки, т.е. они в подобны атомам и другим частицам, а детектировать состояние скирмиона можно с помощью методов чувствительной магнитометрии: SQUID, спектроскопии на азотных вакансиях в алмазе (NV-центрах) и, возможно, даже обычными методами магнитной силовой микроскопии.

А. Пятаков

1. D.P.DiVincenzo, *Fortschritte der Physik*, **48**, 771 (2000); [arXiv:quant-ph/0002077](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0002077).
2. Ch.Psaroudaki, Ch.Panagopoulos, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 067201 (2021).
3. А.К.Звездин, А.П.Пятаков, *УФН*, **179** 897 (2009).



## ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

### Вторая Международная конференция “Физика конденсированных состояний” (ФКС-2021)

С 31 мая по 4 июня 2021 года в ФГБУН Институте физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН проходила Вторая Международная конференция “Физика конденсированных состояний” (ФКС-2021), посвященная 90-летию со дня рождения академика Ю.А. Осипьяна (1931-2008) – первого директора ИФТТ РАН, выдающегося ученого и организатора отечественной науки, привнесшего неоценимый мировой вклад в развитие физики конденсированного состояния вещества. На открытии Конференции с приветственными словами к участникам обратились заместитель директора Департамента Министерства науки и высшего образования Российской Федерации И.Н. Чугуева и председатель организационного комитета ФКС-2021, директор ИФТТ РАН А.А. Левченко.



На ФКС-2021 было представлено более 380 докладов ученых из более чем 20-ти ведущих научных центров, научно-исследовательских институтов и университетов Российской Федерации, занимающихся исследованиями в актуальных областях физики, входящих в тематику данной конференции. География участников охватывала территорию России от Санкт-Петербурга до Улан-Удэ. Программа ФКС-2021 включала 8 пленарных, 101 устный, 52 – онлайн, 183 стендовых и несколько десятков молодежных докладов. Параллельно работали три секции: две в традиционном очном формате и одна в онлайн формате конференции ZOOM. На сессиях были заслушаны результаты исследований, затрагивающих широкий спектр фундаментальных проблем по следующим научным направлениям: низкоразмерные

структуры и физика поверхности; сверхпроводимость; физика дефектов; фуллерены и углеродные структуры; физическое материаловедение.

Конференция – это всегда место встречи коллег, добрых друзей и хороших знакомых. Однако в этот раз хочется отметить большое число новых молодых имен среди докладчиков. На молодежной сессии/школе, прошедшей в рамках Конференции, были представлены стендовые доклады и флеш-презентации (короткий рассказ о научной работе на 3 минуты для привлечения внимания участников конференции) более 40 студентов и магистрантов.



Доклады, сделанные в рамках молодежной сессии, вызвали живой интерес и активные дискуссии участников конференции. В свою очередь, студенты и магистранты вузов смогли участвовать в работе основных сессий Конференции, познакомиться с научными работами лабораторий ИФТТ РАН, магистратурой и аспирантурой ИФТТ РАН. Помимо этого, один из дней Конференции был посвящен проведению сателлитной конференции “Третья школа молодых ученых” “Новые материалы и технологии для систем безопасности”, в рамках которой обсуждались современное состояние и перспективы исследований в актуальных областях физики твердого тела и физической химии – физики новых полупроводниковых и металлических материалов.

Рассказывая о высоком научном уровне Конференции, хочется поблагодарить сотрудников Института за ее отличную организацию. Участники конференции посетили “Военно-технический музей” в селе Ивановском, который расположен недалеко от Черноголовки. В музее они познакомились с уникальными образцами военной и гражданской техники, начиная с XIX века и до наших дней.

В заключение хочется отметить, что, несмотря на сложности, возникшие при подготовке Конференции (эпидемиологическая ситуация), ФКС-2021 успешно состоялась и подтвердила свой высокий научный уровень. Большой интерес к тематике конференции очередной раз доказал, что исследования в области физики конденсированных состояний вещества по-прежнему ставят новые задачи перед учеными и открывают новые перспективы их решения.

На закрытии Конференции было объявлено о том, что Конференция “Физика конденсированных состояний” будет проводиться раз в два года. Значит, надо реализовывать идеи, возникшие благодаря Конференции, и готовиться к следующей!

*О. Камынина*

## **КОНФЕРЕНЦИИ**

*Достижения современной физики: от капли Гелия до Вселенной, Международный семинар (“Advances in modern physics: From a Helium droplet to the Universe”), посвященный 75-летию Григория Воловика, 6-7 сентября 2021 г., Институт теоретической физики им. Ландау РАН, Черногловка, Россия*

6 и 7 сентября 2021 г. в Институте теоретической физики им. Ландау РАН будет проходить международная конференция в честь 75-летия Григория Ефимовича Воловика из-за ограничений covid-19 в смешанном режиме. Программа конференции доступна по ссылке [http://volovik75.itp.ac.ru/prog\\_volovik75.html](http://volovik75.itp.ac.ru/prog_volovik75.html)

Для участия в конференции онлайн необходимо зарегистрироваться на сайте конференции по ссылке: [http://volovik75.itp.ac.ru/reg\\_volovik75.html](http://volovik75.itp.ac.ru/reg_volovik75.html). После регистрации вы сразу получите Zoom link в ответном письме.

**Экспресс-бюллетень ПерсТ** издается совместной информационной группой  
ИФТТ РАН и НИЦ «Курчатовский институт»

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto:ichugueva@yandex.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О. Алексеева, О. Камынина, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64