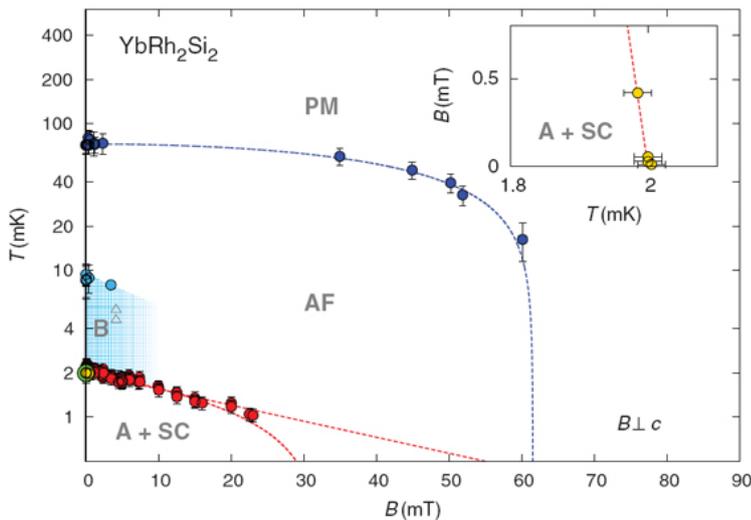


В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Сверхпроводимость металла с тяжелыми фермионами $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$

Необычная (нефононная) сверхпроводимость многих сильнокоррелированных металлов с тяжелыми фермионами возникает в окрестности квантовой критической точки (ККТ), отделяющей антиферромагнитную фазу от парамагнитной при  $T = 0$ . Долгое время считалось, что соединение  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  является исключением: признаков сверхпроводящего перехода в нем не наблюдалось вплоть до  $T = 10$  мК. В работе [1] (Германия, Китай, США) сверхпроводимость  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  все-таки была обнаружена, хотя и при сверхнизкой температуре  $T_c = 2$  мК. Таким образом, наличие ККТ действительно с необходимостью приводит к сверхпроводимости. Интересно, что последняя появляется в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  почти одновременно с ядерным антиферромагнитным порядком (см. рис.).



Фазовая диаграмма  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  в координатах  $T$ - $H$ . Здесь PM – парамагнитное состояние, AF – электронный антиферромагнетизм, A – гибридная электрон-ядерная антиферромагнитная фаза с преобладанием ядерного антиферромагнетизма, SC – сверхпроводящая область.

Л. Опенов

1. E. Schuberth et al., *Science* **351**, 485 (2016).

### О сверхпроводимости пленок $\text{FeSe}$ и не только их

У объемных образцов  $\text{FeSe}$  температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  довольно низкая, около 8 К, тогда как у пленок  $\text{FeSe}$  толщиной всего в одну элементарную ячейку, выращенных на подложках  $\text{SrTiO}_3$  методом молекулярно-лучевой эпитаксии, она составляет  $T_c = 40$ -50 К. А если померить сопротивление такой ультратонкой пленки *in situ* сразу после ее формирования, то получим аж  $T_c = 109$  К! Высказывались предположения, что причиной столь высоких  $T_c$  является близость подложки, которую электроны “чувствуют” в силу чрезвычайно малой толщины пленки. В деталях мнения расходятся. Одни считают, что все дело в большой

И далее ...

- 2 Изинговская сверхпроводимость в монослоях дихалькогенидов переходных металлов
- 3 Электронная структура волны зарядовой плотности с  $d$ -симметрией в купратных ВТСП  
  
Электрическая регулировка многочастичных состояний

## ГРАФЕН

- 4 Фаграфен: плоский или нет?

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 4 Наноструктуры в природе. Загадка синих пауков

## ОБЗОРЫ

- 6 Прогресс в магнито-жидкостной гипертермии

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 7 Квазиодномерный топологический диэлектрик

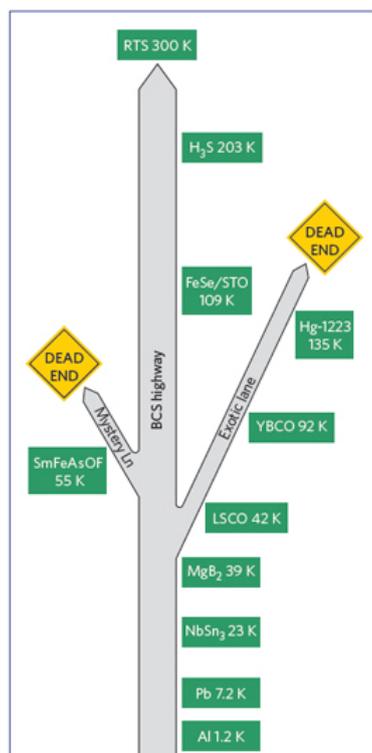
## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Синтез углеродных струн

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 Conference on Long-Range-Interacting Many Body Systems: from Atomic to Astrophysical Scales, 25 - 29 July 2016, ICTP, Trieste, Italy

диэлектрической проницаемости  $\text{SrTiO}_3$ . Другие упирают на сильное взаимодействие электронов в  $\text{FeSe}$  с низкочастотными фононами в  $\text{SrTiO}_3$ . В работе [1] японцы получили пленки  $\text{FeSe}$  толщиной до 10 элементарных ячеек на подложках не только  $\text{SrTiO}_3$ , но и  $\text{MgO}$ . Все они (не только ультратонкие) имеют  $T_c = 40\text{--}50$  К. А поскольку, вдобавок, у  $\text{MgO}$  маленькая диэлектрическая проницаемость и нет мягких фононных мод, то одним лишь влиянием подложки высокие  $T_c$  не объяснишь. Тогда чем же? Представляется, что главным фактором здесь является концентрация носителей заряда в пленке. Ее-то авторам [1] и удалось оптимизировать для пленок различной толщины. Что до механизма спаривания, то он в  $\text{FeSe}$  (учитывая простую круглую поверхность Ферми и изотропную сверхпроводящую щель), скорее всего, самый обычный – фононный, несмотря на то, что за последние 30 лет как минимум 14 нобелевских лауреатов (имея в виду прежде всего купратные ВТСП с  $T_c \sim 100$  К) предложили свои теории высокотемпературной сверхпроводимости: необычные, экзотические и ... противоречащие друг другу. Впоследствии эти же теории пытались применить к пниктидам железа – тоже без особого успеха. Тем временем семья ВТСП пополнилась сероводородом  $\text{H}_3\text{S}$  с  $T_c = 203$  К (хоть и под огромным давлением) и, по общему мнению, фононным механизмом.



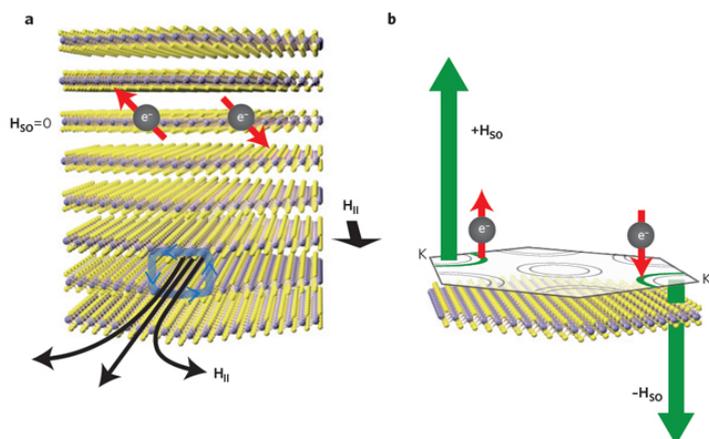
роль универсальной. Но, несмотря на тупиковые боковые ответвления, именно она указывает нам путь к комнатным  $T_c$ .

По материалам заметки  
I.Božović, "A conventional conundrum",  
*Nature Phys.* **12**, 22 (2016)

1. J.Shiohagi et al., *Nature Phys.* **12**, 42 (2016).

### Изинговская сверхпроводимость в монослоях дихалькогенидов переходных металлов

В сверхпроводниках II рода увеличение магнитного поля приводит к разрыву куперовских пар, образованных электронами с противоположными импульсами и спинами. Распаривание происходит из-за воздействия магнитного поля либо на импульсы электронов (орбитальный эффект), либо на их спины (парамагнитный эффект Паули). Неожиданный результат получен в работах [1, 2]: оказалось, что для подавления сверхпроводимости слоев дихалькогенидов переходных металлов требуются аномально сильные продольные магнитные поля  $\mathbf{H}_{\parallel}$  – свыше 30 и 50 Тл в  $\text{NbSe}_2$  и  $\text{MoS}_2$ , соответственно. Почему так получается? Что касается орбитального эффекта, то в монослое он действительно не должен проявляться, поскольку параллельное монослою поле не создает в нем магнитных вихрей. А вот с парамагнитным эффектом на первый взгляд неясно: экспериментальные величины критических полей более чем в шесть раз превышают паулиевский предел, определяемый равенством энергии зеемановского расщепления и энергии связи электронов в куперовской паре. Все дело в том, что спин-орбитальное (SO) взаимодействие приводит к возникновению очень сильного эффективного магнитного поля  $\mathbf{H}_{\text{SO}}$ , перпендикулярного плоскости монослоя и достигающего нескольких сотен тесла, то есть намного превышающего  $\mathbf{H}_{\parallel}$ . В противоположных углах гексагональной зоны Бриллюэна это поле ориентировано в противоположных направлениях (см. рис.), что способствует формированию куперовских пар из электронов разных долин – так называемое "изинговское спаривание".



Схематическое изображение сверхпроводящего состояния кристалла (а) и монослоя (б) в присутствии продольного внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_{\parallel}$  (черные стрелки). Синим цветом показан сверхток, создающий магнитные вихри в объемном образце. В отсутствие спин-орбитального взаимодействия (SO) спины электронов куперовских пар (красные стрелки) в слоях кристалла ориентированы хаотически. В монослое на электроны действует эффективное поле  $\mathbf{H}_{\text{SO}}$  (зеленые стрелки), которое гораздо сильнее внешнего поля.

Существенно, что эффективное поле препятствует ориентации электронных спинов вдоль внешнего поля, “защищая” тем самым сверхпроводящее состояние от его пагубного влияния.

По материалам заметки  
*E.Havarro-Moratalla and P.Jarillo-Herrero,*  
*“The Ising on the monolayer”,*  
*Nature Phys. 12, 112 (2016)*

1. X.Xi et al., *Nature Phys. 12, 139 (2016).*
2. Y.Saito et al., *Nature Phys. 12, 144 (2016).*

### Электронная структура волны зарядовой плотности с $d$ -симметрией в купратных ВТСП

Многочисленные эксперименты указывают на то, что псевдощелевая область фазовой диаграммы купратных ВТСП (рис. 1) характеризуется наличием необычной волны зарядовой плотности, форм-фактор которой имеет  $d$ -симметрию. Признаки такой волны наблюдались и в сверхпроводящем состоянии.

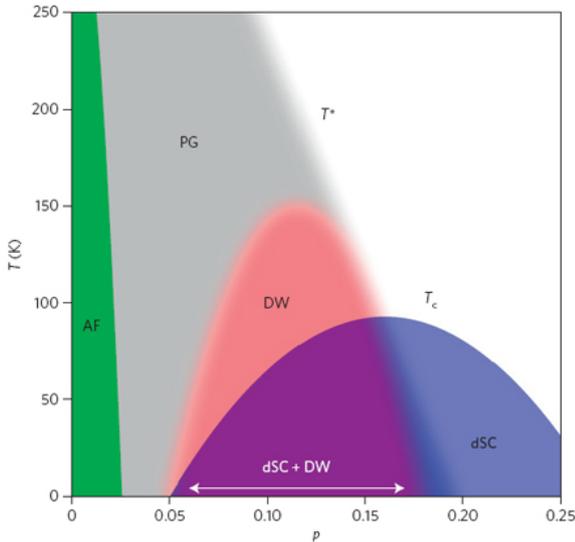


Рис. 1. Фазовая диаграмма купратных ВТСП в координатах:  $T$  – температура,  $p$  – концентрация дырок. Здесь AF – антиферромагнетизм, DW – волна плотности, dSC –  $d$ -волновая сверхпроводимость,  $T_c$  – критическая температура,  $T^*$  – температура формирования псевдощели.

Непосредственное подтверждение ее присутствия в плоскости  $\text{CuO}_2$  купрата  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$  получено в работе [1] (США, Шотландия, Германия, Япония, Канада), авторы которой, используя СТМ, выполнили измерения дифференциальной туннельной проводимости и туннельного тока с атомарным разрешением (рис. 2). Характерная энергия такой  $d$ -волновой модуляции плотности близка к энергии псевдощели  $\Delta_1$ , причем модуляция при  $E = -\Delta_1$  (занятые состояния) сдвинута по фазе на  $\pi$  относительно модуляции при  $E = \Delta_1$  (вакантные состояния). Волновой вектор этих модуляций соответствует рассеянию электронов между границами четырех пар “горячих областей” импульсного пространства, на которых открывается псевдощель и за ко-

торыми боголюбовские квазичастицы не существуют. Сделан вывод, что первопричиной появления  $d$ -волны плотности является экзотическая электронная структура псевдощели, а не наоборот.

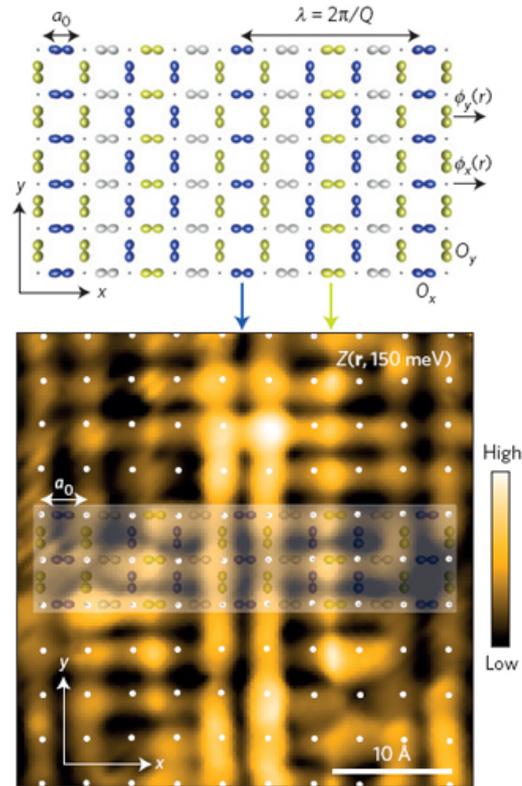


Рис. 2. Вверху – схематическое изображение волны плотности с  $d$ -волновым форм-фактором. Серые точки – медные узлы. Кислородные узлы  $O_x$  и  $O_y$  в каждой элементарной ячейке неэквивалентны “с электронной точки зрения” и поэтому изображены разными цветами (желтый, белый, синий).

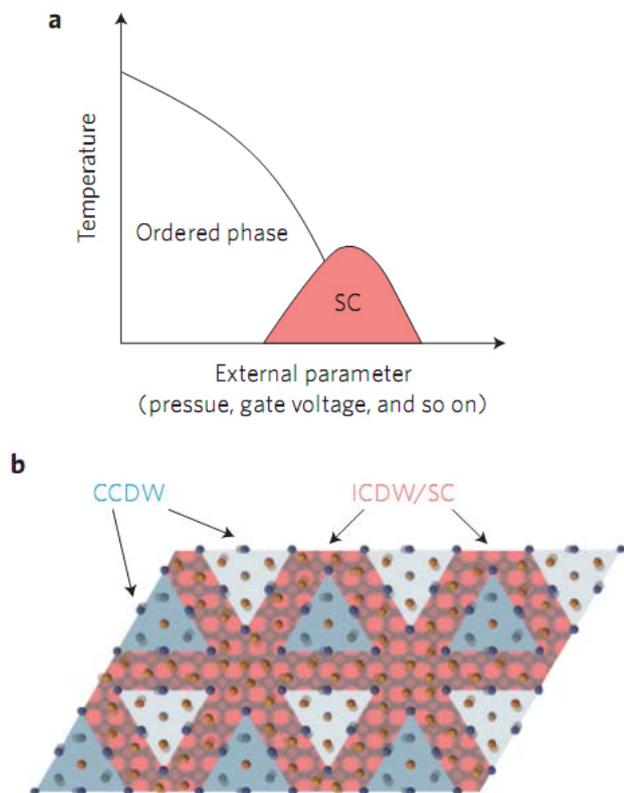
Внизу – экспериментальные данные для отношения дифференциальных туннельных проводимостей  $Z(\mathbf{r}, E) = g(\mathbf{r}, E) / g(\mathbf{r}, -E)$  в псевдощелевой фазе недодопированного купрата  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$  с  $p \approx 0.08$  при  $T > T_c$  и  $E = 150$  мэВ.

1. M.H.Hamidian et al., *Nature Phys. 12, 150 (2016).*

### Электрическая регуляция многочастичных состояний

Селенид титана  $\text{TiSe}_2$  известен как материал с волной зарядовой плотности (ВЗП) и переходом металл-полуметалл при  $T = 200$  К. Некоторые считают, что он представляет собой экситонный диэлектрик. Недавно было обнаружено, что электростатическое сжатие или допирование медью дестабилизирует ВЗП, в результате чего  $\text{TiSe}_2$  становится сверхпроводником с  $T_c \approx 4$  К и универсальной фазовой диаграммой (рис. 1а). В работе [1] ученых из Сингапура для изменения концентрации носителей заряда  $n$  в ультратонких кристаллах  $\text{TiSe}_2$  использован метод электростатического допирования. Показано, что увеличение  $n$  приводит к переходу в сверхпроводящее состояние с куполообразной зависимостью  $T_c$  от  $n$  (рис. 1а). При этом имеет место

эффект Литтла-Паркса (осцилляция  $T_c$  как функции магнитного поля), обычно наблюдающийся в замкнутых сверхпроводящих контурах. Откуда таким контурам взяться в  $\text{TiSe}_2$ ? По-видимому, сверхпроводимость реализуется по расположенным периодически и связанным между собой джозефсоновскими контактами страйпо-подобным доменным стенкам в ВЗП-порядке (рис. 1b), а сила спаривающего взаимодействия определяется величиной параметра ВЗП-порядка.



a - Универсальная фазовая диаграмма необычных сверхпроводников.

b - Периодическая структура в нанослое  $\text{TiSe}_2$ : матрица несоизмеримой ВЗП (ICDW) окружает области соизмеримой ВЗП (CCDW)

По материалам заметки  
P. Abbamonte, "Electric tuning of many-body states",  
*Nature Nanotech.* **11**, 115 (2016).

1. L.J. Li et al., *Nature* **529**, 185 (2016).

## ГРАФЕН

### Фаграфен: плоский или нет?

Перст уже сообщал [1] своим читателям о фаграфене (phagraphene) – новом аллотропе графена, недавно предсказанном теоретически [2], но пока не синтезированном. В отличие от графена, наряду с шестиугольниками из связей C–C, в фаграфене имеются также пяти- и семиугольники. Все вместе они образуют квазидвумерный кристалл из  $sp^2$ -гибридизованных атомов углерода (рис. 1a). Согласно [2], фаграфен является абсолютно плоским (точнее, имеет толщину "в один атом"), а в его электронной структуре, подобно графену, имеются

так называемые дираковские конусы с линейным законом дисперсии. Квазидвумерность фаграфена с самого начала казалась довольно сомнительной, поскольку на примере дефекта Стоуна-Уэльса в графене известно, что соседство пяти-, шести- и семиугольных колец приводит к локальным деформациям, делающим плоскую атомную конфигурацию энергетически невыгодной [3]. И действительно, недавно было показано [4], что минимальную энергию имеет не плоская, а волнообразная конфигурация фаграфена (рис. 1b).

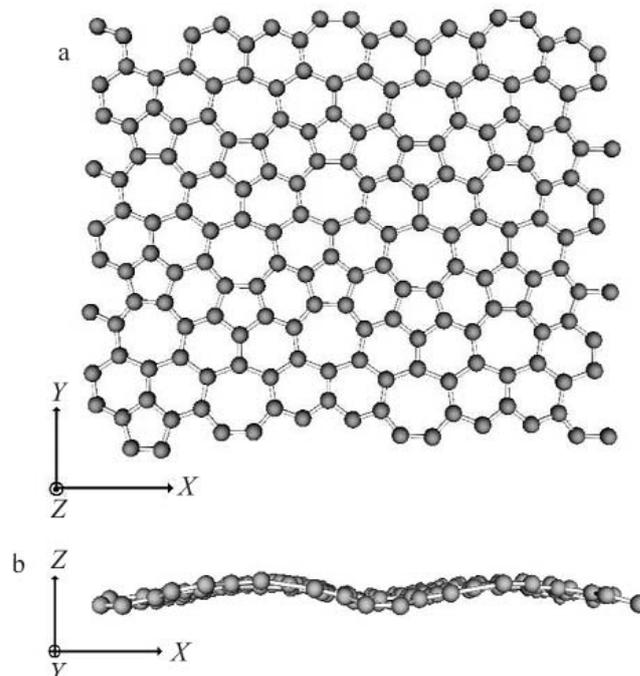


Рис. 1. Фрагмент фаграфена. Вид сверху (a) и сбоку (b).

Справедливости ради отметим, что разность энергий этих конфигураций очень мала, 0.001-0.01 эВ/атом, и очень чувствительна к вычислительной методике (в [4] приведены данные теории функционала плотности и неортогональной модели сильной связи). Как бы то ни было, наличие двух почти вырожденных по энергии атомных конфигураций должно, так или иначе, сказываться на свойствах фаграфена при конечной температуре. Между тем, сделанный в [2] вывод о присутствии дираковских конусов в электронных спектрах фаграфена требует ревизии с учетом данных [4].

Л. Оленов

1. *Перст* **22**, вып. 11/12, с. 2 (2015).

2. *Nano Lett.* **15**, 6182 (2015).

3. *Phys. Rev. B* **80**, 033407 (2009).

4. *Письма в ЖЭТФ* **103**, 204 (2016).

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

### Наноструктуры в природе. Загадка синих пауков

Как известно, красивая разнообразная окраска жуков, бабочек, птиц, хамелеонов и других живых организмов обусловлена не только наличием пигментов, селективно поглощающих свет. Окраска возни-

*Перст*, 2016, том 23, выпуск 3/4

кает также благодаря интерференции (дифракции) и рассеянию света на элементах наноструктуры наружного покрова, чешуек, волосков, перьев и др. Несмотря на то, что синего пигмента у птиц нет, оперение такого цвета существует. Синяя, голубая, бирюзовая окраски возникают благодаря наличию в перьях определенной губчатой 3D структуры, элементы которой состоят из белка-кератина и воздуха (ПерсТ [1]). Разнообразные поликристаллические, квазиупорядоченные, аморфные наноструктуры из хитина, белков и воздуха были обнаружены в щетинках на крыльях, брюшках и ножках разноцветных жуков. Цвета разных участков покровных щетинок даже у одного и того же жука были обусловлены различными биофотонными наноструктурами (ПерсТ [2]).

Ярко-синяя окраска пауков семейства *Theraphosidae*\* так же, как и у птиц, обусловлена не пигментами, а биофотонными наноструктурами. Однако в отличие от пернатых за один и тот же цвет (вплоть до оттенка!) отвечают наноструктуры разного типа – как квазиупорядоченные губчатые, так и многослойные. Исследователи из США проанализировали данные, относящиеся к 53 родам этого семейства, и выяснили, что в 40 из этих 53 родов есть синий цвет [3]. Построив большое филогенетическое (эволюционное) дерево\*\* они также выяснили, что хотя синяя окраска в некоторых ветвях этого дерева исчезала, в процессе эволюции пауки ее опять приобретали независимо друг от друга, и так не менее 8 раз. Таким образом, синий цвет – общий цвет для пауков этого семейства.



Рис. 1. Представители синих пауков семейства *Theraphosidae*. Вверху: *Chromatopelma cyaneopubescens* (слева) и *Lampropelma violaceopes* (справа). Внизу: *Avicularia laeta* (слева) и *Poecilotheria metallica* (справа).

С помощью электронной микроскопии авторы [3] изучили структуру синих волосков у 8 видов пауков из разных родов (в том числе представленных на рис. 1). Было обнаружено, по меньшей мере, 3 типа морфологий: гладкие цилиндрические волоски (рис.

2А, 2Н), волоски с симметрично расположенными продольными цилиндрическими выступами (рис. 2D, 2G), и асимметричные волоски с продольными выступами или складками на одной стороне (рис. 2B, 2C, 2E). Наноструктуры по данным ТЕМ состоят из чередующихся материалов с высокой и низкой электронной плотностью. В соответствии с результатами других исследований – это композит хитин-белок и воздух.

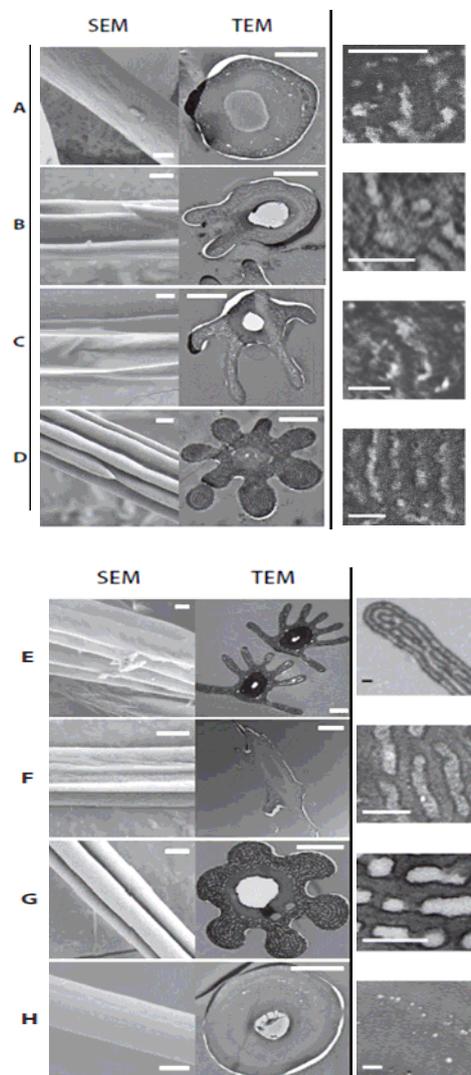


Рис. 2. SEM (слева) и ТЕМ (в центре) изображения синих волосков (шкала 2 мкм). Правые столбцы – ТЕМ изображения наноструктур (шкала 250 нм). Пауки: (А) *Euaethus pulcherrimaklaasi*; (В) *Tapinauchenius violaceus*; (С) *Chromatopelma cyaneopubescens*; (D) *Lampropelma violaceopes*; (Е) *Epebopus cyanognathus*; (F) *Avicularia laeta*; (G) *Poecilotheria metallica*; (H) *Grammostola rosea*. Фотографии пауков (С, D, F, G) представлены на рис. 1.

Самое удивительное, что синюю окраску одного оттенка ( $450 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$  по измерениям авторов [3]) имеют пауки с разной наноструктурой волосков. Это квазиупорядоченная губчатая структура (рис. 2 А-С), многослойная структура (рис. 2 D-G) и даже отсутствие заметной наноструктуры у образца 2 Н. Окраска пауков не радужная, цвет не зависит от угла наблюдения (рис. 3).

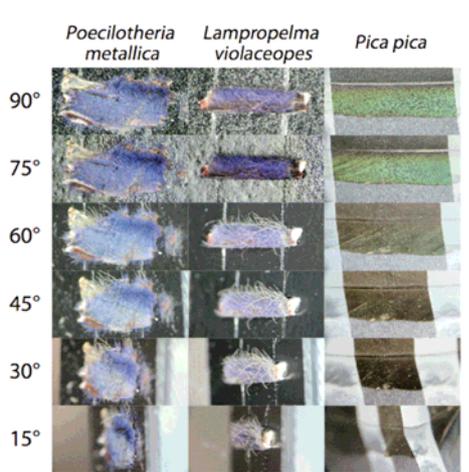


Рис. 3. Фрагменты конечностей *P. metallica* и *L. violaceopes*, покрытых синими волосками, при разных углах наблюдения. Для сравнения справа показано зеленое радужное перо из хвоста сороки *Pica pica*.

Птицы и насекомые даже близких видов имеют разнообразную структурную окраску – в процессе эволюции параметры наноструктур, например периодичность, могут быстро изменяться. У синих пауков всё совсем не так. В процессе длительной эволюции на удаленных друг от друга ветвях дерева семейства *Theraphosidae* независимо формировались разные наноструктуры, которые обеспечили **один и тот же цвет** в очень узком диапазоне длин волн ( $450 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$ ). Видимо, он важен для пауков. Но почему? Зрение у них слабое, эта окраска не может служить для привлечения партнера или отпугивания соперника.

Возможно, дело в какой-то неизвестной сигнальной функции. Эту загадку синих пауков ученым еще предстоит разгадать.

Авторы работы [3] считают, что их результаты важны не только для понимания эволюции цвета в условиях естественного отбора. Они надеются, что результаты изучения структурной окраски пауков помогут создать улучшенные экраны телефонов, телевизоров и других устройств, в частности, снизить вероятность бликов и отражений, а также потускнения.

\*Пауки-птицееды (лат. *Theraphosidae*) – семейство волосатых долгоживущих пауков. Взрослые достигают 25 см. В последнее время стало модным держать этих красивых пауков в качестве домашних животных. Существуют сайты для любителей пауков-птицеедов.

\*\*Филогенетическое (эволюционное) дерево отражает эволюционные взаимосвязи между живыми организмами, имеющими общего предка.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 19, вып. 21, с. 3 \(2012\).](#)
2. [ПерсТ 22, вып. 17, с. 5 \(2015\).](#)
3. В.-К.Hsiung et al., *Sci. Adv.* **1**, e1500709 (2015).

## ОБЗОРЫ

### Прогресс в магнито-жидкостной гипертермии

В конце минувшего года в новом журнале Американского физического общества вышел объемный обзор на тему магнито-жидкостной гипертермии [1]. Целебное действие прогревания тела (гипертермия в переводе с греческого как раз и означает избыточный нагрев) известно с давних времен. В настоящее время гипертермия рассматривается как дополнительный вид лечения, в том числе при борьбе со злокачественными новообразованиями. Магнито-жидкостная гипертермия (МЖГ) – гипертермия с использованием магнитных наночастиц, представляется одним из самых перспективных направлений, так как позволяет воздействовать на внутренние органы (низкочастотное магнитное поле свободно проникает сквозь ткани организма), в то же время, обеспечивая локальность воздействия: разогрев происходит только в тех областях, где сосредоточены магнитные наночастицы.

В качестве материала наночастиц в основном используются оксиды железа, поскольку железо активно включено в обмен веществ (человек способен без вреда для себя съесть до 5 мг железа на 1 кг массы). В качестве одного из оксидов железа выступает первый из обнаруженных человечеством магнитных материалов – магнетит, а в качестве другого – магнитная модификация гематита, входящего в состав древнейшего красителя – охры. Именно эти вещества чаще всего используются в качестве магнитных наночастиц для МЖГ.

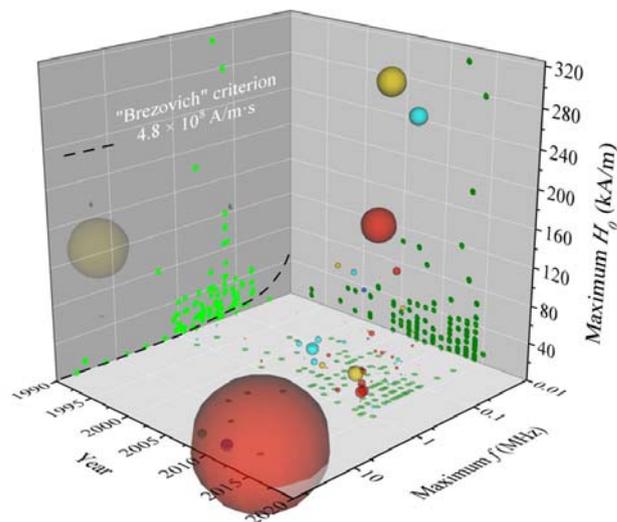


Рис. 1. Диаграмма, изображающая физические условия, в которых проводились эксперименты по МЖГ за 25-летний период. Красным показаны кластеры экспериментов *in vivo*, желтым – *in vitro*, синим – комбинированные опыты, голубым – чисто физические измерения. Зеленым – проекции точек-статей на координатные плоскости 3D диаграммы. Штриховой линией показан критерий Брезовича.

В отличие от большинства обзоров на эту тему, авторы [1] делают упор на физические аспекты воз-

действия переменного магнитного поля на наночастицы. Специальное обсуждение посвящено вопросу о параметрах, которые могут характеризовать магнитотепловые свойства частиц. Наиболее часто встречаемой величиной в литературе, посвященной МЖГ, является удельная поглощенная мощность SAR (specific absorption rate): отношение выделяемой частицами мощности при их нагреве в переменном магнитном поле к массе частиц. Она удобна для оценки воздействия на биологические ткани, но малоприменяема для описания магнитотепловых свойств частиц. Так, например, SAR, очевидно, зависит от частоты магнитного поля (в первом приближении по линейному закону), поэтому часто в качестве характеристики используют тепловую энергию, выделяющуюся за один цикл перемагничивания. Кроме того, нагрев может зависеть от амплитуды поля: для частиц в суперпарамагнитном состоянии зависимость выделяемой мощности от амплитуды квадратичная, поэтому была введена еще одна величина – собственная мощность потерь ILP (intrinsic loss power), равная отношению SAR к частоте и квадрату амплитуды поля. Однако введение такого параметра имеет смысл только в предположении линейного закона намагничивания, что в большинстве случаев не выполняется: при гистерезисном характере намагничивания в поле, превышающем коэрцитивную силу, выделяемое за период тепло зависит не от поля, а от площади петли гистерезиса.

При использовании переменных магнитных полей с неизбежностью возникает вопрос о вихревых токах, которые в данном случае становятся негативным фактором: токи возникают во всех тканях, как пораженных, так и здоровых. На основе обобщения клинического опыта был введен *критерий Брезовича*: произведения амплитуды напряженности магнитного поля на частоту не должно превышать величины  $\sim 5 \cdot 10^8$  А/(м·с) [2]. Авторами обзора [1] проделана большая работа по анализу физических условий, при которых проводились исследования в области МЖГ, ее результаты графически представлены на рис. 1: по одной из горизонтальных осей откладывается частота переменного магнитного поля, по вертикальной – его амплитуда. Довольно неожиданным результатом анализа оказалось то, что большинство экспериментов как медицинских, так и физических, проводилось в условиях, не удовлетворяющих критерию Брезовича. Таким образом, встает вновь вопрос о единстве подходов к изучению МЖГ: либо нужно более строго следить за выполнением физических условий эксперимента, либо привести сам критерий в соответствие с практикой.

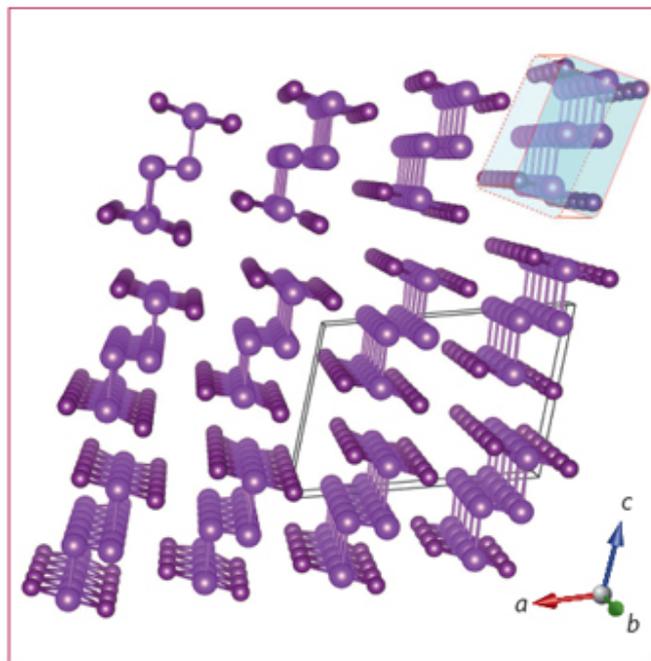
А. Пятаков

1. A. Perigo et al., *Appl. Phys. Rev.* **2**, 041302 (2015).
2. I.A. Brezovich, *Med. Phys. Monogr.* **16**, 82–111 (1988).

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Квазиодномерный топологический диэлектрик

Известные на сегодняшний день топологические диэлектрики (материалы с диэлектрическим объемом и проводящей поверхностью) являются либо трехмерными (сплавы  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ), либо слоистыми (семейство  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ). В работе [1] (Швейцария, Германия, США, Россия, Корея) сначала теоретически предсказан, а затем и синтезирован первый квазиодномерный топологический диэлектрик  $\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$ , который состоит из слабо взаимодействующих молекулярных цепочек (см. рис).



Кристаллическая структура  $\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$ . Большие и маленькие шарики – атомы висмута и йода, соответственно.

Его отличительной особенностью является сильная анизотропия дираковского конуса: скорость электронов в параллельном направлении почти на порядок больше, чем в перпендикулярном. Ширина топологической запрещенной зоны составляет всего 40 мэВ, что ограничивает практическое использование  $\beta\text{-Bi}_4\text{I}_4$ .

1. G. Autes et al., *Nature Mater.* **15**, 154 (2016).

## ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Синтез углеродных струн

Карбин является одной из аллотропных модификаций углерода и представляет собой линейные атомные цепочки. Несмотря на то, что он известен уже довольно давно (это вещество впервые было получено советскими химиками еще в 60-е годы прошлого столетия), исследуется он не так интенсивно, как другие “модные” сегодня углеродные низкоразмерные структуры, например, фуллерены, графен или углеродные нанотрубки. Тем не менее, многие исследователи сходятся во мнении, что кар-

бин и его производные обладают значительным потенциалом для приложений современной микро- и нанoeлектроники. Ученые из Китая и Швейцарии обратили пристальное внимание на, так называемый металлизированный карбин, в котором углеродные димеры чередуются с атомами меди [1]. Им удалось впервые синтезировать его с помощью дегидрогенизационного связывания молекул ацетилена и атомов меди на поверхности Cu(110) в сверхвысоком вакууме (см. рис. 1).

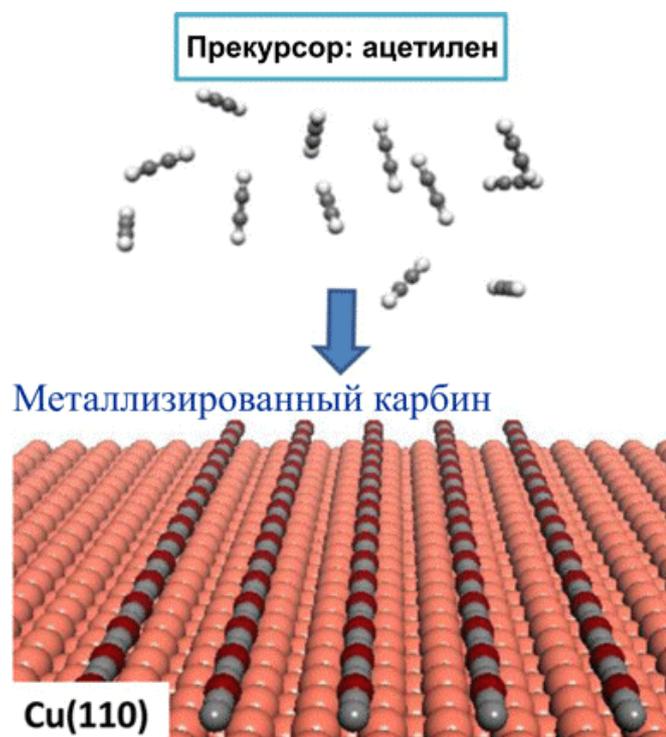


Рис. 1. Процесс синтеза “снизу-вверх” металлизированного карбина посредством дегидрогенизационного сцепления ацетилена и атомов меди на поверхности Cu(110) в сверхвысоком вакууме. Серым цветом обозначены атомы углерода, белым – атомы водорода, коричневым – атомы меди подложки, красным – атомы меди.

Дальнейшее детальное изучение полученных образцов проводили с помощью целого ряда экспериментальных техник (сканирующая туннельная микроскопия высокого разрешения, бесконтактная атомно-силовая микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия), а также квантово-химических расчетов с помощью теории функционала плотности (рис. 2).

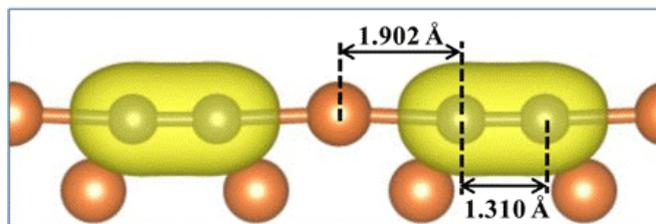


Рис. 2. Изображение металлизированного карбина на поверхности Cu(110). Соответствующие длины связей рассчитаны с помощью теории функционала плотности.

Авторы отмечают, что длина синтезированных цепочек достаточно внушительна и достигает ~120 нм. При этом цепочки модифицированного карбина очень напоминают металлические гитарные струны, в обмотке которых, в основном, также используют сплавы на основе меди. Медная подложка, кстати, по мнению авторов, имеет ключевое значение. Попытки вырастить металлизированный карбин на поверхности золота или серебра успехом, к сожалению, не увенчались. Авторы рассчитывают, что их работа мотивирует других исследователей продолжить экспериментальные разработки в направлении синтеза и технологического применения карбина и его производных, а сам карбин займет достойное место среди низкоразмерных углеродных наносистем.

М.Маслов

1. Q. Sun et al., *J. Am. Chem. Soc.* **138**, 1106 (2016).

## КОНФЕРЕНЦИИ

*Conference on Long-Range-Interacting Many Body Systems: from Atomic to Astrophysical Scales, 25 - 29 July 2016, ICTP, Trieste, Italy*

Deadlines for requesting participation

- **10 March 2016** (if financial support and/or visa are needed)
- **10 May 2016** (if neither financial support nor visa are needed)

Web: <http://indico.ictp.it/event/7612>

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, М.Маслов, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>