

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Необычная сверхпроводимость точечных контактов между нормальным металлом и дираковским полуметаллом Cd_3As_2

Недавно было установлено, что в полуметалле Cd_3As_2 закон дисперсии квазичастиц линеен во всех трех направлениях импульсного пространства, то есть Cd_3As_2 является объемным аналогом графена. Этот дираковский полуметалл считается кандидатом в топологические сверхпроводники. Хотя сверхпроводимость в нем пока не обнаружена, тем не менее недавно в работе [1] индийские физики сообщили о наблюдении сверхпроводящего перехода в мезоскопическом точечном контакте Ag/Cd_3As_2 (рис. 1).

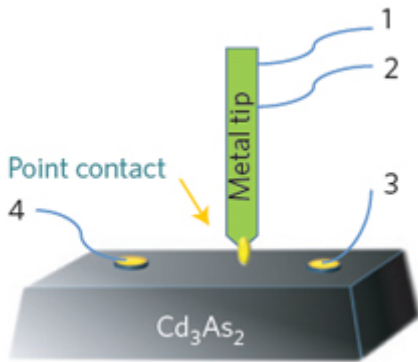


Рис. 1. Точечный контакт Ag/Cd_3As_2 . 1 и 4 – токовые электроды, 2 и 3 – потенциальные электроды.

Температура начала резистивного перехода составляет $T_c \approx 6$ К (рис. 2), причем увеличение магнитного поля приводит к уменьшению T_c (рис. 3).

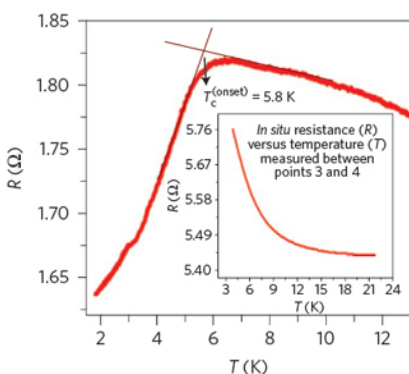


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления точечного контакта Ag/Cd_3As_2 и (на вставке) Cd_3As_2 .

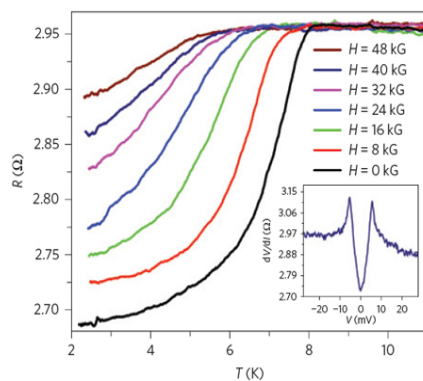


Рис. 3. Влияние магнитного поля на резистивный сверхпроводящий переход контакта Ag/Cd_3As_2 .

Энергетическая щель в электронном спектре ($\Delta = 6.5$ мэВ) слабо зависит от температуры и существует вплоть до $T = 13$ К (псевдощель). Аналогичный результат получили исследователи из Peking Univ. (Китай), исследовавшие точечные контакты W/Cd_3As_2 [2]. Они нашли $T_c \approx 7$ К. Анализ дифференциальных ВАХ показал, что сверхпроводимость является p -волновой.

1. L. Aggarwal et al., *Nature Mater.* **15**, 32 (2016).
2. H. Wang et al., *Nature Mater.* **15**, 38 (2016).

Л. Опенов

И далее ...

- 2 Признаки квантового фазового перехода в сверхпроводящем состоянии недодопированного купратного ВТСП
- 3 d -Волновая щель неизвестной природы в Sr_2IrO_4

ГРАФЕН

- 3 Графен для стоматологов
- ## МИКРОТЕХНОЛОГИИ

- 4 Полимерные домены проявляют свойства магнитных

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 5 Вейлевские полуметаллы: семейный портрет
- 6 Квантовая запутанность неидентичных частиц

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Ультразвук порождает углеродные наноаллотропы

ТОРЖЕСТВО

- 7 Присуждение Большой золотой медали Российской академии наук им. М.В. Ломоносова 2015 г.

КОНФЕРЕНЦИИ

11th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2016),
June 19-24, 2016,
Stuttgart/Ludwigsburg,
Germany

7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'16),
July 25-28, 2016,
Torremolinos (Malaga), Spain

Признаки квантового фазового перехода в сверхпроводящем состоянии недодопированного купратного ВТСП

Фазовая диаграмма купратного ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ очень богатая: помимо антиферромагнитной, металлической и сверхпроводящей фаз, на ней также присутствуют зарядовая, псевдошелевая и др. фазы. Границы между этими фазами являются функциями температуры T , магнитного поля H и концентрации дырок p . Авторы работы [1] (США, Канада) сообщили о наблюдавшихся ими признаках еще одного фазового перехода, который имеет место в сверхпроводящем состоянии недодопированных образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.43}$ с $p = 0.076$, $T_c = 41$ К и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.47}$ с $p = 0.084$, $T_c = 49$ К при увеличении магнитного поля H до $H' = 12-15$ Тл. Свой вывод авторы основывают на различии температурных зависимостей электронной теплоемкости C_{el} при $H < H'$ и $H > H'$ (рис. 1), а также смене линейной зависимости $C_{el}(H)$ на корневую при $H = H'$ (рис. 2).

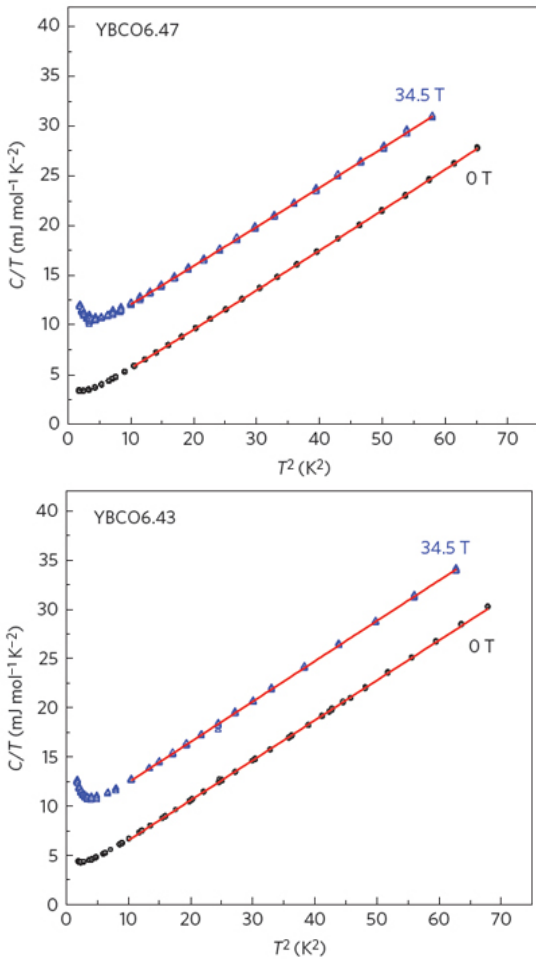


Рис. 1. Температурные зависимости удельной теплоемкости $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.47}$ (вверху) и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.43}$ (внизу) в различных магнитных полях.

Суммируя собственные и имеющиеся в литературе данные различных экспериментов, они построили трехмерную фазовую диаграмму $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ в координатах T - H - p (рис. 3).

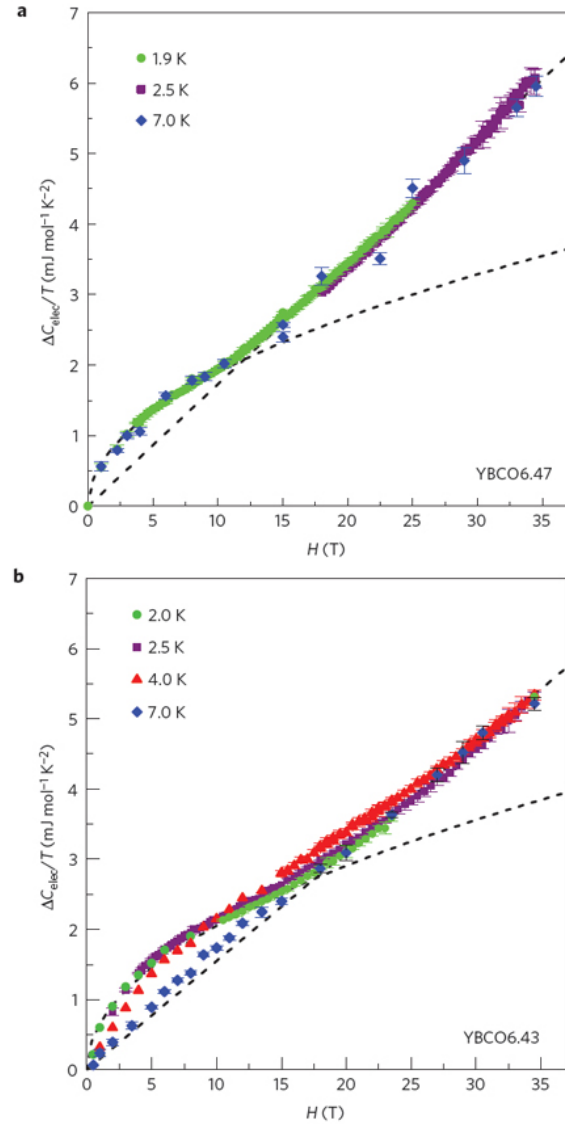


Рис. 2. Полевые зависимости электронной удельной теплоемкости $\Delta C_{el}(H, T) = C_{el}(H, T) - C_{el}(0, T)$ при различных температурах в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.47}$ (a) и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.43}$ (b).

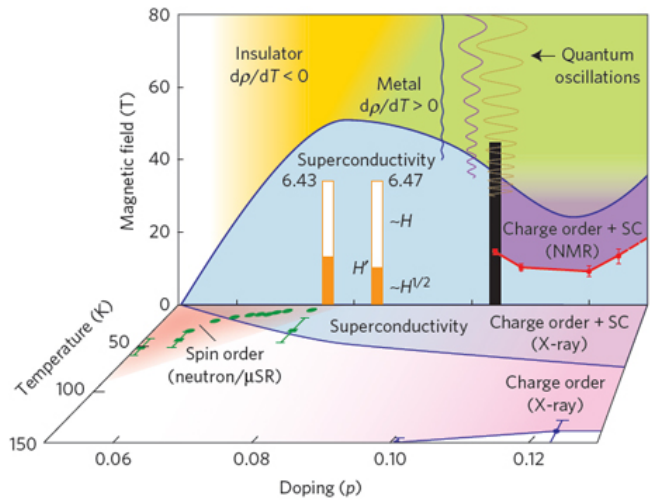


Рис. 3. Фазовая диаграмма $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ с квантовой критической точкой при $p=0.08$.

Л.Опенев

1. J.B.Kemper et al., Nature Phys. 12, 47 (2016).

d-Волновая щель неизвестной природы в Sr_2IrO_4

Недопированный оксид Sr_2IrO_4 представляет собой магнитный диэлектрик со слоистой структурой типа La_2CuO_4 , где эффективные моменты ионов иридия в слоях образуют квадратную решетку. Допирование, однако, приводит к кардинальному изменению его электронной структуры. Как показано в работе [1] (США, Корея, Германия), при концентрации электронов 7% и $T = 10$ К в фотоэмиссионных спектрах этого соединения имеется энергетическая щель с типичной для *d*-волны зависимостью от импульса $\Delta \sim \cos(k_x a) - \cos(k_y a)$ (рис. 1).

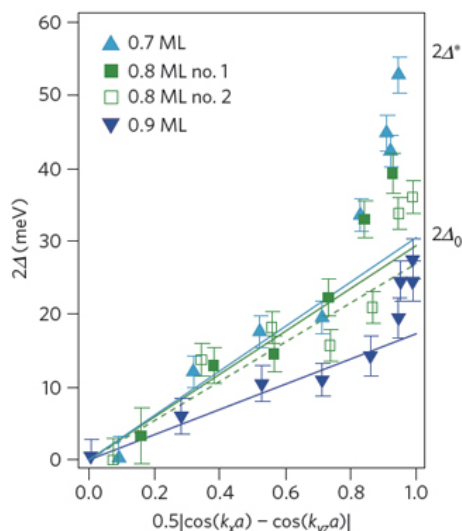


Рис. 1. Зависимость щели в спектрах Sr_2IrO_4 от *d*-волнового форм-фактора при $T = 10$ К.

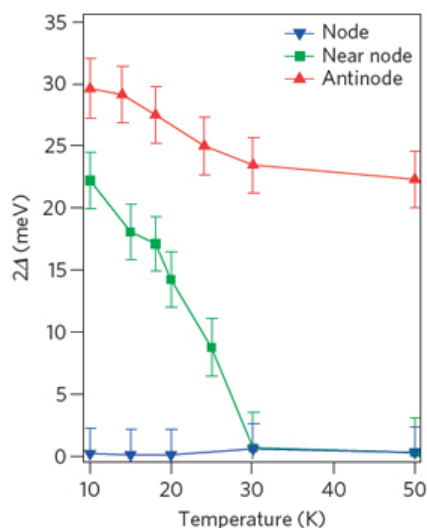


Рис. 2. Температурные зависимости величины щели в узле, вблизи узла и в антиузле.

При повышении температуры до 50 К узловая поверхность Ферми распадается на не связанные между собой дуги, как в купратных ВТСП. Для выяснения физической причины появления *d*-волновой щели требуются дополнительные исследования. Она может быть связана как с волнами зарядовой

плотности, так и со сверхпроводимостью. По мнению авторов, в пользу последнего варианта говорит близость температуры возникновения щели (30 К, рис. 2) к $T_c = 40$ К купрата La_2CuO_4 . Для проверки этого предположения требуются образцы с химическим допированием, тогда как в работе [1] концентрацию электронов контролировали, покрывая образец слоем калия различной толщины. Не исключено также, что состояние с *d*-волновой щелью в Sr_2IrO_4 представляет собой качественно новое состояние вещества, конкурирующее со сверхпроводимостью.

Л. Опенов

I. Y.K. Kim et al., Nature Phys. 12, 37 (2016).

ГРАФЕН

Графен для стоматологов

Хотя исследования возможных применений графена в медицине начались сравнительно недавно, уже достигнуты замечательные успехи. Одно из перспективных направлений – использование графена и оксидов графена в тканевой инженерии и регенеративной медицине. В ряде лабораторий было показано, что эти материалы обеспечивают высокие адгезию, рост, дифференцировку и пролиферацию стволовых клеток и могут способствовать реконструкции костей, регенерации нейронов [1-3]. Не остались в стороне и стоматологи. Дело в том, что ученым удалось выделить стволовые клетки из зачатков и пульпы зубов мудрости (и из пульпы молочных зубов) [4]. Такой доступный источник стволовых клеток очень важен для развития нового направления медицины – клеточной терапии. К тому же выяснилось, что клетки, выделенные из зубов, могут храниться очень долго в криохранилищах, не меняя свойств – каждый может заблаговременно создать свой персональный запас (банки стволовых клеток в России предоставляют эти услуги [4]).

Стоматологи уже продемонстрировали возможность восстановления различных участков зуба, а также формирования его зачатка. В перспективе – выращивание новых коренных зубов взамен утраченных! Вполне вероятно, что дентальные стволовые клетки можно применять не только в стоматологии или челюстно-лицевой хирургии, но и для реконструкции других тканей и органов. Эффективные каркасы для роста и размножения этих клеток также могут быть получены на базе графеновых наноматериалов. Например, ученые из Испании изучили адгезию и пролиферацию дентальных стволовых клеток на пленке из натуральных шелковых волокон и оксида графена [5]. Нанокompозит оказался перспективным для периодонтальной регенерационной терапии. Безусловно, перед внедрением графеновых наноматериалов необходимо понять, насколько они безопасны для дентальных клеток. Первые результаты недавно опубликовали румынские исследователи [6]. Они изучили влияние

оксида графена (GO), термически восстановленного оксида графена (TRGO) и допированного азотом графена (N-Gr) на дентальные стволовые клетки человека. Проведенные ими биологические исследования жизнеспособности клеток, функций клеточных мембран и целостности цитоскелета (клеточного каркаса) показали, что оксид графена является наименее, а TRGO – наиболее токсичным. N-Gr при высокой концентрации (40 г/мл) снижает жизнеспособность клеток и приводит к механическим повреждениям клеточных мембран и цитоскелета, однако при малых концентрациях (4 г/мл) этот наноматериал безопасен и даже обеспечивает антиоксидантную защиту.

На рис. 1 показано воздействие графеновых материалов на цитоскелет, состоящий из белковых филаментов и микротрубочек*. GO при концентрациях 4 и 20 г/мл не изменяет цитоскелет, но при высокой концентрации (40 г/мл) вызывает его ретракцию (сокращение). TRGO при всех дозах, а N-Gr при дозах 20 и 40 г/мл разрушают сеть филаментов и микротрубочек, что, в частности, приводит к потере межклеточного взаимодействия.

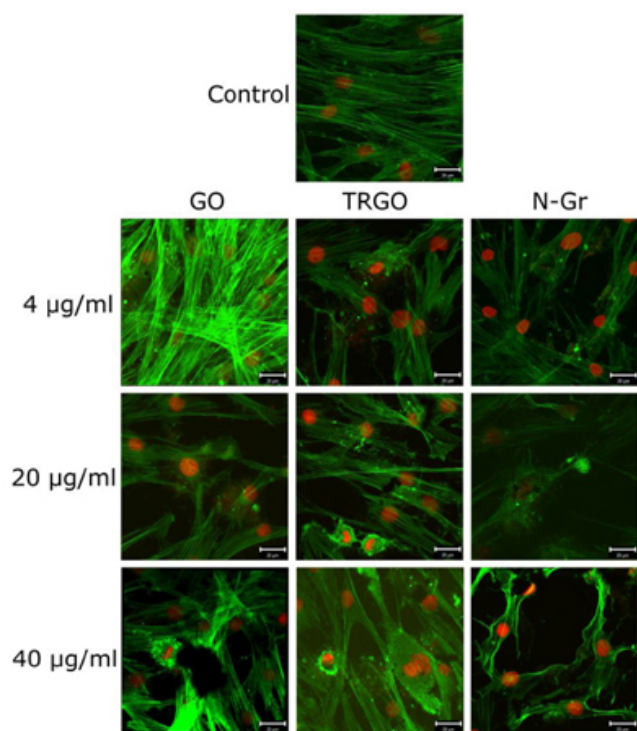


Рис. 1. Дентальные стволовые клетки человека после воздействия GO, TRGO и N-Gr. Филаменты из белка актина окрашены в зеленый цвет, ядра клеток — в красный.

Вверху – контрольный образец с нормальной морфологией цитоскелета. Шкала 20 мкм.

Авторы сделали вывод, что термически восстановленный оксид графена непригоден для стоматологии, и планируют в дальнейшем исследовать композиты из дентальных материалов и оксида графена и допированного азотом графена.

Кстати, совсем скоро – 9 февраля – Международный день стоматолога...

* Белковые филаменты (диаметр ~ 7 нм) – закрученные спиралью цепочки из белков, отвечающие за форму клетки, участвующие в межклеточном взаимодействии, передаче сигналов и др. Полые микротрубочки (диаметр ~ 25 нм) играют ключевую роль во внутриклеточном транспорте.

О. Алексеева

1. Перст 22, вып. 11/12, с. 3 (2015).
2. J.Kim et al., J. Biomed Nanotechnol. 11, 2024 (2015).
3. N.Shadjou et al., J. Biomed Mater. Res. A, published online January 9, 2016; doi: 10.1002/jbm.a.35645.
4. Л.К.Велиханова и др., Бюллетень медицинских Интернет-конференций 3, вып. 2 (2013).
5. F.J.Rodríguez-Lozano et al., J. Mater. Sci.: Mater. Med. 25, 2731 (2014).
6. D.Olteanu et al., Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces 136, 791 (2015).

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Полимерные домены проявляют свойства магнитных

При взгляде на рис. 1 большинство физиков решат, что на нем изображены магнитные доменные структуры – лабиринтная и полосовая. Между тем, он представляет микрофазное расслоение в так называемых блоксополимерах – веществах, молекулы которых являются цепочками из чередующихся полимерных блоков (в простейшем случае двух сортов А и В).



Рис. 1. Характерные доменные структуры, наблюдающиеся в блок-сополимерах (Ronald L. Johnes group, NIST. Результаты численного моделирования).

Такие материалы проявляют свойства каждой из компонент, при этом, не разбиваясь на макроскопические фазы. Однако поскольку каждый из блоков предпочитает соседствовать с себе подобным, то на микроуровне фазы все же расслаиваются с образованием доменов – зон, обогащенных мономерными звеньями одного сорта (рис. 2а). Формой образующихся доменов пытаются управлять с помощью температурных градиентов и электрических полей, однако эти способы не безвредны для самих полимеров. В недавней статье исследователей из Yale Univ., Univ. of Wisconsin и Brookhaven Natl. Lab (США) [1] предлагается для этих целей использовать магнитное поле, которое не экранируется ма-

териалом полимера и не приводит к электрическому пробую.

Это пытались делать и ранее, но для того чтобы полимер стал чувствительным к магнитному полю, к его молекулам прикрепляли небольшие жидкокристаллические молекулы, магнитная анизотропия которых была сильнее выражена. Неожиданно для исследователей блок-сополимер полистирол-поли(4-винилпиридин) реагировал на магнитное поле около 6 Тл и без “пришивания” жидких кристаллов.

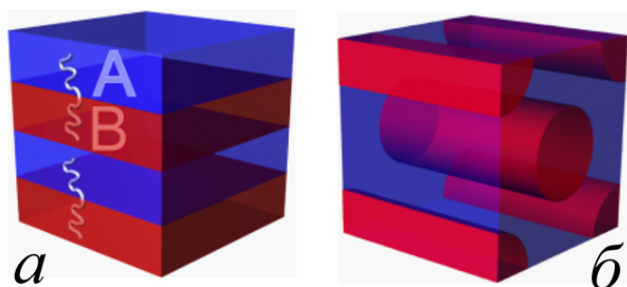


Рис. 2. *a* - домены из А и В блоков, образующие пластинчатую структуру; *б* - цилиндрические домены.

Как полагают авторы [1] все дело в молекулярных кольцах, которые являются составной частью мономеров. Кольца обладают магнитной анизотропией в силу того, что электроны могут передвигаться вдоль кольца, образуя круговой ток и связанное с ним магнитное поле. Возможность управления формой доменов может быть полезна при создании фильтров (домены образуют микро- и наноразмерные сита) и экологических аккумуляторов.

А. Пятаков

1. Ye.Rokhlenko et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 258302 (2015).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Вейлевские полуметаллы: семейный портрет

Безмассовые вейлевские фермионы (в отличие от дираковских) имеют определенную спиральность (chirality), то есть определенную взаимную ориентацию спина и импульса (в одну сторону или в противоположные). В объеме топологических вейлевских полуметаллов (topological Weyl semimetals, TWSs) законы дисперсии спиральных квазичастиц линейны во всех трех направлениях, пересекаясь в вейлевских точках, тогда как поверхностные состояния образуют незамкнутые поверхности Ферми – так называемые фермиевские дуги, соединяющие между собой вейлевские точки с противоположной спиральностью (рис. 1). Вейлевские точки могут рассматриваться как магнитные монополи в импульсном пространстве.

В работе [1] (Китай, Великобритания, США, Германия) методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением исследована электронная

ПерсТ, 2015, том 23, выпуск 1/2

структура трех TWSs из семейства монопниктидов переходных металлов: NbP, TaP и TaAs. У каждого из них в зоне Бриллюэна имеется двенадцать пар вейлевских точек (рис. 2).

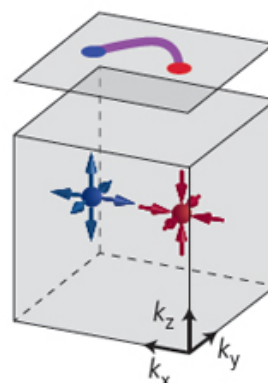


Рис. 1. Схематическое изображение пары вейлевских точек различной спиральности (синий и красный цвет), соединенных между собой фермиевской дугой (фиолетовая линия).

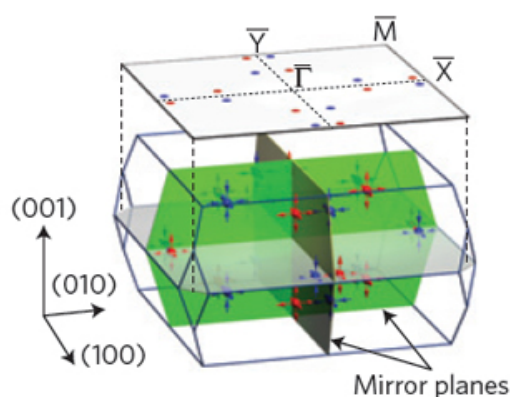


Рис. 2. Объемная и поверхностная зоны Бриллюэна TWSs из семейства монопниктидов переходных металлов.

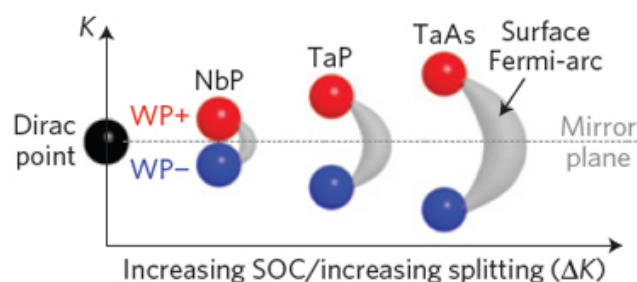


Рис. 3. Иллюстрация изменения расстояния между вейлевскими точками WP+ и WP- в семействе монопниктидов переходных металлов по мере усиления спин-орбитального взаимодействия.

Установлено, что в ряду NbP → TaP → TaAs усиление спин-орбитального взаимодействия ведет к увеличению, во-первых, расстояния между вейлевскими точками с противоположной спиральностью (рис. 3) и, во-вторых, длины фермиевской дуги (рис. 4). Полученные результаты указывают на возможность контроля специфических вейлевских особенностей электронного строения TWSs путем надлежащего химического замещения элементов и/или поверхностного допирования.

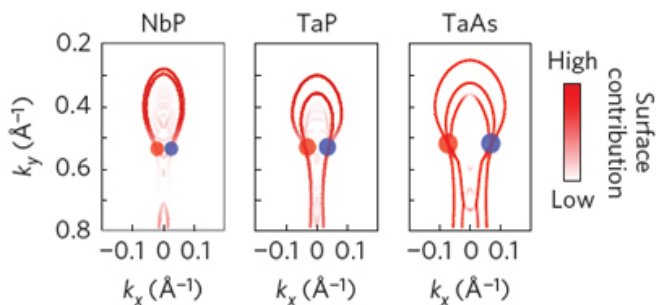


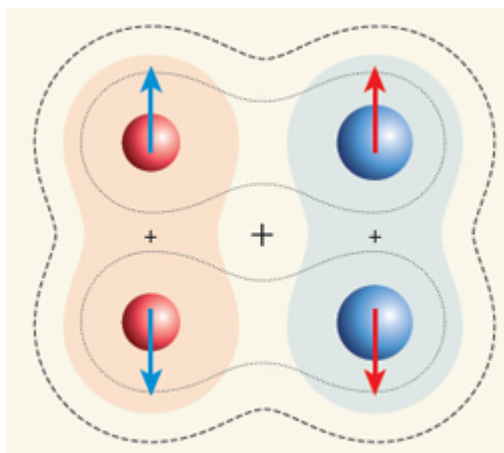
Рис. 4. При удалении вейлевских точек друг от друга фермиевская дуга удлиняется.

Л. Опенов

1. Z.K.Liu et al., *Nature Mater.* **15**, 27 (2016).

Квантовая запутанность неидентичных частиц

Говоря о квантовой запутанности, обычно имеют в виду запутанные состояния идентичных частиц (фотонов, одинаковых ионов и т.п.). В работах [1, 2] английские и американские ученые пошли дальше: используя лазерные импульсы, они “перепутали” спиновые состояния ядер ионов различных изотопов кальция ($^{40}\text{Ca}^+$ и $^{43}\text{Ca}^+$ [2]), а также ионов разных химических элементов ($^9\text{Be}^+$ и $^{25}\text{Mg}^+$ [1]) (см. рис.)



Перепутывание спинов разных ионов: каждый ион находится в состоянии $\uparrow+\downarrow$, тогда как запутанное состояние имеет вид $\uparrow\uparrow+\downarrow\downarrow$, то есть является коррелированным.

При измерении спина одного из ионов он с вероятностью 1/2 оказывается направленным “вверх” или “вниз”, но после этого направление спина другого иона становится определенным однозначно, что и подтвердил эксперимент. Классическое неравенство Белла нарушается с большим запасом.

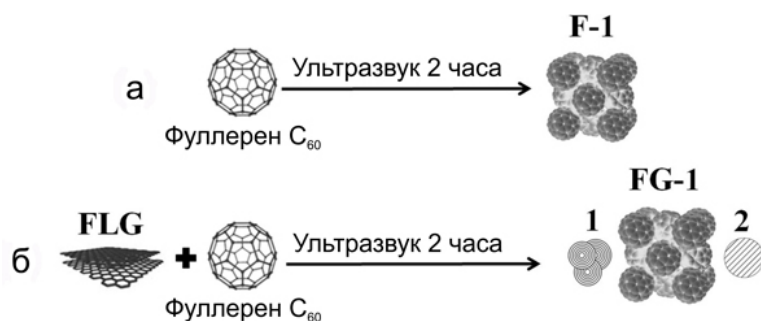
По материалам заметки “Entanglement beyond identical ions”, T.Schaetz, *Nature* **528**, 337 (2015).

1. T.R.Tan et al., *Nature* **528**, 380 (2015).
2. C.J.Ballance et al., *Nature* **528**, 384 (2015).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Ультразвук порождает углеродные нанолотропы

В работе [1] (Мексика, США, Бельгия) авторы сообщают об очередной эффективной методике синтеза фуллеритов, углеродных нанолуковиц (структур типа “фуллерен-в-фуллерене”) и наноалмазов, где в качестве прекурсоров используются фуллерены C_{60} и многослойный графен в диметилформамиде (ДМФА), при этом особая роль отводится ультразвуку. Обработка ультразвуком молекул C_{60} в ДМФА позволяет получить на выходе значительное количество фуллеритов: молекулярных кристаллов, в которых отдельные фуллерены образуют гранцентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку с периодом 1.42 нм (см. рис.).



Синтез углеродных нанолотропов с помощью ультразвука. а - Формирование фуллеритов (F-1) посредством кристаллизации фуллеренов во время ультразвуковой обработки. б - Ультразвуковая обработка фуллеренов с добавлением многослойного графена (FLG) приводит к образованию фуллеритов (FG-1), нанолуковиц (1) и наноалмазов (2).

При этом итоговые образцы тождественны друг другу и обладают узким распределением по диаметрам (22 ± 3) нм. Добавление многослойного графена во время процесса ультразвуковой обработки приводит к образованию “луковичных” структур, в основном, на краях графеновых листов. Увеличение же времени воздействия ультразвуком стимулирует образование наноалмазов, осажденных на поверхности фуллеритов. Полученные углеродные нанолотропы авторы идентифицировали с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM), а более детальный анализ проводили, используя целый ряд экспериментальных техник: термогравиметрический анализ (TGA), УФ-видимая-ближняя ИК спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) и рамановская спектроскопия. Из экспериментальных данных следует, что экстремальные условия, порожденные акустической кавитацией, провоцируют образование неидеальных нанолуковиц посредством самосборки небольших фрагментов графена, вызванной ароматическим взаимодействием этих фрагментов с поверхностью фуллеренов. В дальнейшем эти частицы реконст-

руируются в более устойчивые наноалмазы. Авторы отмечают, что именно обработка ультразвуком создает уникальные условия для трансформации многослойного графена и фуллеренов в углеродные наноаллотропы. Однако некоторые вопросы все же остаются пока неразрешенными, например, каким образом получить только один тип аллотропов, контролируя при этом его характеристики. Возможно, более глубокое понимание механизмов зародышеобразования и формирования углеродных наноаллотропов с помощью ультразвука позволит в дальнейшем не только оптимизировать методики синтеза таких систем, но и расширить их на более широкий класс соединений.

М.Маслов

1. J.I.Tapia et al., *Carbon* **99**, 541 (2016).

ТОРЖЕСТВО

Присуждение Большой золотой медали Российской академии наук им. М.В. Ломоносова 2015 года

26 января 2016 года Президиум РАН присудил: Большую золотую медаль Российской академии наук имени М.В. Ломоносова 2015 года



академику **Леониду Вениаминовичу Келдышу** за выдающийся вклад в физику туннельных явлений, в том числе туннельный эффект в полупроводниках и его связь с электронным и колебательным спектрами кристалла,

открытие туннельной модификации спектров оптического поглощения, туннельной ионизации атомов, молекул и конденсированных сред мощными оптическими лазерными полями.



доктору **Полу Коркуму (Канада)** за выдающийся вклад в физику сверхбыстрых, включая аттосекундный диапазон, процессов и интерферометрию электронных волновых функций в атомах и молекулах с беспрецедентным пространственно-временным разрешением

Поздравляем лауреатов и желаем дальнейших творческих успехов на благо физической науки!

<http://www.gpad.ac.ru/>

8 февраля День Российской науки



КОНФЕРЕНЦИИ

11th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors (SNS 2016), June 19-24, 2016, Stuttgart/Ludwigsburg, Germany

SNS 2016 will continue an illustrious series of international conferences in Argonne (1991), Sendai (1992), Santa Fe (1993); Stanford (1995), Cape Cod (1997), Chicago (2001), Sitges (2004), Sendai (2007), Shanghai (2010), and Berkeley (2013). The meeting will bring together leading experts in spectroscopy, transport, materials discovery, and theory to address current challenges at the frontier of research on superconductivity.

Scientific highlights

- cuprates, ruthenates, and iridates
- iron pnictides and chalcogenides
- heavy fermions
- organic compounds
- hydrides
- superconductivity and competing order
- spectroscopy of collective modes
- topological superconductivity
- non-equilibrium superconductivity
- superconductivity at interfaces
- new experimental methods
- experiments under extreme conditions
- prospects for new superconductors

Important dates

March 15, 2016: Early registration

May 1, 2016: Abstract submission

June 10, 2016: Regular registration

Website: <http://www.fkf.mpg.de/SNS2016>

**7th International Conference on Metamaterials,
Photonic Crystals and Plasmonics (META'16),
July 25-28, 2016, Torremolinos (Malaga), Spain**

META'16 will cover the entire scope of Electromagnetic and Nanophotonic Complex Materials, including metamaterials, photonic crystals and plasmonics. All submitted papers will be blind reviewed and are expected to provide original results. Selection criteria will be based on relevance, originality, significance, impact, technical soundness and quality of the presentation.

Topics

- Plasmonics and nanophotonics
- Metamaterials and negative index materials
- Photonic crystals and cavities
- Acoustic metamaterials
- Materials for photonics (Graphene, MoS₂, WS₂, etc.)
- Photonics based on 2D materials
- Chiral and bianisotropic materials
- Metamaterial-based devices and antennas
- Metasurfaces and optical antennas
- Plasmon-enhanced photovoltaics, photocatalysis, and solar fuels
- Topological photonics
- Quantum photonics
- Nanobiophotonics
- Near-field optics and nano-optics

- Transformational electromagnetics, cloaking
- FSS, HIS and Extraordinary transmission
- Modeling, Computational Techniques and Verification of Theory
- Emerging applications
- Nanofabrication Technology

Important dates

Deadline for submission abstracts: **February 19, 2016**

E-mail: contact@metaconferences.org

Web: <http://metaconferences.org/ocs/index.php/META16/META16>

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: 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^а