

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Псевдощелевая фаза и квантовая критическая точка в купратных ВТСП

Вблизи “оптимального” (отвечающего максимуму критической температуры T_c) уровня допирования нормальное состояние купратных ВТСП настолько существенно отличается от обычного металлического состояния, что для него даже ввели специальный термин – “странный металл” (или “плохой металл”). Принято считать, что причина этой странности кроется в сильных флуктуациях, связанных с квантовой критической точкой при $T=0$ и “дотягивающихся” до сравнительно высоких температур. Наличие такой точки предполагает существование классического фазового перехода, температура которого обращается в нуль внутри “купола” на зависимости T_c от концентрации дырок n . На фазовой диаграмме в координатах T - n этому переходу должна соответствовать линия, отделяющая фазу “странного металла” от какой-то другой фазы. Какой? Одним из основных кандидатов здесь считается псевдощелевое состояние, в котором на спектрах квазичастиц появляется так называемая псевдощель. Но возникает вопрос: можно ли это состояние считать особой фазой или же мы просто имеем дело с непрерывной эволюцией электронной структуры по мере изменения T и n ? В работе [1] (США, Канада) на основании данных резонансной ультразвуковой спектроскопии сделан вывод о существовании именно псевдощелевой фазы: при температуре T^* перехода в эту фазу резонансные частоты демонстрируют четко выраженные неаналитические особенности, как и при сверхпроводящем переходе. Для недодопированного ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.60}$ с $T_c = 61.6$ К величина T^* составила 245 К, что совпадает с температурой возникновения магнитного порядка, определяемой в экспериментах по рассеянию нейтронов. В передоприванном образце $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.98}$ с $T_c = 88$ К величина T^* равна 68 К. Полученные результаты согласуются с гипотезой о наличии в купратах квантовой критической точки (рис. 1).

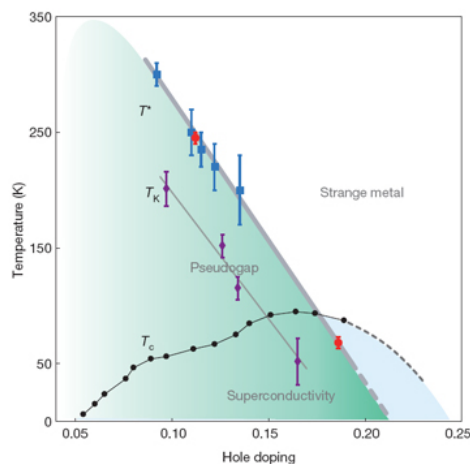


Рис. 1. Фазовая диаграмма $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ в координатах температура – концентрация дырок. Граница псевдощелевой фазы показана толстой серой линией, T^* – температура соответствующего фазового перехода. Синие квадраты – данные дифракции нейтронов, красные кружки – результаты работы [1] для двух образцов (недодопированного и передоприванного). Черные кружки – температура сверхпроводящего перехода T_c . Фиолетовые ромбы – температура T_K возникновения

зарядового порядка, определяемая по эффекту Керра. Аномалии резонансных частот ультразвука в [1] наблюдались при T_c и T^* , но не при T_K .

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Ядерные спины в квантовой информатике: враги или союзники?

ГРАФЕН

- 3 Поликристаллический графен догнал по прочности монокристаллический

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 3 Первые межлабораторные исследования токсичности наноматериалов

МАГНИТЫ

- 4 Магнитная хиральность на различных масштабах

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Бамбук, сетка и вязанка: новые материалы из фуллеренов и нанотрубок

Болометр на основе УНТ

СНОВА К ОСНОВАМ

- 7 Активная жидкость: несинхронное плавание бактерий

Нильс Бор, атомы и ядра

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 8 Резонансное неупругое рентгеновское рассеяние (RIXS) в магнитных системах с промежуточной валентностью редкоземельного катиона

- 9 КОНФЕРЕНЦИИ

По мнению авторов, связанные с ней критические флуктуации ответственны и за необычные свойства “странного металла”, и за собственно механизм высокотемпературной сверхпроводимости. Что же это за фаза такая – псевдошелевая, и чем она отличается от соседствующей с ней фазы “странного металла”? Известный теоретик Jan Zaanen считает (комментарий [2] к статье [1]), что при $T = T^*$ в слоях CuO_2 спонтанно формируются токовые петли с различными направлениями циркуляции тока (рис. 2).

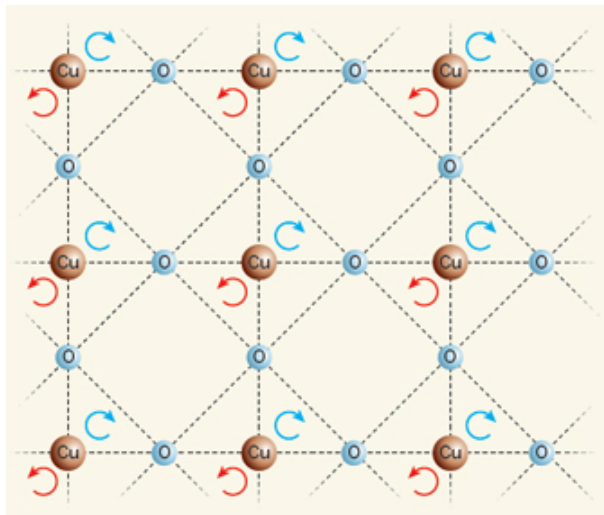


Рис. 2. Токи, циркулирующие в слоях CuO_2 , формируют специфический электронный порядок.

Не вполне, впрочем, понятно, какое отношение эти токи имеют к сверхпроводимости, которая возникает при дальнейшем понижении температуры.

Л.Опенев

1. A. Shekhter et al., *Nature* **498**, 75 (2013).
2. J. Zaanen, *Nature* **498**, 41 (2013).

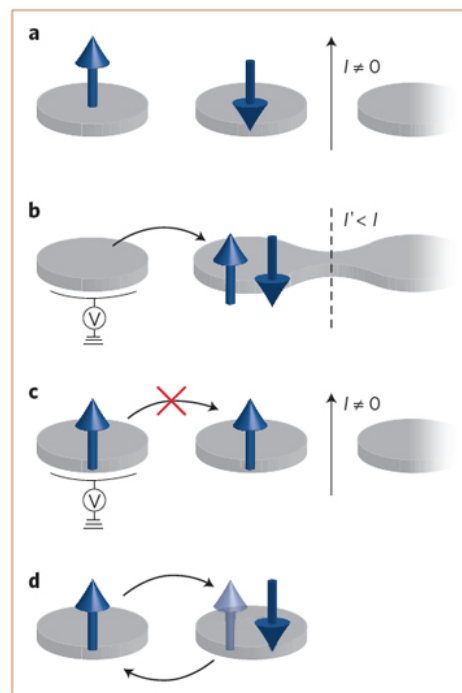
КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Ядерные спины в квантовой информатике: враги или союзники?

Для практической реализации квантовых вычислений требуются надежные физические носители квантовых битов (кубитов) – элементарных “строительных блоков” квантового компьютера. Первыми экспериментально продемонстрированными примерами кубитов были ядерные спины органических молекул (растворенных в жидкости) и ионов (захваченных в электромагнитной ловушке). Однако с точки зрения масштабируемости квантовых устройств гораздо более привлекательны кубиты в твердых телах. Два основных представителя твердотельных кубитов – это сверхпроводниковые цепи и спины электронов, локализованных в квантовых точках или на примесных атомах. Время, в течение которого электронные спиновые кубиты сохраняют свою когерентность, в значительной мере определяется их взаимодействием с окружающими ядерными спинами. Этому вопросу посвящены две об-

зорные статьи в июньском выпуске журнала *Nature Materials* [1, 2].

Основное отличие электронов от атомных ядер заключается в том, что их масса на несколько порядков меньше, в результате чего магнитный момент – на столько же порядков больше. Поэтому электронными спинами проще управлять (посредством магнитного резонанса), а операции с ними осуществляются гораздо быстрее, чем с ядерными спинами. Обратной стороной большого магнитного момента электрона является его сильное взаимодействие с окружением, что приводит к быстрой потере электронными спиновыми кубитами своей когерентности. Делокализация волновой функции электронов между соседними квантовыми точками – еще одно следствие их маленькой массы. Возможность перескока электронов с точки на точку в сочетании с принципом Паули (см. рис.) позволяет определять ориентацию спина электрона, регистрируя перемещение заряда (спин-зарядовая конверсия). Это гораздо проще, чем непосредственное измерение магнитного момента единичного электрона.



Схематическое изображение электронных спинов в туннельно-связанных квантовых точках в отсутствие (a, d) и при наличии (b, c) электрического смещения V . Электрический ток I через узкий канал, расположенный вблизи одной из точек, играет роль детектора заряда, позволяя определять число электронов в этой точке. Если $V \neq 0$, то переход электрона с одной точки на другую возможен только в том случае, когда их спины направлены в противоположных направлениях (b), а при сонаправленных спинах такой переход запрещен принципом Паули (c). Если же $V = 0$, то при антипараллельной ориентации спинов двум электронам энергетически невыгодно находиться в одной квантовой точке из-за кулоновского отталкивания. При этом, однако, имеют место виртуальные переходы (d), что приводит к обменному взаимодействию спинов, которое делает возможным двухкубитные операции с ними.

Хотя ядерные спины и мешают сохранению когерентности состояния электронного спина в квантовой точке из-за декогерентизации, при определенных условиях они могут ему, напротив, способствовать. Так, например, локальные магнитные поля ядер были использованы для операций с двухэлектронным спиновым кубитом, а сверхтонкое взаимодействие электронных и ядерных спинов в NV-центре позволяет “хранить” электронные спиновые состояния в долгоживущих ядерных. Декогерентирующее влияние ядерных спинов теоретически можно свести почти к нулю, если их полностью поляризовать (и тем самым подавить флуктуации). Пока этого сделать не удавалось. Впрочем, не надо забывать, что в твердых телах есть и другие источники декогерентизации (зарядовый шум и пр.), которые действуют параллельно. Поэтому даже использование изотопически чистых материалов без ядерных спинов (кремний, углерод, оксид цинка, дихалькогениды переходных металлов и др.) проблему декогерентизации полностью не снимает.

По материалам заметки
H.Ribeiro, G.Burkard, “Nuclear spins keep coming back”, *Nature Mater.* **12**, 469 (2013).

1. R.Warburton et al., *Nature Mater.* **12**, 483 (2013).
2. E.A.Chekhovich et al., *Nature Mater.* **12**, 494 (2013).

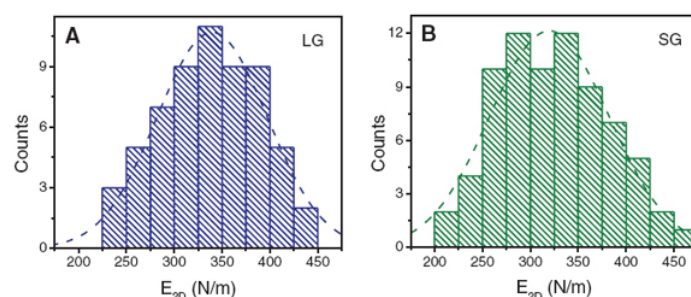
ГРАФЕН

Поликристаллический графен догнал по прочности монокристаллический

Монокристаллический графен (например, полученный отщеплением от графита) — один из самых прочных среди известных на сегодняшний день материалов. Однако требующиеся для практического использования графеновые пленки большой площади, которые получают химическим осаждением из паровой фазы (chemical vapor deposition, CVD) являются поликристаллическими: они состоят из хаотически ориентированных зерен. Механические характеристики таких пленок гораздо хуже, чем у двумерного монокристаллов графена. Бытует мнение, что виной тому являются межзеренные границы — “слабые звенья”, с которых начинается разрушение образца при нагрузке. С одной стороны, эта точка зрения вроде бы подтверждается в экспериментах по наноиндентированию (вдавливанию иглой наномасштабного диаметра), а с другой — не согласуется с основанными на численном моделировании утверждениями теоретиков о практически одинаковой прочности границ зерен и идеального графена.

В работе [1] американских и корейских ученых установлено, что причина такого противоречия кроется просто-напросто в плохом качестве пленок, обусловленном недостатками общепринятой технологии их изготовления, а именно — использованием хлорида железа для стравливания медной фольги

после осаждения на нее пленки и заключительной горячей сушкой на воздухе с целью удаления полимерной подложки. Заменяв FeCl_3 на персульфат аммония и выбрав в качестве полимера не требующий термообработки полидиметилсилоксан, авторы [1] изготовили поликристаллические графеновые пленки с жесткостью 328 ± 15 Н/м (см. рис.), что почти на порядок больше, чем у пленок, полученных по стандартной CVD-методике (55 Н/м) и практически совпадает с жесткостью идеального графена (340 Н/м). Наноиндентирование показало, что границы и внутренние области зерен по своей прочности почти не различаются — в соответствии с теоретическими предсказаниями. Модифицированная в [1] методика синтеза поликристаллического графена может найти применение в самых различных областях, от “гибкой электроники” до высокопрочных материалов.



Статистический анализ данных наноиндентирования для жесткости поликристаллических графеновых пленок с зернами размером $50 \div 200$ мкм (А) и $1 \div 5$ мкм (В).

1. G-H. Lee et al., *Science* **340**, 1073 (2013).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Первые межлабораторные исследования токсичности наноматериалов

Наноматериалы (НМ) можно использовать в медицинских целях только при надлежащей оценке токсичности. Однако результаты, полученные в разных лабораториях, сложно сравнивать из-за различий в способах синтеза и обработки НМ, в дозах и методиках введения в организм и др. Первые межлабораторные исследования токсичности НМ с использованием стандартизованных протоколов недавно были проведены в США в рамках NIEHS NanoGo Consortium [1]. В четырех лабораториях изучили воздействие НМ на легкие мышей при ротоглоточном введении суспензий, в трех других — на легкие крыс при капельном введении в трахеи. Были исследованы нано- TiO_2 (сферы анатаз/рутил TiO_2 -P25, сферы анатаз TiO_2 -A, нанополоски анатаз TiO_2 -NB) и многостенные углеродные нанотрубки MCNT (исходные O-MWCNT, очищенные P-MWCNT, функционализированные F-MWCNT). Физико-химические свойства использованных НМ подробно описаны в [2].

Нано- TiO_2 и MCNT — одни из самых распространенных наноматериалов, их производство постоян-

но растет. Наночастицы диоксида титана применяются в фотокатализаторах, солнечных батареях; в больших количествах они содержатся в пищевых добавках и косметических средствах [3,4]. Углеродные нанотрубки все шире используются не только в электронике, но и в биомедицине, хотя в различных экспериментах на мышах были продемонстрированы вредные эффекты даже от коротких нанотрубок [5].

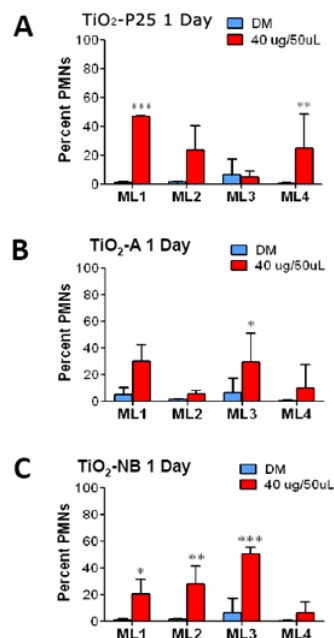


Рис. 1. Рост содержания нейтрофилов (% PMNs) в БАЛ-жидкости через день после воздействия на мышей нано-TiO₂.

Изучение воздействия нано-TiO₂ и МСНТ авторы [1] проводили на образцах легочной ткани и БАЛ*-жидкости, полученной путем смыва с поверхности бронхов и альвеолярных структур легких. После введения нано-TiO₂ в БАЛ-жидкости грызунов обнаружили повышенное содержание нейтрофилов (одной из

форм лейкоцитов), что свидетельствует о воспалительных процессах. Значительный рост наблюдали у мышей в трех из 4 лабораторий (рис. 1); у крыс заметный эффект был только от TiO₂-NB. Авторы [1] признают, что имеются некоторые отличия в степени нейтрофилии (то есть повышенном содержании нейтрофилов) при воздействии нано-TiO₂. Трудно учесть все методологические особенности – возможно, распределение частиц по размерам было не одинаковым в разных лабораториях.

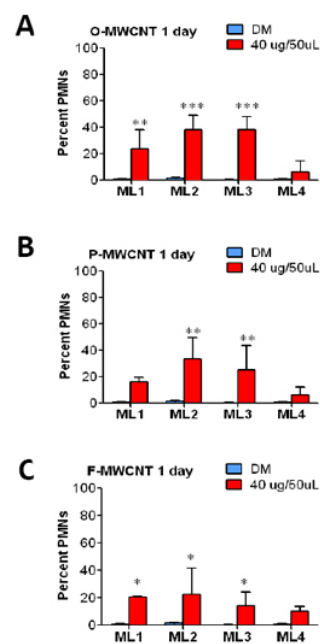


Рис. 2. Рост содержания (нейтрофилов (% PMNs) в БАЛ-жидкости через день после воздействия на мышей МСНТ ML1, ML2, ML3, ML4 – лаборатории, работавшие с мышами. DM – дисперсионная среда без НМ (контроль).

Все типы МСНТ вызвали нейтрофилию у мышей (рис. 2) и крыс; токсичность убывает в ряду: O-MWCNTs > P-MWCNTs > F-MWCNTs. В трех из 4 лабораторий (ML1, ML2, ML3) обнаружили сходную гистопатологию

ткани легкого мышей после воздействия исходных МСНТ и TiO₂-NB. В лаборатории ML4 наблюдали небольшое воспаление, что согласуется с меньшим содержанием нейтрофилов (рис. 2).

Исследователи показали, что при использовании хорошо охарактеризованных НМ и стандартизованных протоколов проведения экспериментов основные результаты в разных лабораториях согласуются – концепция консорциума работает. Дальнейшая задача – изучить воздействие НМ, попавших в организм путем ингаляции, так как это в наибольшей степени соответствует реальным условиям.

*БАЛ – бронхоальвеолярный лаваж, диагностическая (а также терапевтическая) процедура, при которой в бронхи и легкие вводится, а затем удаляется нейтральный раствор

О.Алексеева

1. J.C. Bonner et al., *Environ. Health Perspect.* **121**, 676 (2013).
2. T. Xia et al., *Environ. Health Perspect.* **121**, 683 (2013).
3. [Перст 19, вып. 5, с. 5 \(2012\).](#)
4. [Перст 18, вып. 11/12, с.9 \(2011\).](#)
5. [Перст 18, вып. 10, с.5 \(2011\).](#)

МАГНИТЫ

Магнитная хиральность на различных масштабах

В настоящее время в литературе наблюдается бум публикаций о хиральных магнитах. Зачастую бывает трудно разобраться, как соотносятся эти исследования друг с другом из-за отсутствия классификации и единой терминологии. Например, в литературе не делается явных различий между масштабными уровнями магнитной хиральности, хотя причин для этого много. Попробуем упорядочить известные магнитные хиральные структуры по этому признаку. Примем во внимание, что существуют хиральные магнетики на атомном или молекулярном уровне ($10^{-10} - 10^{-9}$ м), когда хиральность возникает вследствие межатомных обменных взаимодействий [1]. Атомная хиральность может возникать только в нецентросимметричных кристаллах, допускающих существование взаимодействия Дзялошинского-Мория. В наномасштабе ($10^{-9} - 10^{-7}$ м) значительную роль играет поверхность, вблизи которой нарушается центросимметричность и может сниматься запрет на возникновение взаимодействия Дзялошинского-Мория [2]. В результате, даже в центросимметричных нанообъектах наблюдается хиральный спиновый порядок. К наномасштабным хиральным объектам, по-видимому, можно отнести также и скирмионы и хиральные спиновые солитоны. В мезоскопических магнетиках с размерами ($10^{-7} - 10^{-5}$ м) причины возникновения магнитной хиральности заключаются в неустойчивости коллинеарного состояния намагниченности, вы-

Перст, 2013, том 20, выпуск 12

званной магнито-кристаллической анизотропией [3]. Разумеется, и в наномagnetиках этот фактор может добавляться к анизотропии поверхности. Наконец, известно, что и на макроуровне ($10^{-3} - 10^{-2}$ м) создаются спиральные магниты и резонаторы, которые обеспечивают особые конфигурации магнитного поля [4]. Размеры таких объектов достигают сантиметров, а их применение лежит в области создания магнитных метаматериалов и материалов с особыми характеристиками пропускания электромагнитного поля. Таким образом, виды магнитной хиральности в зависимости от масштаба объектов можно условно разделить на макро-, мезо-, нано- и атомную хиральности, представив в виде масштабной схемы (рис. 1). Эти типы хирального магнитного порядка различаются между собой физическими механизмами создания намагниченности, а также сформировавшимися в результате магнитными свойствами. Это ни в коей мере не означает отсутствия пересечения упомянутых типов хирального магнетизма. Напротив, все они в определенной комбинации управляют магнитными свойствами твердых тел, наночастиц и поверхностей.

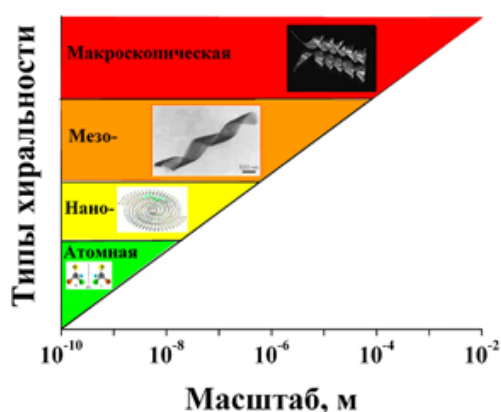


Рис. 1. Различные масштабы магнитной хиральности. На вставках изображены хиральные структуры: атомные [1], нано- (скермион) [2], мезо- (намагниченность тонких пленок и дисков) [3], а также магнитные макроскопические спирали [4].

Механизмы хирального упорядочения спинов обычно рассматриваются по отдельности в магнетиках с высоким взаимодействием Дзялошинского-Мория либо сильной магнитной анизотропией. Вместе с тем, эти факторы, могут работать одновременно, значительно усиливая друг друга, либо приводя к необычным неаддитивным результатам. Поэтому интригующей новой областью представляется исследование магнитных свойств наночастиц, сочетающих атомарную (на уровне атомов и молекул) и нано- и мезоскопическую хиральности, вызванные неустойчивостью баланса обменного взаимодействия и магнитокристаллической, а также поверхностной анизотропией. Можно подозревать, что факторы различной природы, управляющие магнитной хиральностью, будут появляться на мезо- и наномасштабных уровнях рассмотрения.

Представленная систематизация не является единственно возможной. Хотя исчерпывающие монографии по поводу нелинейных спиновых возбуждений и (в том числе) хиральных структур существовали давно [5], в настоящее время все эти явления заново переоткрываются под новыми именами. Поэтому, например, магнитные солитоны и скермионы в сплавах вполне могут оказаться физически одними и теми же объектами (чтобы прийти к такому выводу, достаточно сравнить, например, описания скермионов в [6] и магнитных солитонов в [5]).

Для надежной идентификации хиральных спиновых возбуждений можно, например, предложить схему физических взаимодействий, обеспечивающих неколлинеарную ориентацию спинов (рис. 2).

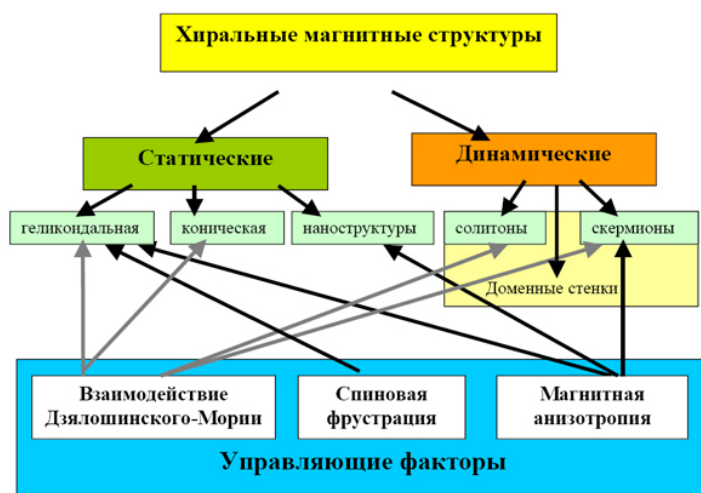


Рис. 2. Схема физических взаимодействий, обеспечивающих неколлинеарную ориентацию спинов.

В первую очередь, не всегда понятно, о динамических (движущихся, размножающихся и исчезающих) или статических структурах идет речь. Например, это не всегда ясно при описании скермионов. Во-вторых, классификация должна включать не только новые, но и старые объекты. Например, доменные стенки тоже являются солитонами, но зачем же нужно вводить ещё и новые термины. Разумеется, схема физических взаимодействий (рис. 2) не претендует на полноту. Она лишь указывает возможные методы классификации накопленного обширного материала, который, увы, пока не обобщен в сколь-либо полной обзорной статье.

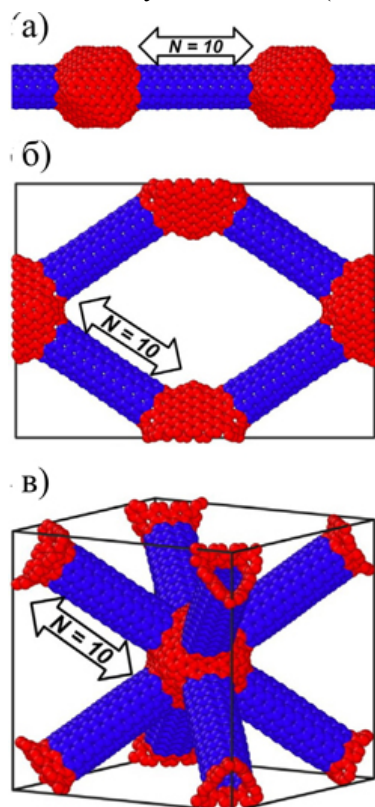
О.Коплак

1. Ю.А.Изюмов, *УФН* **155**, 553 (1988).
2. A.N.Bogdanov and U.K. Rößler, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 037203 (2001).
3. В.Л.Миронов и др., *ФТТ* **52**, 2153 (2010).
4. T.Q.Li et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 131111 (2008).
5. A.M.Kosevich et al., *Phys. Reports* **194**, 117 (1990).
6. U.K.Rößler et al., *Nature* **442**, 797 (2006).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Бамбук, сетка и вязанка: новые материалы из фуллеренов и нанотрубок

Многообразие углеродных наноструктур впечатляет. Авторы работы [1] рассмотрели сложные ковалентные комплексы различной размерности, состоящие из фрагментов углеродных нанотрубок с хиральностью (6,6) и изомеров фуллерена C_{372} , обладающего молекулярной симметрией D_{2d} . Среди этих удивительных соединений, согласно предложенной в статье терминологии, оказались одномерный нанобамбук, двумерная сетка и трехмерная вязанка (см. рис.). Морфология молекулярных комплексов определялась длиной фрагментов углеродных нанотрубок (УНТ) или количеством углеродных шестиугольников N (см. рис.).



Визуализация одно-, двух- и трехмерных соединений, построенных из фуллереновых единиц и фрагментов углеродных нанотрубок (УНТ): нанобамбук (а), наносетка (б) и нановязанка (в). Длина УНТ-фрагментов составляет десять шестиугольных колец ($N = 10$).

Предельным случаям структуры, состоящей из полимеризованных фуллеренов и идеальной нанотрубки, соответствуют $N = 0$ и $N = \infty$. Исследователи сконцентрировали внимание, в основном, на механических свойствах представителей необычной наноархитектуры, растягивая и сжимая образцы. Молекулярное моделирование они выполняли в рамках эмпирических методов (хорошо известный потенциал Бреннера) с помощью программного пакета LAMMPS. Авторы пришли к выводу, что длина фрагментов УНТ является одной из ключевых характеристик, влияющей на механические свойства, наряду с температурой. Так, например, в случае $N = 0$ коэффициент Пуассона двумерной наносетки – отрицательный (в плоскости), а у вязанки он претерпевает серию акробатических этюдов: “отрицательный → положительный → отрицательный” при деформации образца вдоль направления $\langle 110 \rangle$. Авторы предполагают, что полученные ими результаты помогут в дальнейшем проектировать функциональные материалы на основе фуллеренов и УНТ.

Механические свойства представителей необычной наноархитектуры, растягивая и сжимая образцы. Молекулярное моделирование они выполняли в рамках эмпирических методов (хорошо известный потенциал Бреннера) с помощью программного пакета LAMMPS. Авторы пришли к выводу, что длина фрагментов УНТ является одной из ключевых характеристик, влияющей на механические свойства, наряду с температурой. Так, например, в случае $N = 0$ коэффициент Пуассона двумерной наносетки – отрицательный (в плоскости), а у вязанки он претерпевает серию акробатических этюдов: “отрицательный → положительный → отрицательный” при деформации образца вдоль направления $\langle 110 \rangle$. Авторы предполагают, что полученные ими результаты помогут в дальнейшем проектировать функциональные материалы на основе фуллеренов и УНТ.

Вполне возможно, что в скором времени практическому структурно-ориентированному дизайну станут под силу даже такие, прямо скажем, непростые задачи.

М. Маслов

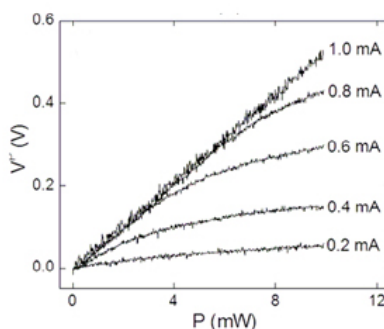
I. J.Y.Wu et al., *Comput. Mater. Sci.* (2013),

<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.04.033>

Болометр на основе УНТ

Высокая чувствительность электрических характеристик углеродных нанотрубок (УНТ) к электромагнитному облучению позволяет поставить вопрос о создании миниатюрного болометра на их основе. В большинстве сообщений о регистрации электромагнитного излучения с помощью массива УНТ [1–7] используются массивы с горизонтальной ориентацией нанотрубок, так что излучение падает на их боковую поверхность. Недавно группой ученых из США был разработан болометр, в котором чувствительным элементом служит массив вертикально ориентированных УНТ [8]. Как известно, подобный массив поглощает практически 100% падающего электромагнитного излучения. Электрическое сопротивление такого массива определяется многочисленными контактами между соседними нанотрубками, сопротивление которых весьма чувствительно к температуре.

Массив УНТ, имеющих диаметр 10–20 нм и высоту около 33 мкм, был выращен на кремниевой подложке размером 12×6 мм² методом химического осаждения паров (CVD). Для измерения электрических характеристик массива с противоположных сторон образца с помощью серебряной краски прикрепляли металлические контакты. В качестве источника излучения использовали полупроводниковый лазер, мощность которого модулировалась синусоидальной или пилообразной зависимостью на частоте свыше 50 Гц с целью более надежного выделения сигнала. На поверхность массива направляли лазерный луч диаметром около 2.5 мм с плотностью потока до 2 мВт/см². При более высокой плотности мощности нарушалась линейная зависимость фотоотклика от падающего потока, поэтому такие потоки не использовали.



Зависимости фотонапряжения от мощности падающего лазерного излучения с пилообразной модуляцией, полученные при температуре 114 К и различных величинах исходного тока через массив.

Как видно из рисунка, в широкой области изменения интенсивности падающего излучения указанные зависимости имеют линейный характер, что указывает на воз-

можность их использования в болометрических измерениях.

Измерения, выполненные при различных температурах, указывают на резкое возрастание уровня сигнала по мере снижения температуры. Так, максимальная величина фотонапряжения, полученная при температуре около 200 К, в 3300 раз превышает соответствующую величину, измеренную при комнатной температуре. Максимальный фотоотклик (42 В/Вт) наблюдали при температуре 84 К. Результаты измерений зависимостей фотонапряжения от частоты модуляции падающего излучения показывают, что болометрический сигнал практически не зависит от частоты модуляции в диапазоне от 0 до примерно 1 кГц, после чего наблюдается резкое его падение.

А.Елецкий

1. M.E.Itkis et al., *Science* **312**, 413 (2006).
2. M.Tarasov et al., *Appl. Phys. Lett.* **90**, 163503 (2007).
3. R.Lu et al., *J. Appl. Phys.* **108**, 084305 (2010).
4. D.F.Santavicca et al., *Appl. Phys. Lett.* **98**, 223503 (2011).
5. A.YGlamazda et al., *Adv. Funct. Mater.* **22**, 2177 (2012).
6. G.Vera-Reveles et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **3**, 3200 (2011).
7. B.Zebli et al., *Phys. Rev. B* **79**, 205402 (2009).
8. M.E.Kozlov, *J. Appl. Phys.* **113**, 164307 (2013).

СНОВА К ОСНОВАМ

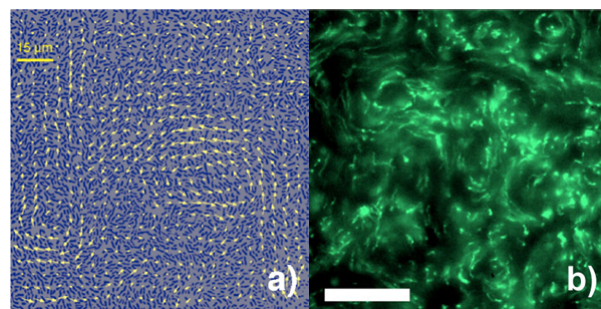
Активная жидкость: несинхронное плавание бактерий

Тому, кто наблюдает за роением насекомых или за тем, как серыми клубами переваливает через дорогу гонимое пастухами стадо овец, волей-неволей приходит на ум сравнение с вихрями в жидкости. Анализ коллективного движения индивидуумов с физической точки зрения, действительно, иногда оказывается плодотворным. Если же речь идет о так называемой “активной жидкости”, иначе говоря, о питательной среде, кишасей бактериями, то вопрос о том, применимы ли к ней обычные законы гидродинамики, тем более закономерен.

Международная команда исследователей (США, Германия, Франция) провела серию экспериментов, позволивших наблюдать по отдельности движение среды и взвешенных в ней бактерий, а также разработала простую теоретическую модель, количественно описывающую данное движение [1].

Бактерии сенной палочки (5 мкм в длину и около 1 мкм в диаметре) плавали в пленке из питательного вещества. Препарат исследовали под микроскопом как в режиме светлого поля, позволяющего видеть отдельные бактерии и их движение (рис. а), так и в темном поле, предоставляющем возможность наблюдать динамику жидкости по движению взве-

шенных в ней микроскопических флуоресцентных маркеров (рис. б).



Активная жидкость (бактерии, плавающие в питательной среде): а – картина в светлом поле: отдельные бактерии видны как короткие темно-синие палочки, желтые стрелки указывают направление и скорость движения бактерий (как следствие коллективного движения бактерий, вихри возникают в среде, для которой, согласно классической гидродинамике, должно наблюдаться ламинарное течение); б – темнопольная картина турбулентного движения взвешенных в жидкости флуоресцентных маркеров (размер масштабного отрезка – 70 мкм) [1].

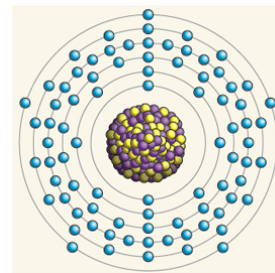
Хотя движение жидкости носит ярко выраженный турбулентный характер, обращают на себя внимание существенные различия с традиционной гидродинамикой. Обычно механическая энергия подается в жидкость на макроскопическом уровне, например при перемешивании среды, и уже потом разбивается на множество вихрей самых разных размеров. В этом случае турбулентное движение возможно лишь при условии, что силы инерции доминируют над вязкостью, т.е. число Рейнольдса много больше единицы. Турбулентность активной среды отличается от обычного вихревого движения на фундаментальном уровне, поскольку меняется сам механизм поступления энергии: поток жидкости возникает за счет движения жгутиков бактерий на микроуровне. Поэтому, вихри возникают даже в очень вязкой среде (с числом Рейнольдса 10^{-5} – 10^{-4}), в которой согласно классической гидродинамике возможно только ламинарное течение.

А.Пятаков

1. J.Dunkel, A.Grbic, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 228102 (2013).

Нильс Бор, атомы и ядра

В этом году боровская модель строения атомов празднует юбилей. Сто лет назад Нильс Бор дополнил планетарную резерфордовскую модель предположением, что электроны в атоме могут двигаться не по любым орбитам, а лишь по определенным (стационарным), находясь на которых они сохраняют свою энергию и не излучают. Стационарными являются те орбиты, для которых момент импульса электрона равен целому числу постоянных Планка. Из модели Бора, в частности, следовало, что радиус



электронной орбиты в самом легком атоме – водороде (то есть фактически размер атома водорода) составляет около $0.5 \cdot 10^{-10}$ м (так называемый боровский радиус a_B) – в ~ 100000 раз больше размера атомного ядра. Для скорости электрона в атоме эта модель давала величину $Zc\alpha$, где Z – число протонов в ядре, c – скорость света, $\alpha \approx 1/137$ – постоянная тонкой структуры. Получалось так, что Z не может быть больше 137, иначе скорость электрона превысит скорость света. Современная квантовая электродинамика (уравнение Дирака, сочетающее теорию относительности с квантовой механикой) дает такую же верхнюю границу Z : при $Z > 137$ энергия связи электрона с ядром становится комплексной. Но это только для точечного ядра. Учет конечности размеров ядра ведет к увеличению максимума Z до ≈ 173 (если $Z > 173$, то энергия связи электронов более чем в два раза превышает их энергию покоя, поэтому спонтанно образуются электрон-позитронные пары, и атом теряет устойчивость). При $Z=172$ радиус внешней электронной орбиты равен $8a_B$. Если с ростом Z размер атома увеличивается, то при замещении электронов более тяжелыми частицами (например, мюонами, пионами или антипротонами) он, напротив, уменьшается, причем весьма значительно – в сотни и даже тысячи раз. Физики научились изготавливать такие экзотические маленькие атомы и используют их при изучении свойств ядер. Именно таким путем недавно был уточнен радиус протона.

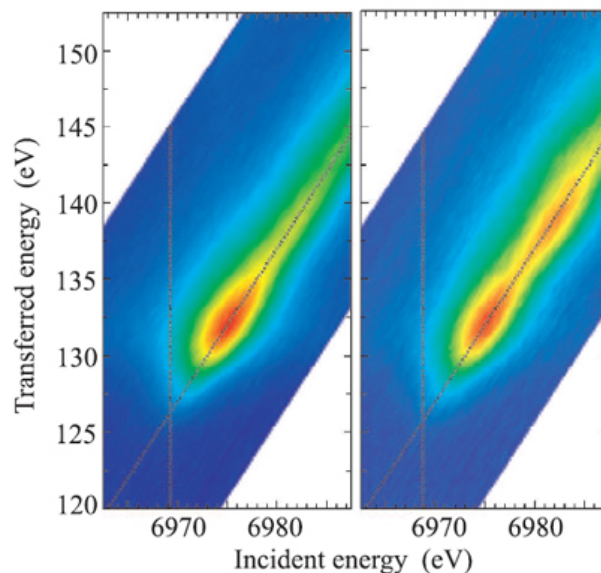
По материалам заметки P.Indelicato, "Orbital arguments", *Nature* **498**, 40 (2013).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Резонансное неупругое рентгеновское рассеяние (RIXS) в магнитных системах с промежуточной валентностью редкоземельного катиона

В ряду соединений RT_2X_2 (где R – редкоземельный, а T – 3d переходный металл, X – P, As, Si, Ge) с кристаллической структурой $ThCr_2Si_2$ наблюдается широкий спектр фазовых переходов, связанных с проявлением электронных неустойчивостей различного типа. Для зонных магнетиков на основе $EuCo_2P_2$ характерен тонкий баланс между различными магнитными состояниями, связанный с особенностями зонной структуры вблизи уровня Ферми. В частности, при сравнительно небольших давлениях (3.1 ГПа) образец претерпевает резкий переход из состояния с антиферромагнитным (АФМ) упорядочением $Eu(4f)$ -подрешетки ($T_N=66K$) в состояние с АФМ упорядочением $Co(3d)$ -подрешетки ($T_N=260K$). Эти изменения сопровождаются структурным фазовым переходом первого рода с коллапсом тетрагональной ячейки вдоль оси c . При этом ион европия испытывает сильное сжатие что, как ожидается, может изменить его валентность от +2 до +3.

В работе группы авторов из России, Германии и США [1] приведены результаты подробного исследования тонких особенностей околопороговой области вблизи L_3 -Eu-края поглощения систем на основе $EuCo_2P_2$ с помощью метода резонансного неупругого рентгеновского рассеяния RIXS с целью определения валентности европия и выявления корреляций с магнитными свойствами. Результаты измерения RIXS сравниваются с данными спектроскопии рентгеновского поглощения XANES, полученными на тех же образцах. Спектры RIXS измеряли на станции W1 накопительного кольца DORIS-III (HASYLAB/DESY, Гамбург, Германия) выше L_3 -Eu края поглощения (6977 эВ) при комнатной температуре в режиме измерения флуоресценции. Спектры XANES были получены на станциях C и A1 накопителя DORIS-III в режиме пропускания. За счет различия в ширинах линий особенности тонкой структуры, скрытые в спектрах XANES, могут наблюдаться на спектрах RIXS.



На рисунке показаны двумерные карты RIXS для образцов $EuCo_2P_2$ (слева) и $Nd_{0.6}Eu_{0.4}Co_2P_2$ (справа): на оси x – энергия испущенного фотона при энергии падающего 6970.7 эВ, по оси y – переданная энергия. Линия эмиссии при постоянной энергии испущенного фотона отображается вдоль диагонали из нижнего левого в верхний правый угол карты. На правой карте ярко выражены два резонанса, соответствующие конфигурациям Eu^{2+} Eu^{3+} . Следует отметить наличие двух пиков на спектрах RIXS и XANES и одного нерасщепленного сигнала в мессбауэровских спектрах [2].

Это связано с тем, что характерное время мессбауэровских измерений порядка 10^{-8} с, а рентгеновских – 10^{-15} с. Моделирование отдельных линий спектров, снятых в различных режимах, двумя гауссианами позволил авторам [1] получить следующие величины средней валентности европия (таблица) при $T=300$ K.

Образец/метод	XANES	HERFD	RXES
EuCo ₂ P ₂	2.132	2.151	2.154
Nd _{0.6} Eu _{0.4} Co ₂ P ₂	2.375	2.336	2.332
Pr _{0.6} Eu _{0.4} Co ₂ P ₂	2.305	2.298	2.296
Pr _{0.8} Eu _{0.2} Co ₂ P ₂	2.345	2.341	2.437

Рост валентности европия можно связать с гибридизацией частично локализованной 4f-орбитали Eu с 3d-уровнем Co, что, по-видимому, и является причиной возникновения дальнего магнитного порядка в подрешетке Co.

С.Овчинников

1. А.А.Ярославцев и др., *Письма в ЖЭТФ* **96**, 46 (2012).

2. K.Kovnir et al., *Chem. Mater.* **23**, 3021 (2011).

КОНФЕРЕНЦИИ

Международный симпозиум “Физика кристаллов 2013”, посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской, объединяющий V Международную конференцию “Кристаллофизика 21-го века” и III Московские чтения по проблемам прочности материалов, 28 октября - 2 ноября 2013 г., Москва

Тематика

- Структура, распределение дефектов и анизотропия физических свойств кристаллов микро- и нанoeлектроники.
- Влияние дефектов структуры на физико-механические свойства.
- Процессы пластической деформации и разрушение твердого тела.
- Влияние внешних физических воздействий на прочность и пластичность кристаллов; фото-, электро-, и магнитопластические эффекты.
- Интенсивные и мегапластические деформации.

- Физические основы получения новых функциональных материалов. Композиционные материалы, интерметаллиды и аморфное состояние вещества.
- Наноматериалы и нанотехнологии в электронике, приборостроении и металлургии. Графен и фуллерены.
- Кристаллы в квантовой электронике.
- Проблемы технологии, дефектообразования и применения полупроводниковых материалов. Физика гетероструктур на основе суперионных полупроводников.
- Управление структурой пьезо- и сегнетоэлектрических кристаллов и расширение областей их применения.
- Сцинтилляторы и люминофоры в физике высоких энергий.
- Проблемы качества и сертификации материалов.

В рамках Симпозиума будет работать секция молодых ученых по указанной тематике.

Важные даты

Подача тезисов – до 1 сентября 2013 г.

Сайт: http://www.crys.ras.ru/~strength/?q_id=index

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: irina@issp.ras.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, А.Елецкий, О.Коплак,
М.Маслов, С.Овчинников, Л.Опенков, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64^а