

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

О влиянии псевдощели на критическую температуру купратных ВТСП

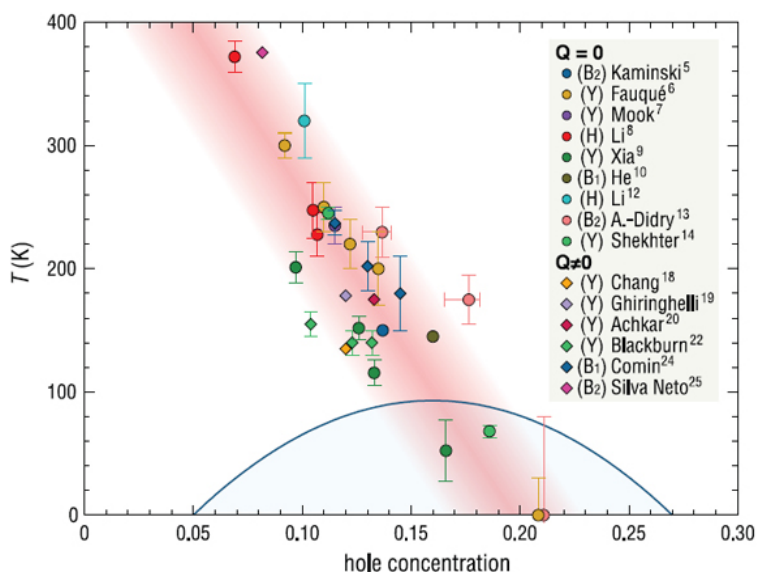
При температуре выше T_c в купратных ВТСП имеется так называемая псевдощель – сильное (но не до нуля) уменьшение плотности квазичастичных состояний в окрестности уровня Ферми. Природа псевдощели (как и механизм высокотемпературной сверхпроводимости) до сих пор остается предметом жарких дебатов. Одни ассоциируют ее с каким-либо несверхпроводящим порядком (зарядовым, спиновым, орбитальным), а другие считают признаком образования несконденсированных куперовских пар. В теоретической работе [1] показано, что если предположить отсутствие какой бы то ни было связи псевдощели со спариванием, то увеличение псевдощели приводит к резкому уменьшению T_c . Но это противоречит эксперименту, ведь большая псевдощель прекрасно уживается с высокой T_c (за исключением сильно недодопированных составов). Выходит так, что спаривающие взаимодействия играют существенную (или даже определяющую) роль в феномене псевдощели.

Л.Опенев

1. V.Mishra et al., *Nature Phys.* **10**, 357 (2014).

Изменение топологии поверхности Ферми и нарушение электронной симметрии в купратных ВТСП

В недодопированных купратных ВТСП наблюдаются нарушения симметрии электронных состояний: относительно поворота на 90° внутри элементарной ячейки (волновой вектор $Q=0$) и трансляционной ($Q \neq 0$). При увеличении концентрации дырок p состояния с нарушенной симметрией пропадают (см. рис.).



Синяя линия – критическая температура купратов как функция концентрации дырок. Кружки и ромбы – температуры появления электронных состояний с нарушенной симметрией и волновым вектором $Q=0$ и $Q \neq 0$, соответственно.

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Безошибочные квантовые вычисления в сверхпроводниковых цепях

ГРАФЕН

- 2 Ультраширокополосные графеновые фотодетекторы

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОСТРУКТУРЫ

- 3 Динамика структурного фазового перехода в монослой MoS_2

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 3 Полевые транзисторы из черного фосфора

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 Путь фуллерена

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 4 Определение знака взаимодействия Дзялошинского для слабого ферромагнетика FeBO_3

КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 “Quantum Critical Matter - From Atoms to Bulk” (QCM14), 18 to 23 August 2014, Obergurgl, Austria

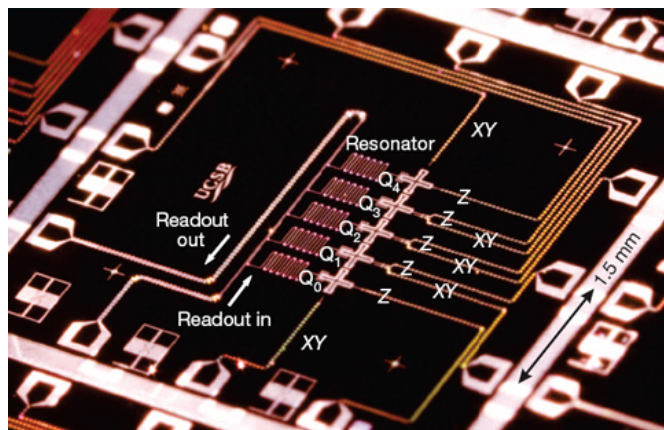
Связь таких состояний с топологией поверхности Ферми изучена в работе [1] (США, Япония, Ю. Корея, Шотландия) с использованием Фурье-анализа данных сканирующей туннельной микроскопии купратов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с $0.06 \leq p \leq 0.23$. Оказалось, что нарушение электронной симметрии происходит при той же критической величине $p_c = 0.19$, при которой разрозненные фермиевские дуги сливаются в замкнутый контур Ферми. Таким образом, реконструкция поверхности Ферми как-то связана с нарушением симметрии электронных состояний. Авторы полагают, что такие состояния имеют отношение к псевдощели. Заметим также, что именно при $p_c = 0.19$ в купратах существует квантовая критическая точка.

1. K.Fujita et al., *Science* **344**, 612 (2014).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Безошибочные квантовые вычисления в сверхпроводниковых цепях

Быстрая декогерентизация нежных квантовых состояний приводит к ошибкам при операциях с кубитами. Для коррекции этих ошибок разработаны специальные алгоритмы. Но они эффективны лишь в том случае, если точность выполнения каждой операции не ниже некоторой пороговой величины, около 90%, то есть если ошибки “не очень серьезные”. В работе [1] (США, Австралия) показано, что этому критерию удовлетворяют сверхпроводниковые кубиты транзмонного типа (двухуровневые системы из двух джозефсоновских переходов, образующих микро-СКВИД). Для них точность однокубитных и двухкубитных операций составляет 99.92% и 99.4%, соответственно. Джозефсоновский квантовый процессор с линейной цепочкой кубитов (см. рис.) легко масштабируется, что позволяет осуществлять многокубитные помехоустойчивые вычисления. Возможности такого процессора сильно возрастут, если перейти к двумерной сетке кубитов.



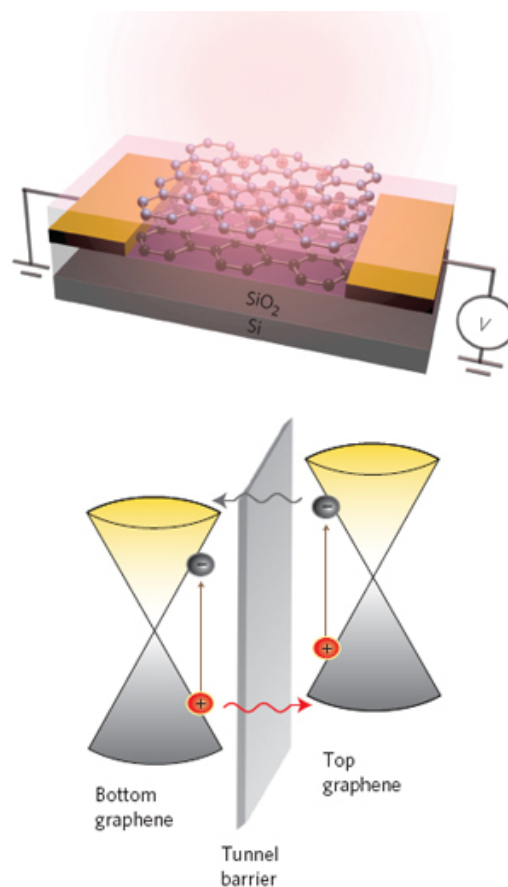
Фотография интегрального джозефсоновского квантового процессора из работы [1] (алюминий/сапфир).

1. R.Barends et al., *Nature* **508**, 500 (2014).

ГРАФЕН

Ультраширокополосные графеновые фотодетекторы

Если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, то такие фотоны поглощаются, а в валентной зоне и зоне проводимости полупроводника появляются, соответственно, свободные дырки и электроны, которые при подаче на образец напряжения создают электрический ток. На этом основана работа детекторов излучения. Для регистрации излучений различного диапазона спектра используются разные полупроводники, имеющие соответствующую величину щели (ультрафиолет – GaN, видимый свет – кремний, ближний ИК диапазон – InGaAs и т.д.). В идеале хотелось бы иметь универсальный детектор, способный “глотать” фотоны с любой длиной волны. Для этих целей в принципе подходит графен с его уникальным конусообразным законом дисперсии. Однако из-за слабого поглощения излучения монослоем атомов углерода чувствительность графеновых детекторов не превышает нескольких десятков мА/Вт. В работе [1] сообщается об изготовлении ультраширокополосного фотодетектора на основе двухслойной графеновой гетероструктуры.



Вверху – схематическое изображение фотодетектора с двумя графеновыми монослоями. Внизу – иллюстрация процессов фотовозбуждения и туннелирования носителей. Серые и красные кружки – электроны и дырки соответственно.

Он представляет собой фототранзистор, состоящий из двух монослоев графена (затвор и канал), разделенных туннельным барьером Ta_2O_5 толщиной 5 нм. При облучении возбужденные горячие электроны туннелируют из верхнего слоя в нижний, что приводит к зарядке затвора и изменению проводимости канала. Так как электроны и дырки находятся в разных монослоях, их рекомбинация подавлена. Чувствительность этого детектора превышает 1 А/Вт при комнатной температуре. Ее можно еще повысить, если использовать туннельные барьеры из квазидвумерных полупроводников MoS_2 или WS_2 .

Л.Опенев

1. C.-H.Liu et al., *Nature Nanotech.* 9, 273 (2014).

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОСТРУКТУРЫ

Динамика структурного фазового перехода в монослой MoS_2

Структурные фазовые переходы, как правило, приводят к резкому изменению практически всех свойств материала: механических, электрических, оптических и пр. При таких переходах имеет место коллективная перестановка макроскопического числа атомов. Проследить за смещениями отдельных атомов (или хотя бы групп атомов) с помощью просвечивающего электронного микроскопа при этом не удастся из-за трехмерности образцов и низкой разрешающей способности микроскопов. В работе [1] (Япония, Тайвань) для изучения динамики структурного перехода в режиме реального времени использованы квазидвумерный монослой MoS_2 и сканирующий просвечивающий электронный микроскоп с поправкой на абберацию. Структура двух фаз монослоя (2H и 1T) различается поперечными смещениями кристаллографических плоскостей серы (рис. 1).

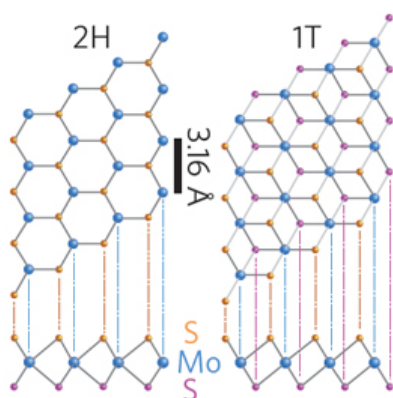


Рис. 1. Атомная структура термодинамически устойчивой полупроводниковой (2H) и метастабильной металлической (1T) фаз монослоя MoS_2 . Вверху – базисные плоскости, внизу – поперечные сечения.

Нетрудно сообразить, что переход между ними происходит просто путем продольного скольжения одной из плоскостей. Но каковы детали этого процесса? Авторы [1] установили, что он начинается с

образования зародышей фазы 1T посредством промежуточной α -фазы, а затем зародыши растут за счет миграции доменных границ (рис. 2).

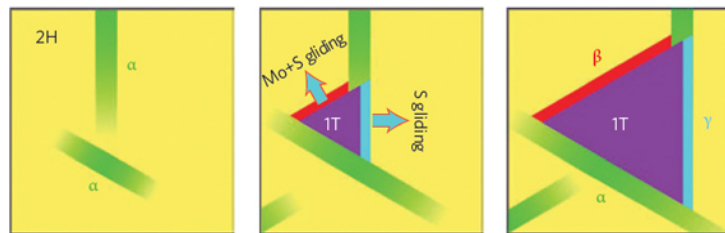


Рис. 2. Иллюстрация динамики перехода $2\text{H} \rightarrow 1\text{T}$.

Интересно, что переход имеет место только при наборе определенной критической дозы электронного облучения (ускоряющее напряжение 60 кВ), то есть он не только наблюдается в микроскоп, но и стимулируется им. Это можно использовать для изготовления из MoS_2 локальных электронных гетероструктур.

Л.Опенев

1. Y.C.Lin et al., *Nature Nanotech.* 9, 391 (2014).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Полевые транзисторы из черного фосфора

Открытый около 100 лет назад черный фосфор представляет собой слоистое соединение (рис. 1) с прочными ковалентными связями в пределах каждого слоя и слабым вандерваальсовским взаимодействием между слоями, как в графите.



Рис. 1. Структура черного фосфора.

В отличие от монослоя графита (графена), монослой черного фосфора (фосфорен), про который мы уже писали в ПерсТе [1], является полупроводником с шириной прямой запрещенной зоны $E_g \approx 2$ эВ. Увеличение числа слоев приводит к монотонному уменьшению E_g до ≈ 0.3 эВ в объемном образце. В своей совокупности графен, дихалькогениды переходных металлов и черный фосфор перекрывают практически весь диапазон E_g от нуля до 2 эВ (рис. 2), что делает возможным создание на их основе самых различных наноэлектронных устройств. В работе [2] китайских физиков изготовлены полевые транзисторы из кристаллов черного фосфора толщиной около 10 нм. Они имеют пре-

красные характеристики при комнатной температуре. Отношение токов в открытом и закрытом состояниях $\sim 10^5$, подвижность носителей $\sim 10^3 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$. Отличительной особенностью черного фосфора является анизотропия его структуры и, как следствие, электрических свойств в двух продольных (параллельных слоям) направлениях. В гетероструктурах из графена и черного фосфора это должно индуцировать анизотропию электронных, оптических и механических характеристик графена, что представляет как фундаментальный, так и практический интерес.

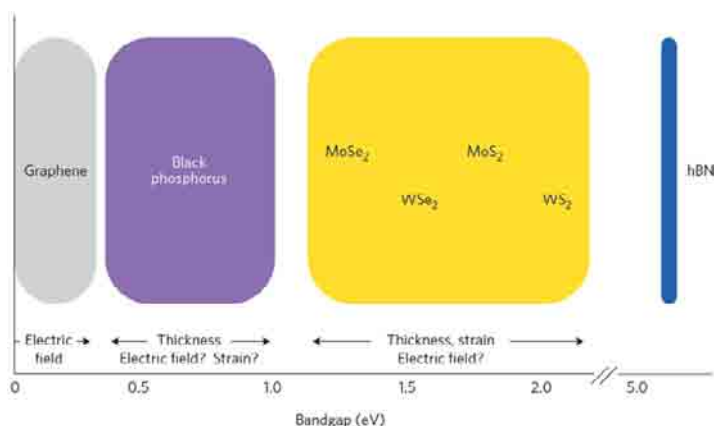


Рис. 2. Ширина запрещенной зоны в некоторых слоистых материалах.

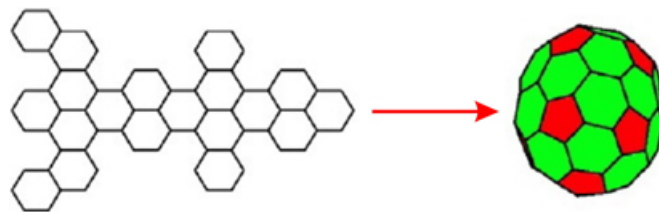
1. [ПерсТ 21, вып. 3/4, с.3 \(2014\).](#)
2. L.Li et al., *Nature Nanotech.* **9**, 372 (2014).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Путь фуллера

Венгерские ученые предприняли попытку в очередной раз собрать фуллерен [1]. В качестве целевого объекта они выбрали бакибол C_{70} с симметрией D_{5h} , а в качестве материала прекурсора — графен. Авторы поставили перед собой задачу проследить за эволюцией термоактивированных графеновых фрагментов, чтобы лучше понять фундаментальные механизмы образования различных типов фуллереновых клеток. Компьютерное моделирование они проводили с помощью метода молекулярной динамики в рамках теории функционала плотности в схеме сильной связи (DFTB). Шаг молекулярной динамики составил 0.7 фс, интегрирование уравнений движения производилось численно с помощью алгоритма Верле. Термостатирование молекулярной системы осуществлялось с помощью метода Нозе-Гувера. Начальная температура составила 1200 К. Первоначально исследователи отобрали и провели структурную оптимизацию семнадцати различных фрагментов графена, состоящих из семидесяти атомов углерода и содержащих лишь шестиугольники. Однако для проведения дальнейших молекулярно-динамических расчетов они остановили свой выбор на образце, обладающем из всех рассмотренных наименьшей энергией (см. рис.). В конечном итоге авторам непосредственно

удалось продемонстрировать возможность образования молекулы C_{70} из графенового фрагмента. Результатом серии вычислений стало успешное получение бакибола заданной симметрии за приемлемое время.



Схематическое изображение исходного фрагмента графена и фуллера C_{70} , полученного в результате эволюции термоактивированного прекурсора.

Исследователи пришли к выводу, что, по сути, структура фуллера оказывается, заложена непосредственно в прекурсор — исходном фрагменте графеновой плоскости. Поэтому, верный выбор прекурсора и соответствующих температурных условий — ключ к получению фуллеренов с заданными структурными характеристиками. Необходимо особо отметить, что фрагменты графена, которые авторы использовали в своих расчетах, не являются экзотикой и вполне могут быть синтезированы на современном уровне развития графеновой физико-химии.

М. Маслов

1. I.László and I.Zsoldos, *Physica E* **56**, 422 (2014).

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Определение знака взаимодействия Дзялошинского для слабого ферромагнетика $FeVO_3$

Известно, что в магнетиках сильное обменное взаимодействие определяет взаимную ориентацию соседних спинов, а более слабое спин-орбитальное взаимодействие может формировать сложные пространственные структуры на больших масштабах. Примерами могут быть спиральные структуры, скирмионные решетки и т.п. Для формирования подобных неколлинеарных структур симметрия кристалла должна допускать наличие отличного от нуля вектора Дзялошинского и антисимметричного обменного взаимодействия Дзялошинского-Мория (ДМ). Такое взаимодействие обуславливает связь магнитных и электрических степеней свободы, что чрезвычайно актуально в связи с исследованиями магнитоэлектрических эффектов. В недавней статье [1] знак взаимодействия ДМ для слабого ферромагнетика $FeVO_3$ определен как экспериментально, так и теоретически.

Был предложен новый фазочувствительный метод, основанный на идеях голографии. Была реализована резонансная рентгеновская дифракция с интерференцией между процессами резонансного и магнитного рассеяния, причем резонансное рассеяние происходило только за счет слабых квадрупольных переходов.

ПерсТ, 2014, том 21, выпуск 9

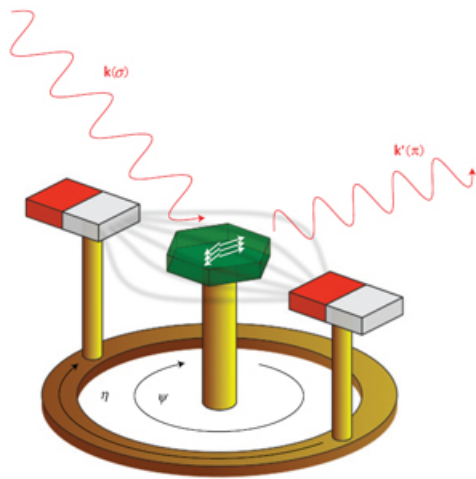


Рис. 1. Схема эксперимента с вращением образца и магнитного поля. Показаны две магнитные подрешетки FeBO_3 со скосом вдоль направления поля.

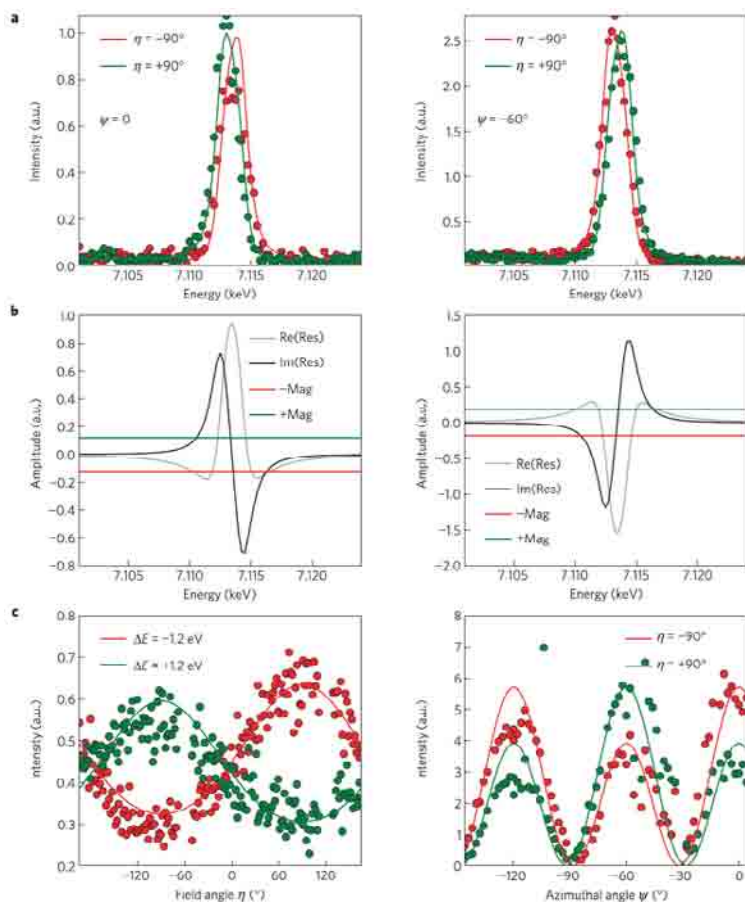


Рис. 2. Результаты экспериментов для FeBO_3 : а – сдвиг энергии резонансного пика при вращении магнита на $\pm 90^\circ$, который меняет свой знак при вращении образца на 60° ; б – магнитная амплитуда в фазе (противофаза) с мнимой частью резонансной амплитуды (черная линия) приводит к конструктивной (деструктивной) интерференции на низко-(высоко-) энергетической стороне резонанса в зависимости от соотношения фаз магнитного и резонансного рассеяний; с – интенсивность магнитного резонанса как функция направления поля при изменении знака резонансной амплитуды за счет сдвига энергии выше и ниже центра резонанса (слева), изменения интенсивности при вращении образца для противоположных знаков магнитной амплитуды (справа).

Его можно наблюдать только очень близко к предкраю Fe K-XAS линии на энергии $E=7.11$ кэВ, сигнал сильно зависит не только от энергии фотонов, но и от азимутальной ориентации кристалла. Знак и амплитуда сигнала магнитного рассеяния зависят от направления спинов, которое может меняться при вращении внешнего магнитного поля. В эксперименте была реализована схема с независимыми вращениями как образца, так и магнитного поля вокруг общей оси (рис. 1).

Измерения проводили на установке BM28 (XMaS) синхротрона ESRF в Гренобле (Франция). Предварительные измерения по отдельности резонансного и магнитного рассеяния были сделаны на установке I16 синхротрона Diamond Light Source в Великобритании. Основные результаты приведены на рис. 2, где также показаны результаты теоретического моделирования (сплошными линиями).

Не менее важным своим достижением авторы [1] считают возможность теоретического расчета магнитной структуры со скосом подрешеток, показанной на рис. 3. Расчеты проводили в рамках метода LDA+U+SO с учетом корреляционных эффектов и спин-орбитального взаимодействия. Расчеты подтвердили наблюдаемую экспериментально магнитную структуру со скосом подрешеток. Полученные значения угла скоса составляют 0.7° (расчет) и 0.9° (эксперимент). Для пары ионов железа с номерами 0 и 1 (рис. 3) вектор Дзялошинского равен $\mathbf{D}_{01}=(-0.25, 0, -0.24)$. Показано, что при движении вдоль оси z кристалла разворот магнитных моментов совпадает с разворотом кислородных треугольников.

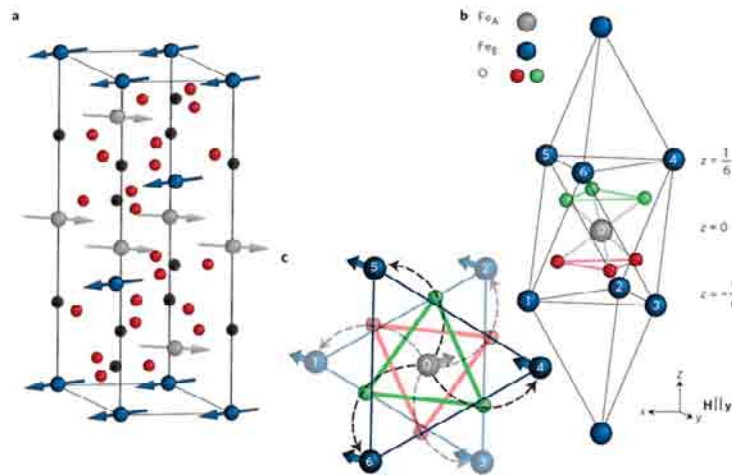


Рис. 3. а – Магнитная элементарная ячейка кристалла FeBO_3 с атомами кислорода (красные), бора (черные) и двумя подрешетками железа (синие и серые); б – локальное окружение атома с номером 0 из А-подрешетки (слои В-подрешетки отделены кислородными треугольниками с разной ориентацией); с – вид сверху (видны искривленные траектории сверхобменного взаимодействия между А-подрешеткой и верхней/нижней В-подрешетками с различной ориентацией кислородных треугольников).

С.Овчинников

1. V.E.Dmitrienko et al., *Nature Phys.* **10**, 202 (2014).

КОНФЕРЕНЦИИ

“Quantum Critical Matter - From Atoms to Bulk” (QCM14), 18 to 23 August 2014, Obergurgl, Austria

The workshop "Quantum Critical Matter - from Atoms to Bulk" will bring together experts and students with a background in ultracold quantum gases, nanostructured and mesoscopic systems, and correlated bulk materials to address open questions and explore possible synergies. A one-day advanced school preceding the main workshop will create the minimal basis to successfully participate in the workshop.

27 top experts from the fields of ultracold quantum gases, nanostructured and mesoscopic systems, and strongly correlated bulk materials have confirmed their participation as invited speakers

Registration for the workshop is now open. Don't miss this event - register at the website:

<http://transidee-conference.uibk.ac.at/QCMatoms2bulk14>

Important dates:

May 17: Abstract submission for grants

June 17: End early-bird registration

QCM14 is set up as highly interactive meeting and we would like to strongly encourage you to actively contribute to the event:

1. Posters will play an important role. The poster sessions will be followed by poster discussion sessions where particularly interesting/intriguing aspects of certain posters can be discussed in a larger forum. Please submit an abstract! (See website)

2. The event will feature open format sessions. We invite you to propose a topic for your short presentation. If necessary, precedence will be given to early stage researches. (See website)

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 М.Маслов, С.Овчинников, Л.Опенков,

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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