

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Переход Лифшица в безмедных ВТСП

На фазовой диаграмме безмедных ВТСП области сверхпроводящего и магнитного порядка перекрываются в определенном диапазоне концентраций носителей тока (рис. 1).

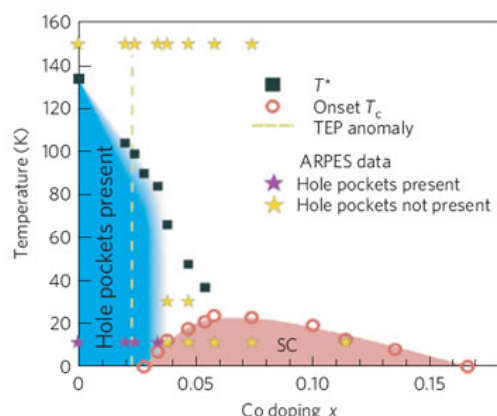


Рис. 1. Фазовая диаграмма $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$. T^* – температура магнитного перехода, T_c – температура начала сверхпроводящего перехода, TEP – термоЭДС.

Для понимания механизма спаривания электронов в пниктидах значительный интерес представляет вопрос о факторах, влияющих на их магнетизм и сверхпроводимость. В работе [1] сотрудников Iowa State Univ. и Lawrence Berkeley National Lab. (США) изучены ARPES-спектры монокристаллов $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ с различными x . Показано, что при малых x в антиферромагнитной фазе имеет место реконструкция поверхности Ферми, заключающаяся в формировании на уровне Ферми дырочных карманов. Допирование приводит к исчезновению этих карманов с соответствующим изменением топологии поверхности Ферми – переходу Лифшица $2\frac{1}{2}$ рода [2] (рис. 2).

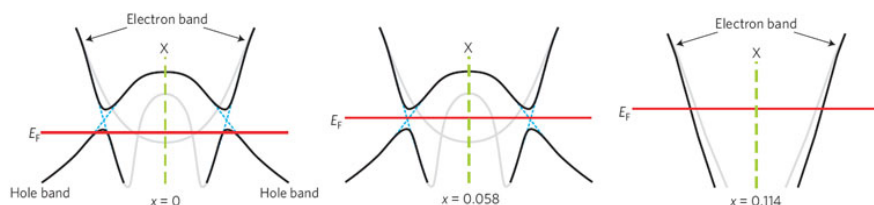


Рис. 2. Схематическое изображение эволюции закона дисперсии в окрестности точки X зоны Бриллюэна при допировании.

Только тогда и возникает сверхпроводимость, хотя антиферромагнетизм еще какое-то время сохраняется (рис. 1). Таким образом, для сверхпроводимости пниктидов определяющее значение имеет тип их электронной структуры, а дальний магнитный порядок при этом может быть или не быть.

Л.Опенков

1. C.Liu et al., *Nature Phys.* **6**, 419 (2010).
2. И.М.Лифшиц, *ЖЭТФ* **38**, 1569 (1960).

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

- 2 Перенос горячих электронов из полупроводниковых нанокристаллов

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Фторографен

Наномасштабное восстановление оксида графена

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Источник запутанных фотонов

Квантовая запутанность в биологических системах?

Динамика фотоэмиссии

- 4 Твердотельная квантовая память для света

СПИНТРОНИКА

- 4 Скирмионы в упаковке

СНОВА К ОСНОВАМ

- 5 Размер имеет значение-

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 6 Углеродная нанотрубка – контейнер для противораковых препаратов

- 7 Градусник на основе фуллеренов и углеродных нанотрубок

- 8 Графеновые пленки метровых размеров

- 9 Фуллерены из графена

Деграция углеродных нанотрубок при работе холодного полевого эмиттера

- 10 По ком звонит колокол...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Перенос горячих электронов из полупроводниковых нанокристаллов

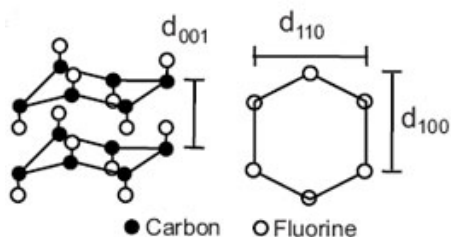
Солнечные батареи (СБ) предназначены для преобразования световой энергии в электрическую. В полупроводниковых СБ поглощение фотонов с энергиями больше ширины запрещенной зоны приводит к появлению “горячих” носителей, которые очень быстро (~ 1 пс) “остывают” за счет испускания фононов, то есть значительная часть поглощенной солнечной энергии необратимо теряется. По этой причине (и ряду других) максимальный теоретический к.п.д. стандартных кремниевых СБ составляет всего лишь 31%. Известно, что процесс охлаждения горячих носителей можно существенно замедлить, если вместо объемных полупроводников использовать полупроводниковые нанокристаллы достаточно малых размеров, так чтобы расстояние между их размерно-квантованными электронными уровнями превышало энергию самых высокочастотных фононов, и поэтому вероятность испускания фононов была очень мала. В работе [1] эта идея впервые реализована экспериментально: продемонстрирован перенос горячих электронов из коллоидных нанокристаллов PbSe диаметром ($3.3 \div 6.7$) нм в “электронный приемник” TiO_2 . При надлежащей химической обработке поверхности нанокристаллов такой перенос осуществляется за времена < 50 фс. Теоретически к.п.д. СБ на горячих электронах может достигать 66%.

1. W.A.Tisdale et al., *Science* **328**, 1543 (2010).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Фторографен

Для перевода графена из полуметаллического состояния в диэлектрическое были предложены различные методы его химической модификации, включая, например, окисление (оксид графена [1]) и сорбцию водорода (графан [2]). Теоретические расчеты предсказывают, что фторид графена (CF) также должен быть диэлектриком (с шириной запрещенной зоны 3.5 эВ). В недавней работе [3] американские и японские специалисты изготовили это соединение путем отшелушивания квазидвумерных слоев CF от фторида графена (см. рис.).



Фторид графита имеет слоистую кристаллическую структуру с гексагональной упаковкой атомов в каждом слое.

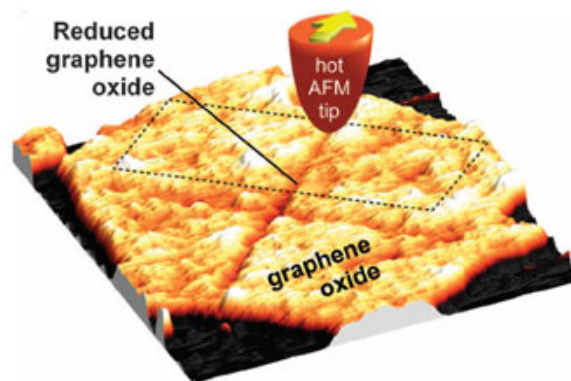
Однако температурная зависимость сопротивления оказалась не такой, как у зонного диэлектрика (не экспоненциальной по $1/T$). Ее анализ привел авторов [3] к выводу, что в CF имеет место прыжковая проводимость по локализованным состояниям, расположенным внутри щели. Фторографен предполагается использовать в оптических и других наноустройствах.

Л.Опенев

1. S.Stankovich et. al., *Nature* **442**, 282 (2006).
2. D.Elias et. al., *Science* **323**, 610 (2009).
3. S.-H.Cheng et. al., *Phys. Rev. B* **81**, 205435 (2010).

Наномасштабное восстановление оксида графена

Высокая подвижность электронов в графене в принципе позволяет изготавливать из него наноприборы с гигагерцовой рабочей частотой. Однако отсутствие у графена диэлектрической щели влечет за собой очень большие токи утечки таких устройств, поэтому в литературе широко обсуждаются различные способы диэлектризации графена (наноленты, сорбция водорода и пр.). Как одна из альтернатив графену рассматривается, в том числе, оксид графена. В работе [1] (США, Китай, Франция) предложен оригинальный способ “рисовать” на этом диэлектрике длинные проводящие каналы наноразмерной ширины. Иглу атомного силового микроскопа нагревают до температуры выше 300°C и сканируют ею поверхность оксида графена по заданному режиму. Вследствие термического восстановления (удаления кислорода) формируются узкие графеновые дорожки с требуемой конфигурацией и высокой электропроводимостью (см. рис.).



Локальное восстановление оксида графена горячей иглой атомного силового микроскопа.

Эта методика (термохимическая нанолитография) отличается прекрасной воспроизводимостью и может использоваться для изготовления реальных нанoeлектронных устройств.

1. Z.Wei et al., *Science* **328**, 1373 (2010).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Источник запутанных фотонов

Для функционирования оптического квантового компьютера требуются “перепутанные” фотоны. Современные источники запутанного света представляют собой весьма сложные и громоздкие оптические системы, к тому же вовсе не гарантирующие испускание в нужный момент пары перепутанных фотонов (с большой вероятностью пар может испускаться как несколько пар, так и ни одной). В работе [1] специалисты из Univ. of Cambridge (Великобритания) предложили новую простую конструкцию такого источника на основе структуры полупроводникового светодиода из GaAs с внедренной в нее квантовой точкой InAs. Генерация запутанных по поляризации фотонных пар имеет место при инжекции в квантовую точку двух электронов и двух дырок, в результате чего формируется биекситонное состояние, при излучательном распаде которого и испускаются перепутанные фотоны (см. рис.).

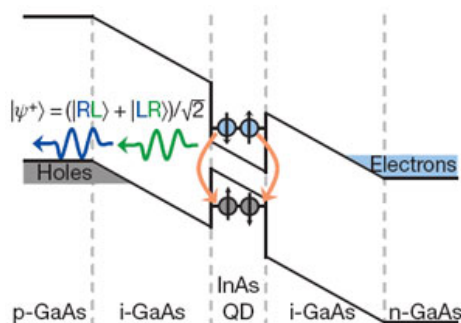


Схема устройства и иллюстрация принципа работы источника запутанных пар фотонов.

Вероятность успешного осуществления этой операции “по требованию” достигает 0.82 – гораздо больше, чем в известных методиках. Устройства такого типа можно использовать в самых различных областях квантовой информатики, включая квантовую связь и квантовые вычисления.

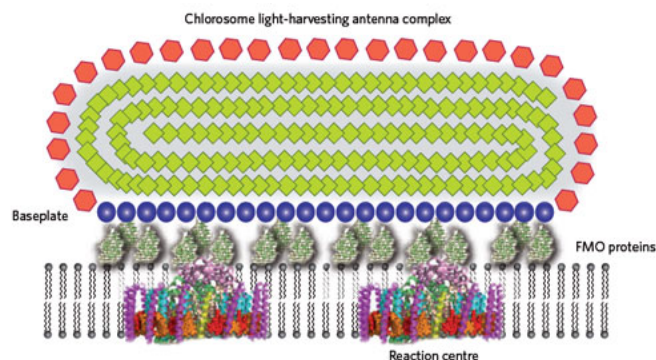
1. C.L.Salter et. al., *Nature* **465**, 594 (2010).

Квантовая запутанность в биологических системах?

Запутанные состояния принято считать атрибутом квантово-механических объектов, отсутствующим в макроскопических системах. Такие состояния очень чувствительны к воздействию внешней среды и быстро разрушаются из-за декогерентизации. Тем удивительнее выглядит сообщение [1], авторы которого предсказывают наличие квантовой запутанности в биологических системах, а именно – в белках, принимающих участие в процессе фотосинтеза – преобразования солнечной энергии в химическую (см. рис.). Авторы [1] полагают, что запутанным является электронное состояние группы молекул, образующееся после поглощения фотона. Запутанность сохраняется в течение всего времени жизни возбуждения (порядка пикосекунды). Возможно,

ПерсТ, 2010, том 17, выпуск 13/14

именно она способствует более быстрой и эффективной передаче энергии возбуждения к центру реакции, иначе, зачем бы тогда Природе понадобилось прибегать к услугам такого нетривиального квантового явления? Здесь еще предстоит разобраться... Теперь, если вспомнить, что запутанные состояния составляют основу квантовой информатики, то, может быть, стоит попытаться сконструировать квантовый компьютер не из холодных атомов в ловушке или неприметных квантовых точек, а из теплой живой субстанции?

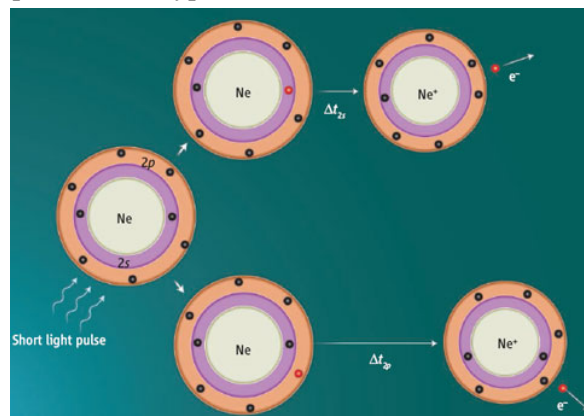


Схематическое изображение одной из фотосинтетических бактерий.

1. M.Sarovar et. al., *Nature Phys.* **6**, 462 (2010).

Динамика фотоэмиссии

Фотоэмиссия относится к числу тех фундаментальных физических эффектов, открытие и осмысление которых привело в свое время к формулировке основ квантовой механики. Если атом или поверхность твердого тела поглощает фотон с энергией больше определенной пороговой величины, то испускается электрон. Теории фотоэмиссии фокусируются преимущественно на энергетическом аспекте этого процесса, оставляя в стороне его динамику. Между тем понятно, что от момента поглощения фотона (то есть исчезновения падающего волнового пакета) до момента испускания электрона (то есть формирования исходящего волнового пакета) проходит какое-то, пусть и очень небольшое время Δt (задержка фотоэмиссии), требующееся для подстройки оставшихся электронов к новой системе энергетических уровней.



В атоме неона задержка фотоэмиссии Δt больше при поглощении фотона электроном 2p-оболочки.

В работе [1] для исследования динамики ионизации атомов Ne использована аттосекундная лазерная спектроскопия ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$). Выяснилось, что для эмиссии электронов из 2p-оболочки величина Δt на $(21 \pm 5) \text{ ас}$ больше, чем для электронов 2s-оболочки (см. рис.). Численные расчеты, выполненные многоконfigurационным методом Хартри-Фока, дают для разности $\Delta t_{2p} - \Delta t_{2s}$ величину, существенно меньше экспериментальной – около 5 ас. Требуется дальнейшее совершенствование как моделей фотоионизации атомов, так и экспериментальной методики (здесь нужно научиться определять абсолютные, а не относительные значения Δt).

Л.Опенев

1. M.Schultze et al., Science 328, 1658 (2010).

Твердотельная квантовая память для света

Практическая реализация ряда идей квантовой информатики требует использования так называемой “квантовой памяти” – устройства, способного хранить данные о квантовом состоянии в течение достаточно длительного времени и при необходимости выдавать их с целью реконструкции этого состояния. Так, например, в качестве квантовой памяти для света (то есть для информации, закодированной в фотонах) был использован атомный пар. Однако эффективность такой памяти оказалась очень низкой (не более 17%), тогда как в конкретных приложениях требуется минимум 50% (только тогда становится возможным применение известных протоколов коррекции ошибок). В работе [1] ученые из Австралии, Новой Зеландии и Китая использовали для хранения световой информации твердотельную среду – слабо легированные кристаллы $\text{Pr}^{3+}(0.005\%)\text{Y}_2\text{SiO}_5$, в которых оптически возбужденные ионы Pr^{3+} долго сохраняют когерентность. Эффективность этой памяти составляет 69%, что, в частности, достаточно для обеспечения секретности квантовой связи. В [1] также обращается внимание на еще один перспективный для квантовой памяти материал – $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

1. M.P.Hedges et al., Nature 465, 1052 (2010).

СПИНТРОНИКА

Скирмионы в упаковке

Во многих областях физики вихри рассматривают как самостоятельные объекты – достаточно вспомнить короткоживущие, но, тем не менее, впечатляющие своими последствиями смерчи, появляющиеся и в наших широтах, а также гораздо более стабильные образования вроде циклонов и антициклонов. Скирмионы, названные в честь английского физика Тони Скирме, рассматривавшего вихревые структуры для объяснения свойств пи-мезонов, актуальны не только в области физики элементарных частиц, но и в теории конденсированного состояния вещества. Японо-корейской команде физиков [1] удалось непосредственно наблюдать скирмионы в

магнитном веществе (рис. 1). Такие структуры могут представлять определенный интерес для практических приложений в спинтронике.

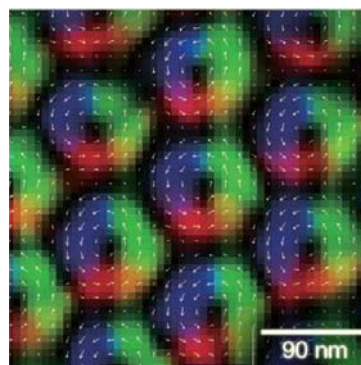
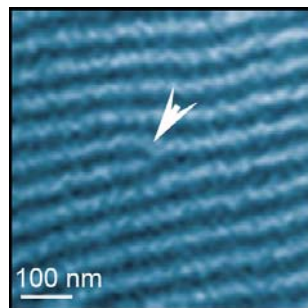


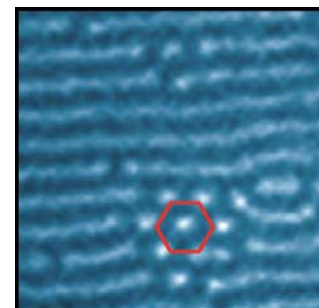
Рис. 1 Плотная упаковка магнитных вихрей-скирмионов. Изображение получено с помощью электронного микроскопа в $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$.

Скирмионы являются одним из возможных решений, описывающих равновесные магнитные

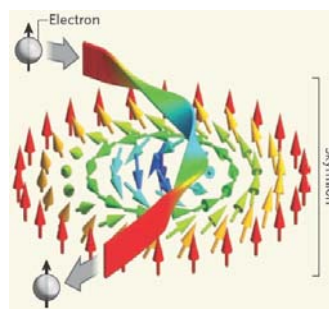
конфигурации в магнитных и антиферромагнитных веществах, и эти решения теоретически рассматривались в работах [2, 3]. Долгие годы их не удавалось обнаружить, но в последнее время появились сообщения, в которых с помощью дифракции нейтронов была зарегистрирована некая новая фаза магнитного упорядочения, возникающая при приложении внешнего постоянного магнитного поля в веществах MnSi и $\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{Si}$. Эта фаза могла быть интерпретирована как решетка вихрей. Впрочем, одно дело наблюдать дифракционную картину, другое дело – непосредственно увидеть отдельные вихри и процесс их зарождения. Это удалось сделать с помощью лоренцевской просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2а, б).



а



б



в

Рис. 2. а - полосовая геликоидальная спиновая структура, спонтанно образующаяся в $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ (стрелкой показана дислокация); б - появление гексагональной решетки вихрей во внешнем поле 20 мТл (элементарная ячейка показана красным цветом) [1]; в - эффективная “топологическая” сила, действующая на электрон, движущийся сквозь скирмион [6].

Внешне зарождение скирмионов очень напоминает образование решетки цилиндрических магнитных доменов в классическом микромагнетизме: в изначальной полосовой структуре (рис. 2а) зарождается

область с гексагональной упаковкой (рис. 2б). Различие лишь в характерных размерах (100 нм), при которых уже нет смысла говорить о доменах и границах между ними: полосовая структура соответствует магнитной геликоидной спирали, а гексагональная – системе вихрей.

Магнитные скирмионы интересны не только в фундаментальном аспекте. От них ожидают сильного воздействия на спиновый ток, протекающий через них, что можно использовать в магнитной памяти и спинтронных транзисторах [6]. Электрон, движущийся сквозь скирмион, несколько раз меняет спиновую ориентацию, подстраивая ее под локальное распределение намагниченности, в результате чего на него действует эффективная сила, изменяющая направление его движения (рис. 2в), что макроскопически должно проявляться как разновидность эффекта Холла.

А.Пятаков

1. X.Z.Yu et. al, *Nature* **465**, 901 (2010).
2. A.N.Bogdanov, D.A.Yablonski, *ЖЭТФ* **68**, 101 (1989).
3. U.K.Rossler et. al, *Nature* **442**, 797 (2006).
4. S.Muhlbauer et al, *Science* **323**, 915 (2009).
5. W.Munzer et al, *Phys. Rev. B* **81**, 041203(R) (2010).
6. Ch.Pfleiderer, A.Rosch, *Nature* **465**, 880 (2010).

СНОВА К ОСНОВАМ

Размер имеет значение-

И даже в том случае, когда речь идет не о гамбургерах. Статья [1] посвящена выявлению разницы размеров в 0.35 фемтометра. На работу у авторов статьи ушло 12 лет, но разве можно жалеть время и силы, если речь идет об основе основ, и не только нашего существования, но и, как минимум, всей видимой вселенной, - о протоне?

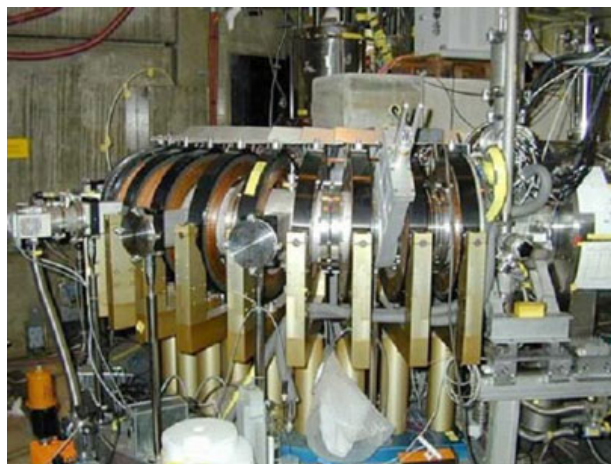
Конечно, 0.35 фемтометра – это немного, около 4 % величины прежде признанного радиуса протона. Было – согласно международно установленной взаимосвязанной системе мировых констант (CODATA [2]) – 0.877 фемтометра, а согласно новым результатам следует считать 0.842 фемтометра, причем точность, достигнутая в опубликованной работе, примерно на порядок превышает точность предыдущих определений.

Естественно, что такую разницу в размерах не удастся определить прямыми измерениями. Размер протона можно вычислить из результатов экспериментов разного типа. До сих пор за фундаментальную константу принималась взвешенная величина, вычисленная из результатов электрон-протонного рассеяния и из значения, полученного из тонкой спектроскопии атома водорода.

В атоме водорода состояния $2S_{1/2}$ и $2P_{3/2}$ очень близки. Из вычислений Дирака даже следовало, что энергетически эти состояния вырождены. Тем не менее, сейчас точно известно, что состояния энер-

гетически неэквивалентны. Это и есть лэмбовский сдвиг, открытый в 1947 г [3]. Эффект обусловлен тем, что S- состояние имеет большее перекрытие с ядром, чем P- состояние. Мало-мальски корректное представление об эффекте дает квантовая электродинамика, так что у тех, кому трудно на пальцах оценить величину эффекта, нет поводов для комплексов.

Обсуждаемая работа также использовала спектроскопические измерения, однако вместо водорода был взят атом мюония – искусственный объект, очень похожий на атомарный водород, только вместо электрона вокруг протона вращается отрицательный мюон. А поскольку мюон примерно в 200 раз тяжелее электрона, радиус его орбиты во столько же раз меньше, и размер протона сказывается существенней.



Идея эксперимента такова: Пучок мюонов попадает в камеру с водородом. Какая-то часть из них выбивает электрон из атома и образует мюоний. Вылетевший электрон попадает в детектор и сигнализирует – появился нужный атом мюония. Но и мюоний еще не в нужной кондиции. Он, (по своему) почти ридберговский – по энергии где-то на 14 орбите. Большинство атомов мюония быстро релаксирует в основное состояние, а около 1% задерживается в метастабильном 2S состоянии, примерно на 16 кэВ по энергии выше основного, правда ненадолго – в условиях эксперимента около 1 мкс. Вот эти-то мюонные атомы и нужны для дальнейшего.

По сигналу с детектора о вылете электрона, по газу с необходимой задержкой стреляет лазерная система, излучение которой настроено на частоту лэмбовского сдвига (49.85 ТГц, или длина волны около 6 мкм). И, если на пути импульса 6-микронного излучения оказывается метастабильный атом мюония в 2S состоянии, он может поглотить фотон и перейти в 2P состояние, откуда он, скорее всего, перейдет в основное состояние, испустив рентгеновский квант известной энергии – те самые 16 кэВ, что уже относительно легко детектируется. Ну, а чтобы быть уверенным, что рентгеновский квант не откуданибудь, а из мюония, используется типичный спектроскопический прием – лазерный импульс пе-

рестраивается по частоте в области лэмбовского сдвига с 49.75 ТГц до 49.95 ТГц. Если есть резонансное поглощение при определенной длине волны (и при этом через водород пролетает мюонный пучок, и все остальное тоже как надо) – то величина резонансной длины волны (или частота) и есть ответ эксперимента. Дальше вступает в действие квантовая электродинамика.

Статья содержит увлекательнейшее, иначе не скажешь, описание лазерной системы, которая стреляет электромагнитным импульсом по сигналу пролетавшего электрона, частота излучения которой привязана к цезиевому стандарту, и при этом рестраивается в области длин волн, в которой вообще нет приличных источников излучения. Но это для любителей, а пока вернемся к квантовой электродинамике.

Когда научные журналисты спросили руководителя команды исследователей, что же значит полученная ими разница в размерах протона, он уклончиво ответил, что они начали думать над этим шесть лет назад. Независимый эксперт из National Physical Laboratory (аналог NISTa в Великобритании) сказал, что команда сделала классную работу, что квантовая электродинамика, скорее всего, верна (!), но что "...уж больно сложные там вычисления...".

Из чего следует, во-первых, что в мире наукой интересуются – есть научные журналисты и те, для кого они пишут, наверное, их читают. Во-вторых, еще раз подтверждается известная истина, что сложные вычисления (в физике) имеют смысл тогда, когда и без них более или менее понятно, что должно получиться.

Кстати, это "во-вторых" прекрасно подтверждается высказываниями в блогах, не отягощенными какими-либо вычислениями. Из высказанного, наиболее близкой к сути проблемы представляется следующая идея – а почему нужно считать, что радиус протона – константа, т.е. одна и та же величина для электронного атома и для мюонного? Действительно – почему? В конце концов, существуют табличные данные по радиусам ионов, и никого не шокирует, что радиус иона металла в хлоридах и оксидах не совпадает.

Но, тем не менее, здравая идея – это еще не окончательный ответ. Возможны другие варианты – дрейф мировых констант, срастание темной энергии и тонкой материи – да мало ли? Пока что мы имеем некие противоречия в весьма фундаментальной области. А припоминаете, чем в свое время закончилась попытка устранить некоторые нестыковки в теории излучения черного тела?

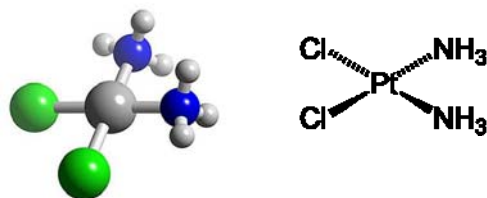
М.Компан

1. R.Pohl et al., *Nature* **466**, 213 (2010).
2. P.J.Mohr et al., *Rev. Mod. Phys.* **80**, 633 (2008).
3. W.E.Lamb, Jr., R.C.Retherford, *Phys. Rev.* **72**, 241 (1947).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Углеродная нанотрубка – контейнер для противораковых препаратов

Чтобы предотвратить нежелательные побочные эффекты (иногда очень серьезные), характерные для современной противораковой терапии, необходимо улучшить избирательность – в идеале лекарство должно попасть именно к злокачественным клеткам и не повредить нормальные.



Цисплатин (*cis*-[Pt(NH₃)₂Cl₂], или CDDP), широко применяемое в онкологии средство, к сожалению, избирательностью не отличается. Этот препарат оказывает токсическое действие на желудочно-кишечный тракт, кроветворную систему, нервную систему и др.; основным токсическим фактором, ограничивающим его применение, является нефротоксичность. Для устранения побочных эффектов предлагаются разные варианты. Один из них - использование концепции "магической пули", предложенной около 100 лет назад немецким учёным Паулем Эрлихом (Paul Ehrlich), основателем химиотерапии. Лекарство доставляется точно в цель, избирательно поражает болезнетворную мишень и не причиняет вреда организму. В современном варианте "пулями" могут служить углеродные нанокapsулы с лекарством внутри, например, углеродные одностенные нанотрубки (ОСНТ) или нанорожки (ОСНР). Такие нанокapsулы могут хранить препарат, и, если снабдить поверхность антителами, специфическими к антигенам раковых клеток, переносить его к нужной мишени. Биосовместимость нанотрубок можно повысить с помощью функционализации; определенным образом функционализированные нанотрубки будут удаляться из организма с помощью почек.

Учёные из West Pomeranian Univ. of Technology (Польша) [1] выбрали в качестве капсулы многостенные углеродные нанотрубки (МСНТ). Используя методы мокрой химии, они ввели в них цисплатин. Такая система доставки препарата предложена впервые. Ранее предлагалось помещать цисплатин в ОСНТ, ОСНР или использовать другую концепцию – "баркас" из функционализированной одностенной углеродной нанотрубки, который переправляет присоединенный к нанотрубке нетоксичный комплекс платины (IV). Выделение цисплатина из комплекса происходит в клетке опухоли, где pH среды заметно ниже (подробнее см. ПерсТ [2]).

МСНТ, полученные в работе [1] методом химического газифазного осаждения (CVD), имели длину в

несколько мкм и диаметр ~ 13 нм. С помощью ультразвуковой, химической и термической обработок они были очищены от примесей и измельчены до длины ~ 200 нм, чтобы снизить возможное вредное воздействие. Содержание CDDP – 13.6 мкг на 100 мкг нанотрубок. На рис.1 приведены изображения МСНТ, полученные с помощью электронной просвечивающей микроскопии высокого разрешения (HR-TEM), исходных (а) и заполненных цисплатином (b). Внутри нанотрубок видны сферические кластеры CDDP. Чёрная стрелка указывает на открытый конец нанотрубки.

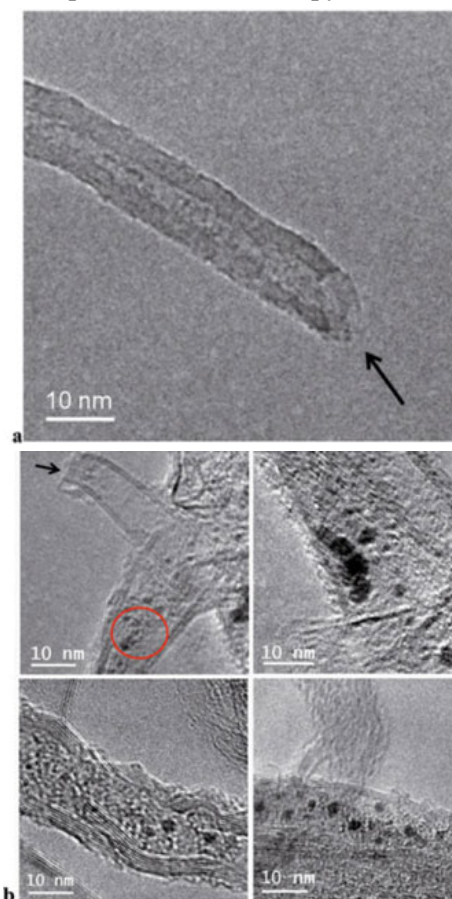


Рис.1. а - TEM- изображения очищенной нанотрубки, б - CDDP-функционализированных нанотрубок.

Данные EDX (энерго-дисперсионного рентгеновского анализа) для области внутри красного кружка на рис.1b указывают на присутствие платины и хлора от CDDP, углерода от нанотрубок и меди от сетки TEM (рис.2).

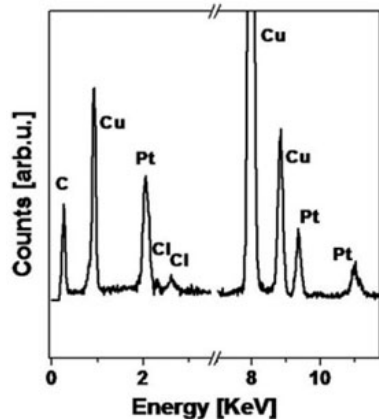


Рис. 2. EDX спектр CDDP-функционализированной нанотрубки

Выделение цисплатина из образца CDDP-МСНТ, помещенного в физиологический раствор, изучали в системе диализа. Анализ диализиро-

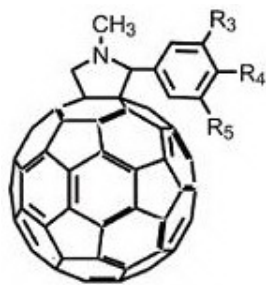
ванного раствора показал появление платины только через 12 часов (2.64 мкг CDDP на 100 мкг нанотрубок). Через 48 часов выделилось всего 12.3 мкг CDDP (на 100 мкг), через 72 часа – 12.9 мкг, или 95% препарата. Ранее та же группа исследователей изучала возможность использования одностенных нанотрубок. Процент заполнения был выше (21 мкг на 100 мкг трубок), возможно, из-за большей эффективности капиллярных сил, но выделилось всего 68% CDDP [3]. При этом выделение шло медленнее, в интервале 48-72 ч. Таким образом, новые результаты, полученные при использовании МСНТ, существенно лучше – лекарство выходит, в основном, между 12 и 48 ч., причём через 48 часов - практически всё количество. Учёные продолжают исследования.

О.Алексеева

1. C.Tripisciano et. al., *Eur. Phys. J. B* **75**, 141 (2010).
2. [ПерсТ 15, вып. 3, 5 \(2008\).](#)
3. C.Tripisciano et. al., *Chem. Phys. Lett.* **478**, 200 (2009).

Градуслик на основе фуллеренов и углеродных нанотрубок

Одностенные углеродные нанотрубки (ОСНТ) способны поглощать коротковолновое инфракрасное (near-infrared, NIR) излучение, преобразовывая электронные возбуждения в энергию молекулярных колебаний, что в свою очередь приводит к выделению тепла. Данное свойство ОСНТ может оказаться полезным для целого ряда приложений, таких как системы доставки лекарственных средств, терапия онкологических заболеваний и управляемые термические реакции. Однако для каждого из возможных применений необходим индивидуальный подбор рабочего температурного режима, поэтому проблема его измерения и контроля приобретает особое значение. Если в водном растворе повышение температуры можно зафиксировать, например, с помощью изменения интенсивности флуоресценции, то измерение температуры непосредственно на воздухе, процесс далеко не тривиальный. Многообещающим способом может оказаться применение ряда материалов с заранее определенными температурами плавления: если температура достигает “точки плавления”, то изменение их морфологии в течение фототермической конверсии может быть зафиксировано, например, посредством электронной или даже оптической микроскопии. В работе [1] предлагается использовать в качестве таких материалов микрочастицы или микродиски, содержащие ОСНТ и производные фуллеренов C_{60} , так называемые, алкилированные фуллерены, которые, по мнению авторов, послужат прекрасным “термометром”. Производные C_{60} с алифатическими цепочками различной длины 1–3 (рис. 1) обладают и различной температурой плавления. Готовые образцы представляют собой “нагревательные элементы”, а



- 1: $R_3 = R_4 = R_5 = OC_{20}H_{41}$
 2: $R_3 = R_4 = R_5 = OC_{16}H_{33}$
 3: $R_3 = R_4 = OC_{20}H_{41}$, $R_5 = H$

именно, одностенные углеродные нанотрубки, внедренные в фуллереновую матрицу (рис. 2).

Рис. 1. Химическая структура алкилированных фуллеренов C_{60} (1–3)

Авторами был проведен целый комплекс исследований, включая дифференциальную сканирующую калориметрию, инфракрасную Фурье-спектрометрию, рентгеновскую дифракцию, оптическую микроскопию, криогенную просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, атомно-силовую микроскопию. Оказалось, что воздействие NIR излучения на комплекс ОСНТ на воздухе вызывает значительное повышение температуры системы вплоть до $\sim 220^\circ C$. Для медицинских приложений, в частности, проблем, связанных с таргетной терапией, полученные результаты, заслуживают пристального внимания. В дальнейшем авторы планируют провести серию теоретических расчетов для более детального исследования представленных в работе [1] микродисков на основе фуллеренов C_{60} и ОСНТ. Кроме того, интересно было бы узнать, что будет происходить в случае комплексов, состоящих из производных фуллеренов и многостенных углеродных нанотрубок. Будем надеяться, что со временем авторам удастся ответить и на этот вопрос.

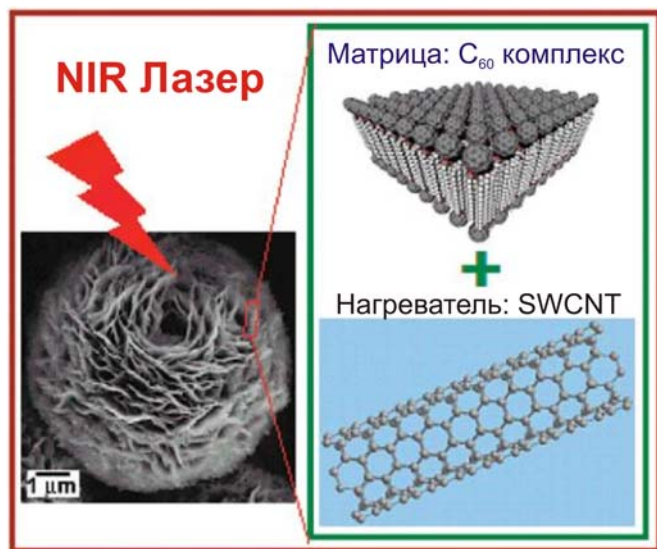


Рис. 2. Схематическое изображение комплекса фуллерен-ОСНТ для оценки фототермической конверсии ОСНТ.

М.Маслов

1. Y. Shen et. al., *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 8566 (2010).

Графеновые пленки метровых размеров

Открытие графенов считается одним из выдающихся достижений современной науки XXI века. Благодаря своим уникальным свойствам, графены являются одним из главных кандидатов на роль основного элемента будущей наноэлектроники. Уже первые эксперименты продемонстрировали перспективы использования графенов в качестве элемента транзисторных схем, как основы новых материалов с повышенными механическими характеристиками, а также - проводящих прозрачных пленок, которые можно с успехом использовать в солнечных элементах, плоских дисплеях и электронных устройствах, работающих от прикосновения пальцев. При этом главный фактор, определяющий перспективы реализации перечисленных и многих других прикладных направлений, основанных на использовании графенов, связан в первую очередь с возможностью получения относительно недорогих графеновых листов произвольного размера с заранее заданными свойствами.

Над этой проблемой трудятся десятки лабораторий многих стран. Так, недавно группа исследователей, объединяющая представителей Южной Кореи, Японии и Сингапура, сообщила о получении графеновых листов размером до 75 см, имеющих высокую электропроводность и оптическую прозрачность [1]. Такая возможность для синтеза графенов появилась при использовании в качестве подложки гибкой медной фольги, свернутой в рулон. Следует отметить, что существенное продвижение в направлении увеличения размеров графеновых листов не только расширяет область возможного использования этих объектов, но также позволяет проводить более надежные измерения их электронных характеристик на объектах макроскопических размеров. Синтез графенов происходит в цилиндрическом кварцевом реакторе шириной 20 см с использованием метода химического осаждения паров (CVD). На первой стадии синтеза рулон с медной фольгой помещают в реактор и нагревают до температуры $1000^\circ C$ в потоке водорода при давлении 90 мТорр и скорости прокачки $8 \text{ см}^3/\text{с}$ (приведено к нормальным условиям). По достижении температуры $1000^\circ C$ образец в течение 30 минут подвергают отжигу без прекращения потока водорода. В результате термической обработки средний размер зерен в медной фольге возрастает от нескольких мкм до 100 мкм, что приводит к увеличению размеров синтезируемых графенов. Затем в реактор в течение 30 минут поступает смесь CH_4 и H_2 при давлении 460 мТорр со скоростями 24 и $8 \text{ см}^3/\text{с}$, соответственно. После этого образцы быстро (со скоростью $10^\circ C/\text{с}$) охлаждают до комнатной температуры в потоке H_2 при давлении 90 мТорр. Полученную таким образом фольгу с графеновым слоем покрывают пластиковой лентой, для этого фольгу пропускают вместе с лентой между двумя роликами при давлении

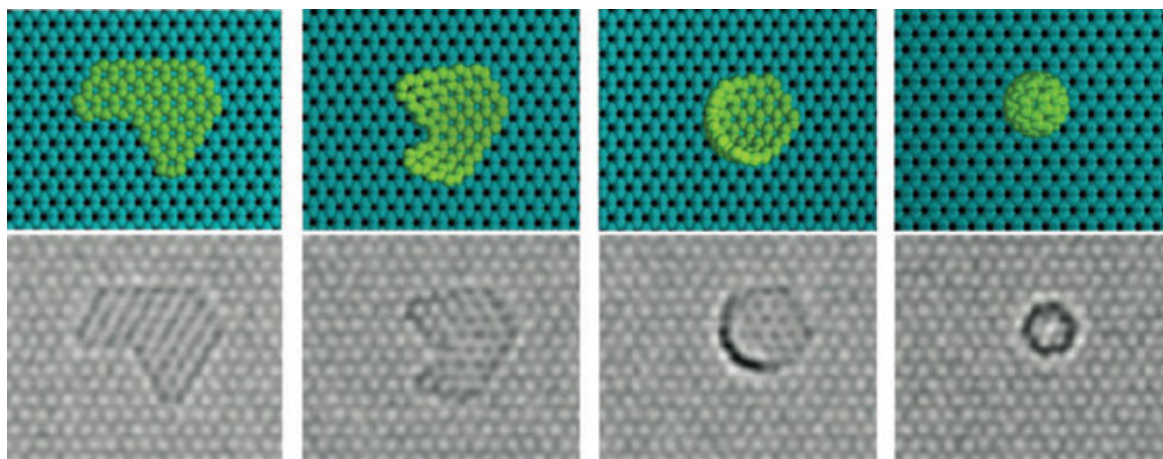
нии около 2 атм. В дальнейшем для удаления медной подложки используют электрохимическое травление в водном растворе (0.1 М) персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$. В результате этой процедуры получается графеновый слой, соединенный с пластиковой лентой адгезионными силами. Этот слой может быть перенесен на любую другую подложку в результате совместного прокатывания между двумя роликами при температуре 90-120°C со скоростью 150-200 мм/мин. В качестве такой подложки авторы использовали пленку полиэтилентерефталата (ПЭТ) толщиной 188 мкм. Графеновые слои, соединенные с полосками ПЭТ, имеют прямоугольную форму с максимальным размером по диагонали 75 см. Анализ спектров комбинационного рассеяния образцов показывает, что графеновые пленки состоят преимущественно из однослойных графенов. Однако на изображениях, полученных с помощью атомного силового и просвечивающего микроскопов, можно видеть островки двухслойных

и многослойных графенов. Прозрачность однослойных графеновых пленок составила, согласно измерениям, 97.4%, что согласуется с теоретической оценкой коэффициента поглощения такой пленки $\approx \pi e^2 / \hbar c$. Добавление каждого слоя снижает прозрачность на 2–3%, так что прозрачность четырехслойного графена составляет около 90%. Измеренное значение сопротивления такой пленки, перенесенной на подложку из полиметилметакрилата, составило $\approx 125 \text{ } \Omega/\text{см}^2$. Сопротивление графена падает обратно пропорционально числу слоев, так что сопротивление четырехслойного графена составляет около $30 \text{ } \Omega/\text{см}^2$. Тем самым прозрачная проводящая графеновая пленка превосходит по своим характеристикам традиционно используемый в электронике материал на основе индий-оксид олова.

А.Елецкий

I. S.Bae et. al., Nature Nanotech. Advance online publication (20 June 2010).

Фуллерены из графена



Основные этапы формирования фуллерена C_{60} из фрагмента графена [1]: численное моделирование (вверху) и эксперимент (внизу).

К настоящему времени хорошо разработаны разнообразные методики изготовления фуллеренов C_{60} , включая, например, лазерный нагрев графита или его термическое испарение. Однако конкретный микроскопический механизм формирования этих красивых сферообразных нанообъектов пока не ясен. Теоретики обсуждают несколько различных моделей, а эксперименты по масс-спектрометрии не дают информации ни о структуре исходных углеродных фрагментов, ни о характере их эволюции по мере преобразования в фуллерены. В работе [1] (Германия, Испания, Великобритания) впервые удалось непосредственно наблюдать динамику образования фуллеренов в режиме реального времени, используя для этой цели просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения. Было установлено, что при воздействии на графен пучка электронов с энергией 80 кэВ он разбивается на небольшие “чешуйки”, которые претерпевают следующую цепочку трансформаций (см. рис.): 1) от-

рыв атомов с небольшими координационными числами от зигзагообразных границ чешуйки; 2) образование в чешуйке пятиугольников из связей С-С; 3) изгиб плоской чешуйки в “чашу”; 4) сворачивание чаши в фуллерен. Экспериментальные результаты отлично согласуются с данными численного моделирования. Заметим, впрочем, что условия синтеза фуллеренов в [1] существенно отличались от стандартных, давно и широко используемых. Поэтому можно предположить, что выявленный в [1] механизм образования фуллеренов не является единственно возможным.

1. A.Chuvilin et. al., Nature Chem. 2, 450 (2010).

Дегградация углеродных нанотрубок при работе холодного полевого эмиттера

Одно из наиболее глубоко разработанных направлений использования углеродных нанотрубок (УНТ) связано с развитием холодных полевых катодов, в которых в качестве эмиттера применяются

УНТ. Преимущества УНТ связаны с их миниатюрными размерами и высоким аспектным отношением, благодаря которому вблизи вершины нанотрубки происходит существенное увеличение напряженности электрического поля. Тем самым разработка катодов на основе УНТ открывает возможность создания нового класса вакуумных приборов, в которых достаточно высокий ток эмиссии достигается при пониженных значениях приложенного напряжения. Среди технических проблем, стоящих на пути коммерческих применений таких катодов, следует в первую очередь отметить структурную деградацию эмиттеров на основе УНТ в результате протекания эмиссионного тока. Детальное исследование механизма деградации выполнено в Samsung Advanced Inst. of Technology (Южная Корея) [1]. Ученые в качестве катода использовали пасту, содержащую многослойные УНТ, которую наносили на стеклянную подложку, покрытую слоем оксида In/Sn (ITO). После нанесения пасты поверхность катода площадью $2 \times 2 \text{ см}^2$ просушивалась, экспонировалась, проявлялась и подвергалась отжигу при температуре 450°C в атмосфере азота. Эта процедура приводит к образованию на поверхности катода островков (пикселей), заполненных УНТ пастой размером 6 мкм и отделенных друг от друга расстоянием 700 мкм. Суммарная площадь пикселей составляла 0.004 см^2 . Анод был выполнен из ITO ZnS:Cu Al.

А.Елецкий

1. C.-W.Baik et. al. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 023105 (2010).

По ком звонит колокол...



10 июля 2010 г. оборвалась жизнь академика Кирилла Сергеевича Александрова.

После окончания аспирантуры он был приглашен в Институт физики в Красноярске, где трудился до последних дней своей жизни, и в течение 20 лет (с 1983 по 2003 г.г.)

был директором этого Института.

Академик Александров внес выдающийся вклад в исследования базовых проблем современной кристаллофизики и кристаллографии. Ему принадлежат

первые систематические исследования упругих свойств основных порообразующих минералов. Он автор 450 научных публикаций, в том числе десяти монографий, его работы получили мировое признание, а его дело продолжают многочисленные ученики и последователи.

Природа одарила Кирилла Сергеевича прекрасными качествами: доброжелательностью, мудростью, интеллигентностью, порядочностью и умением сопереживать. С ним всегда было интересно общаться. Кирилл Сергеевич был нашим внимательным читателем и добрым критиком. Именно таким он останется в наших сердцах и нашей памяти.



20 июля 2010 г. ушел из жизни академик Юрий Александрович Изюмов.

В Институт физики металлов УрО РАН Ю.А.Изюмов пришел в 1959 году и много лет возглавлял созданный им отдел математической и теоретической физики.

Еще в 60-х годах он построил исчерпывающую теорию магнитоупорядоченных кристаллов с примесями, предсказал квазилокальное состояние в магнетонном спектре кристалла со слабо связанной примесью. В последние годы Ю.А. Изюмов вернулся к проблеме сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма и всесторонне разработал совместно с казанскими коллегами теорию F/S-систем, составленных из слоев ферромагнетика и сверхпроводника.

Юрий Александрович был одним из главных организаторов и непременным участником знаменитых “Коуровок”.

Доброжелательность, интеллигентность, отзывчивость, его очаровательная улыбка – все это притягивало к нему многих людей. Юрий Александрович был давним читателем и “почитателем” ПерсТа. Именно таким он останется в памяти тех, с кем он работал и дружил.

Редакция и авторы ПерсТа

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

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

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, А.Елецкий, М.Компан, М.Маслов, Л.Опенов, А.Пятаков

Компьютерный ввод, макет: И.Фурлетова

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