

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### *Исследование эффекта Мейснера с помощью эффекта Мессбауэра в сверхпроводнике $H_2S$ при высоких давлениях*

Ученые из Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Института ядерных исследований РАН, Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, а также Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” использовали синхротронную мессбауэровскую спектроскопию для детектирования выталкивания магнитного потока из объема сверхпроводящего сероводорода, находящегося при давлении 150 ГПа [1]. Изюминка и главная оригинальная идея работы состоит в том, что авторам удалось измерить эффект Мейснера с помощью эффекта Мессбауэра – резонансного поглощения электромагнитного излучения ядром атома. Идея метода предложена И.А. Трояном и А.Г. Гаврилюком и основана на многолетних исследованиях по эффекту Мессбауэра в отделе “Ядерных методов и магнитных структур” Института кристаллографии РАН под руководством профессора И.С. Любутина. Сотрудничество с учеными источника синхротронного излучения ID18 ESRF (г. Гренобль, Франция) и Института химии им. Макса Планка (г. Майнц, Германия) сделало возможным выполнить эти уникальные измерения.

В августе 2015 г. в журнале Nature [2] опубликованы данные измерений сопротивления и намагниченности образца сероводорода сжатого до 200 ГПа. Результаты указывают на существование сверхпроводящего состояния с рекордной температурой начала сверхпроводящего перехода порядка 200 К.

Для доказательства сверхпроводимости в каком-либо соединении необходимо обнаружить эффект Мейснера - выталкивание магнитного поля из объема сверхпроводника, то есть проявление сильного диамагнетизма ниже критической температуры. Исследования при давлениях мультимегабарного диапазона возможны только в ячейках высокого давления с алмазными наковальнями (DAC), где размеры образца составляют лишь 15-40 микрон. Магнитные свойства подобных образцов могут быть измерены с помощью SQUID устройств, однако сигнал от образца, находящегося в камере DAC, более чем на порядок меньше сигнала от материалов, из которых изготовлена камера.

Новый метод позволяет прямыми измерениями установить наличие эффекта Мейснера в сероводороде. Детектором магнитного потока является тонкая оловянная фольга, обогащенная мессбауэровским изотопом Sn-119. Фольгу размещали в рабочем объеме камеры DAC, который затем заполняли сжиженным сероводородом, охлажденным до температуры конденсации (197 К). В результате оловянная фольга оказывалась погруженной в сжиженный сероводород, сверхпроводящие свойства которого нужно было исследовать. Чтобы предотвратить химическое разложение  $H_2S$  давление в камере увеличивали до 150 ГПа при низкой температуре.

Ядра мессбауэровского изотопа Sn-119 являются высокочувствительными датчиками внешнего магнитного поля,

И далее ...

- 3 Резкое изменение концентрации носителей в купратном сверхпроводнике при возникновении псевдощели
- 4 Нематичность в купратных сверхпроводниках со страйповым порядком

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 4 Нарушение неравенства Белла в кремнии  
Экспоненциальная защита майорановских нулевых мод  
Гидродинамика электронов

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Природные нанотрубки глинистого минерала галлаузита
- 7 Фуллерены выхлопных труб

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 Первая российская конференция “Физика - наукам о жизни”, 12-16 сентября 2016, г. Санкт Петербург (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

однако из-за микронных размеров образца возникла необходимость использовать метод синхротронной мессбауэровской спектроскопии (резонансное ядерное рассеяние), в котором пучок излучения можно сфокусировать в пятно микронных размеров и локально измерять магнитное поле, действующее на ядра Sn-119.

Схема эксперимента представлена на рис. 1 для случая, когда внешнее магнитное поле направленно перпендикулярно поверхности образца. Если H<sub>2</sub>S находится не в сверхпроводящем состоянии или в

промежуточном (смешанном) состоянии, то магнитное поле проникает в объём образца и спиновые состояния ядер Sn-119 расщепляются магнитным полем. В спектрах резонансного ядерного рассеяния это проявляется в виде осцилляций амплитуды сигнала. При сильном сжатии оболочка оловянного датчика, состоящая из H<sub>2</sub>S, становится сверхпроводящей при понижении температуры и магнитное поле не проникает в оловянную фольгу. При этом сигнал ядерного рассеяния имеет форму экспоненциального затухания.

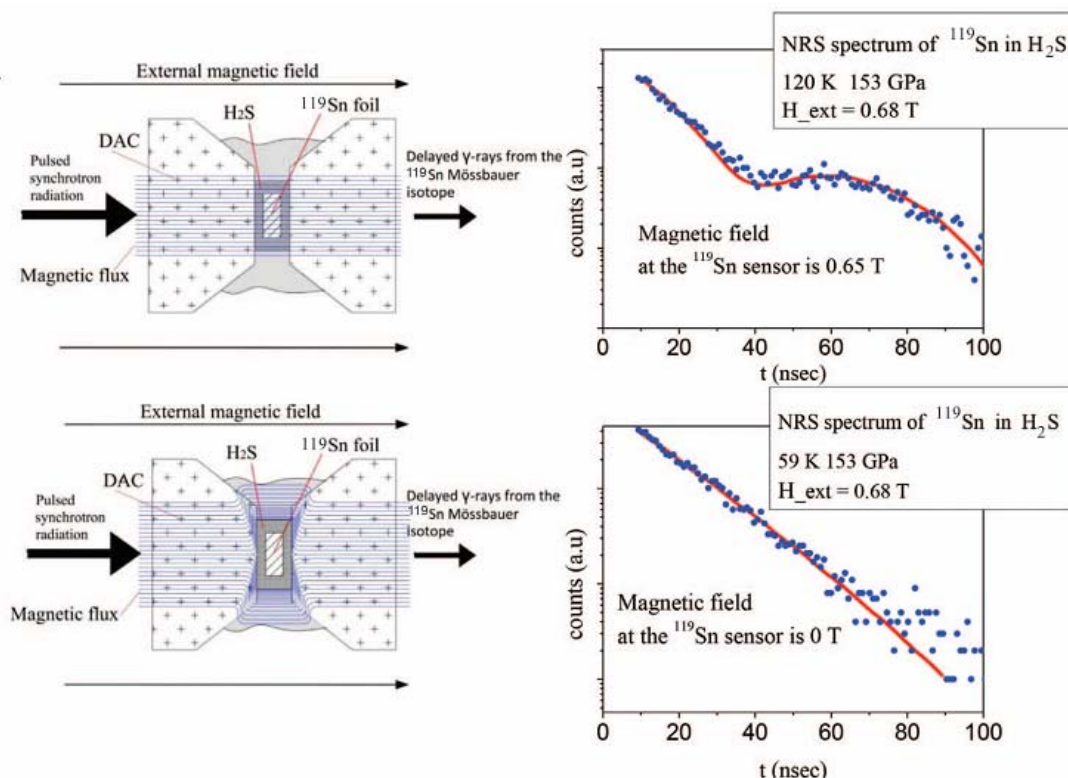


Рис. 1. Схема эксперимента. Оловянная фольга окружена сжатым до давления 153 ГПа сероводородом в камере с алмазными наковальнями. Импульсное синхротронное излучение рассеивается на ядрах мессбауэровского изотопа Sn-119. Система детекторов измеряет эволюцию во времени спектров излучения ядер олова в направлении синхротронного пучка. При  $T > T_c$  во внешнем магнитном поле, направленном вдоль пучка, временные спектры показывают квантовые биения из-за магнитного расщепления ядерных уровней олова. При температурах ниже перехода H<sub>2</sub>S в сверхпроводящее состояние оловянная фольга экранирована от внешнего магнитного поля сверхпроводящим сероводородом. Расщепление ядерных уровней не происходит, и никакие магнитные квантовые биения не наблюдаются.

Камеру DAC охлаждали до температуры 5 К в отсутствие магнитного поля, а затем включали магнитное поле величиной около 0.7 Тл. После этого температуру образца начинали постепенно повышать, записывая спектр ядерного резонансного рассеяния для каждой точки. Эксперименты были выполнены для двух направлений магнитного поля – параллельно и перпендикулярно поверхности алмазных наковален (т.е. расположению образца).

В результате установлено, что сильно сжатый сероводород эффективно выталкивает магнитный поток из объёма образца до температуры 140 К при величине магнитного поля 0.7 Т. Это означает, что этот

материал является сверхпроводником второго рода с высокими критическими параметрами. Необходимо отметить, что при 140 К образец еще находится в сверхпроводящем состоянии, но плотность магнитных вихрей становится высокой и, соответственно, всё большая часть оловянной фольги испытывает влияние магнитного поля. Пример на рис. 2 показывает, что небольшое магнитное поле еще выталкивается из объёма образца при температурах выше 150 К, указывая, что часть образца все еще находится в сверхпроводящем состоянии.

Рекордные температуры начала перехода в сверхпроводящее состояние (до 203 К), полученные ра-

нее при измерениях сопротивления, можно объяснить эффектами перколяции, то есть возможностью протекания тока по микроскопическим сверхпроводящим каналам. Данные работы [1] убедительно доказывают, что сверхпроводимость в сероводороде носит объёмный характер.

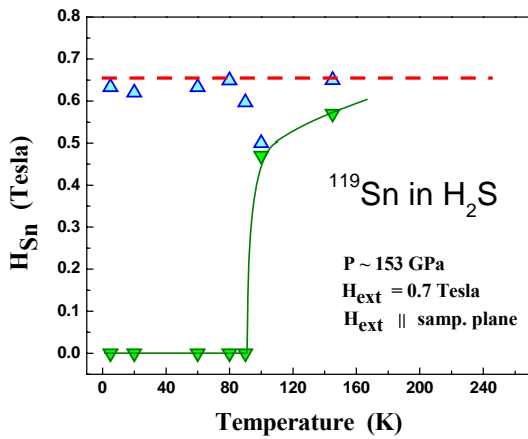


Рис. 2. Температурные зависимости магнитных полей на ядрах Sn-119 для двух компонент с малой (зеленый треугольник) и большой (синий треугольник) величинами поля в сверхпроводнике H<sub>2</sub>S при давлении ~ 153 ГПа во внешнем магнитном поле ~ 0.7 Т. Красная пунктирная линия – ожидаемая величина сверхтонкого магнитного поля на ядрах Sn-119 без эффекта Мейснера.

Параллельно авторы провели точно такие же измерения для системы с датчиком Sn-119, заменив сульфид водорода на обычный водород, чтобы удостовериться в том, что сверхпроводимость возникает именно в исследуемом образце, а не в датчике. Полученные данные подтвердили эффект сверхпроводимости в H<sub>2</sub>S.

Фактически предложенный элегантный метод представляет собой прямое наблюдение эффекта Мейснера в сверхпроводниках, что до сих пор невозможно было осуществить никакой другой экспериментальной методикой.

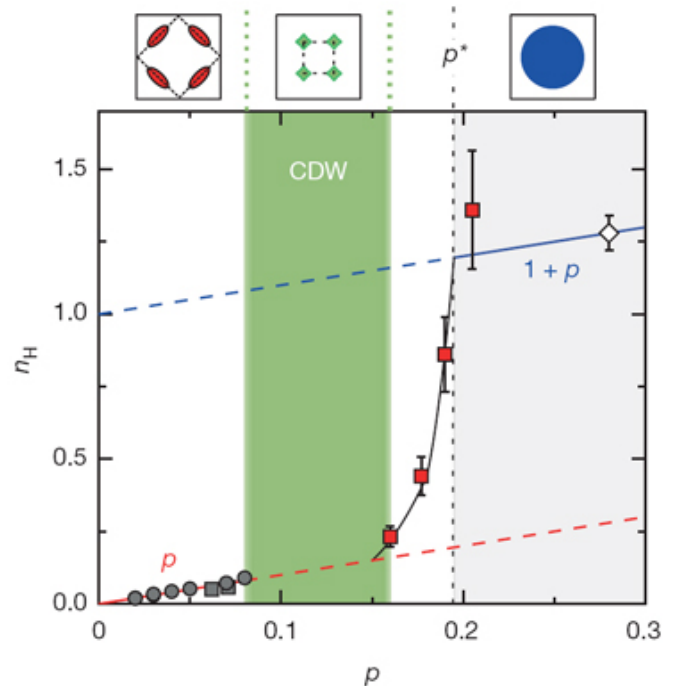
Кроме собственно подтверждения очень высокой температуры сверхпроводящего перехода в сероводороде, данная работа чрезвычайно важна и в методическом плане. Она открывает возможность на регулярной основе проводить исследования по экранированию магнитного поля образцами сверхпроводников очень малого размера. Это важно для исследования сверхпроводимости в наноструктурах и в условиях высокого давления.

И.А. Троян, А.Г. Гаврилюк,  
И.С. Любутин

1. I.A. Troyan et al., *Science* **351**, 1303 (2016).
2. A.P. Drozdov et al., *Nature* **525**, 73 (2015).

### Резкое изменение концентрации носителей в купратном сверхпроводнике при возникновении псевдощели

При концентрации дырок  $p$  меньше  $p^* = 0.19$  в нормальном состоянии купратных ВТСП имеется псевдощель, природа которой пока не ясна. Не понятно, имеет ли она отношение к фазе моттовского диэлектрика при малых  $p$  или к зарядовому порядку, приводящему к реконструкции поверхности Ферми при промежуточных  $p$ . В работе [1] (Канада, Франция, Польша) коэффициент Холла ВТСП YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> с  $p = 0.16-0.205$  измерен в достаточном для подавления сверхпроводимости магнитном поле  $H = 88$  Тл. Это позволило определить зависимость холловской концентрации носителей  $n_H$  от  $p$  в нормальном состоянии. Выяснилось, что при уменьшении  $p$  смена зависимости  $n_H = 1 + p$  на  $n_H = p$ , сопровождающаяся резким падением  $n_H$ , начинается строго при  $p = p^*$ , то есть достаточно далеко от верхней границы фазы с волной зарядовой плотности  $p = 0.16$  (см. рис.).



Зависимость холловской концентрации носителей  $n_H$  от концентрации дырок  $p$  при  $T = 500$  К. Зеленым цветом отмечена область, в которой происходит реконструкция поверхности Ферми, связанная с волной зарядовой плотности (CDW).

Это говорит о том, что, во-первых, псевдощель связана не с зарядовым порядком, а, скорее, с антиферромагнитным моттовским диэлектриком и, во-вторых, именно переход в псевдощелевую фазу приводит к трансформации поверхности Ферми, так что ее объем резко уменьшается на одну дырку в расчете на атом меди.

Л.Опенев

1. S.Badoux et al., *Nature* **531**, 210 (2016).



## Нематичность в купратных сверхпроводниках со страйповым порядком

В недодопированных купратных ВТСП сверхпроводимость конкурирует с волной зарядовой плотности. Кроме того, в ВТСП наблюдается еще и нематичность, которая характеризуется нарушением симметрии электронной структуры относительно поворота на  $90^\circ$  в слоях  $\text{CuO}_2$ . Пока не ясно, связана ли она с каким-то другим типом упорядочения, например, со страйповым зарядовым порядком или со структурным переходом из тетрагональной фазы в орторомбическую. В работе [1] (Канада, Германия, США, Франция, Австрия) исследовано резонансное рассеяние рентгеновских лучей на ВТСП  $(\text{La},\text{M})_2\text{CuO}_4$  с  $\text{M} = \text{Nd}/\text{Sr}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Eu}/\text{Sr}$  и различными температурами структурного и зарядового переходов. Установлено, что ВЗП-упорядочение не влияет на структуру слоев  $(\text{La},\text{M})_2\text{O}_2$ , но приводит к нарушению  $\text{C}_4$  симметрии  $\text{Cu}3d$  состояний в каждой элементарной ячейке слоев  $\text{CuO}_2$ , тем самым порождая дополнительную “внутреннюю” электронную нематичность. Такой тип нематичности может быть общей чертой всех недодопированных ВТСП.

Л. Опенов

1. A.J.Achkar et al., *Science* 351, 576 (2016).

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Нарушение неравенства Белла в кремнии

Как ядерные, так и электронные спиновые кубиты в кремнии способны сохранять свою когерентность в течение очень длительного времени ( $\sim 1$  с и более). Точность однокубитных операций с ними приближается к 100 %. Но для квантовых вычислений требуются еще и двухкубитные операции. В работе [1] приготовлены “гибридные” двухкубитные состояния, в которых один кубит был ядерным (спин ядра донорного атома  $^{31}\text{P}$  в кремнии), а второй – электронным (спин валентного электрона этого же атома). Авторы продемонстрировали возможность полного контроля двухкубитного гильбертова пространства и в очередной раз показали, что для запутанных состояний неравенство Белла нарушается, причем с большим запасом.

1. J.P.DeHollain et al., *Nature Nanotech.* 11, 242 (2016).

### Экспоненциальная защита майорановских нулевых мод

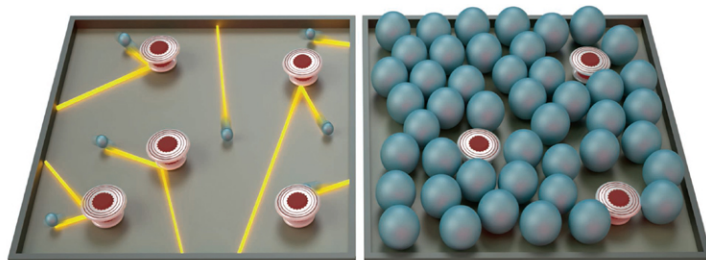
Майорановские нулевые моды (состояния майорановских квазичастиц с очень малой, почти нулевой энергией) было предложено использовать в качестве “строительных блоков” помехоустойчивых квантовых компьютеров. В отличие от бозонов и фермионов, эти моды имеют неабелеву статистику, что позволяет проводить квантовые операции, “оплетая” изолированные моды одна вокруг другой. Такие топологические операции защищены от внеш-

них помех тем лучше, чем ближе к нулю энергии мод. Теория предсказывает, что отклонение от нуля экспоненциально уменьшается с ростом расстояния между пространственно разнесенными модами. Это предсказание подтверждено экспериментально в работе [1] (Дания, США). Ее авторы исследовали нанопровода  $\text{InAs}$ , в которых была индуцирована сверхпроводимость за счет эффекта близости с алюминием. Показано, что разность энергий двух мод, локализованных на противоположных концах нанопровода, уменьшается примерно в 10 раз всякий раз, когда длина последнего увеличивается на 0.5 мкм.

1. S.M.Albrecht et al., *Nature* 531, 206 (2016).

### Гидродинамика электронов

Если щелкнуть выключателем, то по проводам потечет электрический ток, и загорится свет. Если повернуть вентиль, то из водопроводного крана потечет вода. Вроде бы похоже, но физика совершенно разная. Течение воды описывается теорией гидродинамики, которая рассматривает текущую жидкость как единое целое, забывая, что она состоит из отдельных молекул. Напротив, квантовая механика, описывающая электрический ток в металлах, считает, что переносящие этот ток электроны в первом приближении остаются самостоятельными частицами, которые не сталкиваются друг с другом, а лишь рассеиваются на дефектах (см. рис.).



Слева: В обычных металлах электрический ток переносится электронами (шарики), которые, согласно законам квантовой физики, двигаются независимо друг от друга, рассеиваясь на несовершенствах кристалла.

Справа: В нормальных жидкостях (таких как вода) молекулы непрерывно сталкиваются друг с другом, формируя макроскопическую жидкость, которая описывается законами гидродинамики.

В некоторых твердых телах сильно взаимодействующие между собой электроны тоже могут демонстрировать гидродинамические транспортные свойства.

В работах [1-3] три группы исследователей независимо друг от друга пришли к выводу, что электроны в твердых телах тоже могут подчиняться законам гидродинамики. Причина “гидродинамического поведения” кроется в сильном межэлектронном взаимодействии. Статьи [1, 2] посвящены графену, а [3] – кобальтату палладия. В частности, наблюдалось нарушение закона Видемана-Франца [1] и отрицательное локальное электросопротивление [2], являющееся следствием вязкого течения “дираков-

Перст, 2016, том 23, выпуск 6

ской жидкости” (оценка ее вязкости дает величину на порядок больше, чем у меда!). Для описания гидродинамики электронов можно использовать математический аппарат теории струн. В дальнейшем было бы интересно изучить электронные аналоги таких гидродинамических явлений, как ударные волны, турбулентность и т.п.

*По материалам заметки  
“Electrons go with the flow  
in exotic material systems”,  
J.Zaanen, Science 531, 1026 (2016).*

1. J.Crossno et al., Science 531, 1058 (2016).
2. D.A.Bandurin et al., Science 531, 1055 (2016).
3. P.J.W.Moll et al., Science 531, 1061 (2016).

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Природные нанотрубки глинистого минерала галлаузита



На фоне многочисленных публикаций об успешном применении углеродных нанотрубок не очень заметны работы, относящиеся к природным нанотрубчатым материалам. ПерсТ уже рассказывал о перспективном сорбенте имоголите, алюмосиликатном

минерале, состоящем из пучков длинных тонких одностенных трубок [1]. Но особый интерес представляет галлаузит. Это глинистый слоистый алюмосиликатный минерал, содержащий межслоевую воду. Трубочатая форма является самой распространенной. За последние 20 лет существенно возросло количество публикаций, посвященных свойствам и перспективам применения этих природных нанотрубок, а недавно появилось несколько обзоров [2-4]. Размеры глинистых нанотрубок обычно таковы: внешний диаметр 30-190 нм, внутренний просвет 10-30 нм (иногда до 100 нм), длина 100-2000 нм (в зависимости от месторождения, а также от последующей обработки). Слой состоит из кремнекисло-

родных тетраэдров и алюмогидроксильных октаэдров (схема структуры слоя приведена на рис. 1). Межслоевая вода удаляется при небольшом нагреве (100-120°C), при этом расстояние между слоями уменьшается от 1 нм до 0.7 нм.

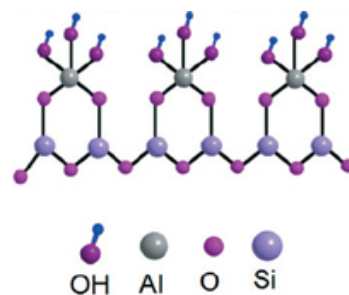


Рис. 1. Структура слоя галлаузита [4].

Крупные месторождения галлаузита имеются в США, Австралии, Новой Зеландии, Китае. В России он обнаружен на Урале; начаты поисковые работы на Шенуровском месторождении в Тульской области с целью выделения залежей глинистых пород с повышенным содержанием галлаузита [5]. Некоторые фирмы продают галлаузитовые нанотрубки (ГНТ) в чистом виде в больших количествах по низкой цене (на фото в начале статьи показаны ГНТ из Китая [3]). Таким образом, галлаузитовые нанотрубки, в отличие от углеродных, уже сейчас можно использовать в промышленных масштабах. Этот природный материал нетоксичен для живых организмов, не загрязняет окружающую среду. Больших успехов в изучении свойств и возможных применений ГНТ достигли российские ученые из Казанского университета. В обзоре (совместно с китайскими коллегами) они представили свои результаты и последние достижения других исследователей [3].

Нанотрубки галлаузита, скрученные пластины алюмосиликата, имеют разный состав на внешней и внутренней поверхностях слоя – отрицательно заряженный  $\text{SiO}_2$  и положительно заряженный  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , соответственно (рис. 2 слева) [3]. Это отличает ГНТ от других нанотрубок, имеющих один состав (например, углеродных), и расширяет возможности применения.

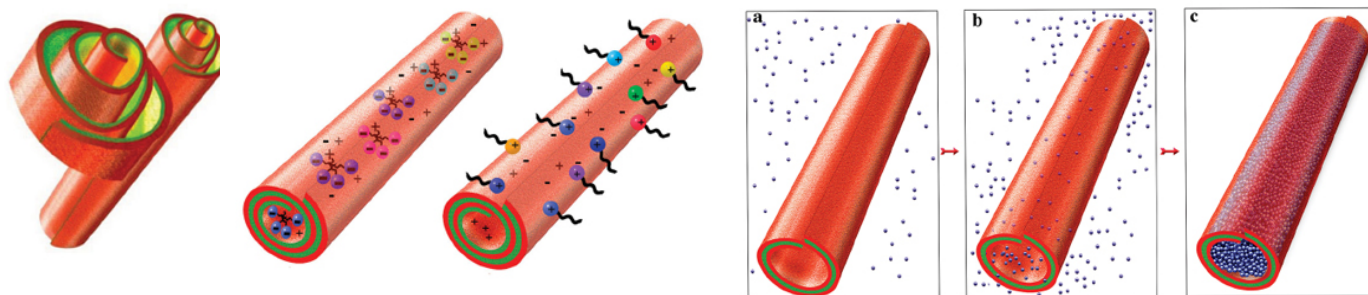


Рис. 2. Слева: Нанотрубки галлаузита. Алюмосиликатные пластины скручены так, что на внутренней поверхности нанотрубок находится оксид алюминия (показан зеленым цветом), а на внешней – оксид кремния (красный цвет). В центре – селективная адсорбция анионных и катионных амфифильных молекул внутри нанотрубок и на внешней поверхности. Справа: заполнение нанотрубок лекарством из насыщенного раствора.

Путем травления в кислоте или щелочи можно убрать оксид алюминия или кремния. Прокаливание с последующим травлением позволило авторам [6] синтезировать новые эффективные адсорбенты – нанотрубки  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с нанопористыми стенками и удельной поверхностью  $414 \text{ м}^2/\text{г}$  и  $159 \text{ м}^2/\text{г}$ , соответственно (рис. 3).

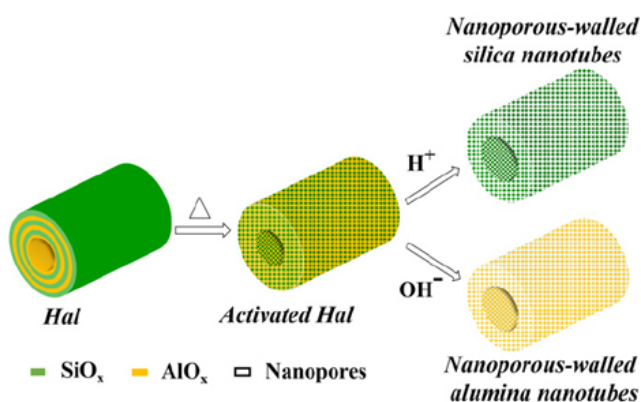


Рис. 3. Формирование нанопор в стенках ГНТ нанотрубок при активировании (прокаливании) и последующий синтез  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  нанотрубок с нанопористыми стенками [6]. Hal – галлуазит.

Обработка кислотой также способствует увеличению объема внутреннего просвета без изменения внешнего диаметра. Такие нанотрубки можно использовать как контейнеры повышенной емкости. Уникальные свойства поверхности позволяют проводить селективную модификацию внутреннего пространства или внешней части, т.к. одни соединения образуют ковалентную связь с оксидами алюминия, другие – с оксидами кремния. Можно также использовать электростатическую адсорбцию отрицательно заряженных компонентов внутри ГНТ, а положительно заряженных – на внешней поверхности (рис. 2, в центре) [3].

Авторы [3] совместно с коллегами из США, Китая, Италии показали, что нанотрубки могут служить эффективными контейнерами для хранения, доставки и контролируемого выделения макромолекул, включая лекарства (например, антибиотики), ДНК, белки, ферменты. Заполняют ГНТ из насыщенных растворов (рис. 2, справа). После промывки и сушки заполненные контейнеры в сухом виде можно хранить очень долго, а в воде они медленно выделяют содержимое (обычно за 5-10 ч). Иногда требуется еще больше увеличить длительность выделения препарата или обеспечить его выход в отдаленное время. Для этого ученые предлагают использовать “пробки”, закрывающие отверстия нанотрубок. Способы их создания – окунание в расплавленный полимер, нанесение тонких слоев полимера, формирование диффузионных барьеров из слоев поликатионов/полианионов и др. Заметим, что такие наноконтейнеры с контролируемым медленным (до нескольких месяцев) выделением содержимого полезны не

только для биомедицины. В них можно помещать антикоррозионные и огнезащитные средства. Эксперименты на клеточных культурах и *in vivo* на нематодах (круглых червях) показали, что галлуазит имеет очень низкую токсичность и безопасен вплоть до высоких концентраций  $0.5 \text{ мг/мл}$  культуры [3]. Это биосовместимый материал, и его контакт с живой тканью не вредит организму. Он может быть использован в лекарствах для перорального применения, для лечения ран, заболеваний кожи, в стоматологии и др. Нанотрубки с антибактериальными средствами перспективны для создания костных имплантатов, т.к. обеспечивают длительное выделение препарата. Однако исследователи подчеркивают, что галлуазит не является биоразлагаемым объектом, поэтому его нельзя использовать для внутривенного введения.

Нанотрубки галлуазита находят применение как носители катализаторов. Авторы [3] представили два варианта: можно либо осажждать каталитические наночастицы на поверхность нанотрубок, либо синтезировать из перкурсоров внутри в виде наностержней, точно повторяющих форму внутреннего просвета (рис. 4).

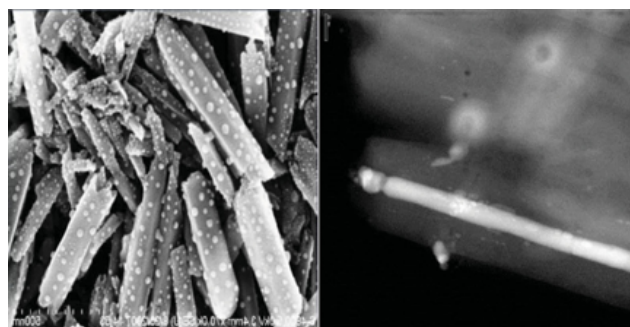


Рис. 4. SEM изображения Ag наночастиц, осажденных на поверхность ГНТ (слева) и Ag наностержней, синтезированного внутри нанотрубки (справа).

Исследователи полагают, что можно создать двухкомпонентную каталитическую систему – нанотрубки, на поверхности которых будет катализатор одного типа, а внутри – другого. ГНТ дешевы, доступны в больших количествах, поэтому могут применяться в крупных установках для переработки нефти.

Много публикаций посвящено нанокомпозитам ГНТ/полимеры. Основные результаты обобщены в обзоре [2]. Можно выделить три главных эффекта от добавления нанотрубок:

- I - улучшение механических свойств, включая прочность на растяжение, ударную вязкость, свойства при изгибе и др.;
- II - повышение термостабильности и огнестойкости нанокомпозита;
- III - ускорение кристаллизации полукристаллических полимеров.

Недавно ученые заинтересовались возможностью использования нанотрубок галлуазита для очистки



воды. Первый обзор на эту тему представили исследователи из Китая и Японии [4]. Рассмотрены нанокompозиты для удаления ионов тяжелых металлов, красителей и органических загрязнителей, а также мембраны для фильтрации воды.

Анализ результатов показал, что для удаления из воды ионы тяжелых металлов Cu(II), Pb(II), Cd(II), Zn(II), Cr(IV), Co(II) особенно эффективны интеркалированные ГНТ. В межслоевое пространство вводят активные молекулы, например диэтанолмин, с которыми связываются ионы металлов. Немодифицированные нанотрубки также можно использовать для удаления ионов тяжелых металлов путем хемосорбции или физической сорбции. Они менее эффективны (< 10 мг/г по сравнению с 7-150 мг/г для модифицированных), зато дешевле и не вносят дополнительных загрязнений в окружающую среду.

Благодаря уникальной структуре слоя (отрицательный заряд Si-O-Si на внешней поверхности и положительный заряд Al-OH на внутренней) природные ГНТ способны удалять из сточных вод как катионные, так и анионные красители (средняя ёмкость 26-113 мг/г). Эффективность очистки можно повысить, используя совместное действие адсорбции и магнитной сепарации (нанокompозиты ГНТ/наночастицы Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или совместное действие адсорбции и фотодеградациии (нанокompозиты ГНТ/TiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>).

Результаты исследований показали, что добавление ГНТ повышает прочность, термостабильность и улучшает разделительные свойства полимерных мембран разного типа (мембран для фильтрации, для обратного и прямого осмоса, мембранных реакторов и др.). Гидрофильность природных нанотрубок, наличие внутреннего просвета и образование пор на поверхности раздела ГНТ/полимер повышают производительность мембран. Дополнительное модифицирование нанотрубок наночастицами серебра придает антибактериальные свойства [4] (рис. 5).

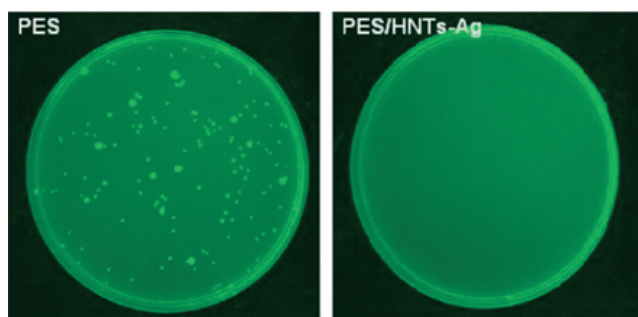


Рис. 5. Культура бактерий *E. coli* на мембранном фильтре из полиэфирсульфона (слева) и на фильтре из полиэфирсульфона с добавлением нанотрубок галлуазита, модифицированных наночастицами Ag (справа)

В заключение еще об одном интересном применении нанотрубок галлуазита – для создания формоустойчивых материалов с фазовым переходом

(МФП) для аккумулирования тепловой энергии [3,7,8]. МФП используют в стеновых панелях (они поглощают излишнее тепло в дневное время и отдают в ночное), в системах теплозащиты (в том числе космических аппаратов), для хранения пищевых и медицинских продуктов и др. В интервале температур до 100°C чаще всего применяют парафины. Они химически инертны, не вредны для здоровья, стабильны. Однако парафины не сохраняют форму при плавлении, их необходимо помещать в капсулы или специальный контейнер. Исследования показали, что эту проблему можно решить путем добавления к парафинам нанотрубок галлуазита (рис. 6).

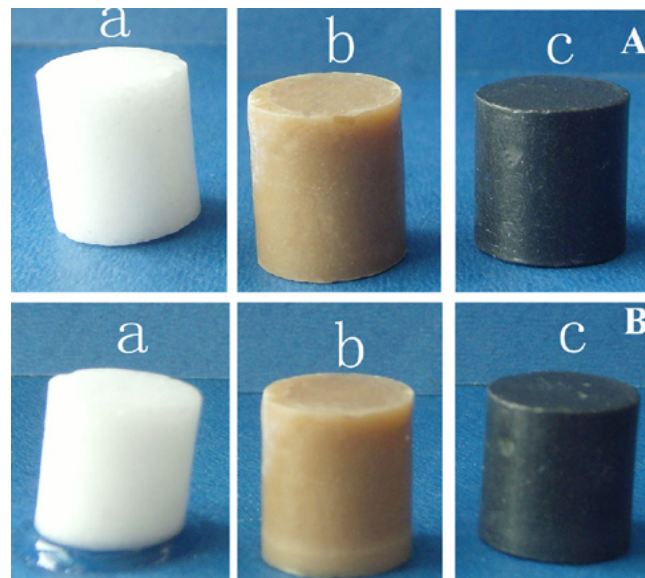


Рис. 6. Фотографии чистого парафина (а), композита парафин/ГНТ (b) и композита парафин/ГНТ с добавлением графита (с) при комнатной температуре (А) и после нагрева до 70°C (В) [7].

Новый МФП, нанокompозит парафин/ГНТ, сохраняет форму в течение многих циклов плавления-затвердевания. Другой недостаток парафинов – низкий коэффициент теплопроводности – можно устранить путем добавления в нанокompозит графита или углеродных нанотрубок.

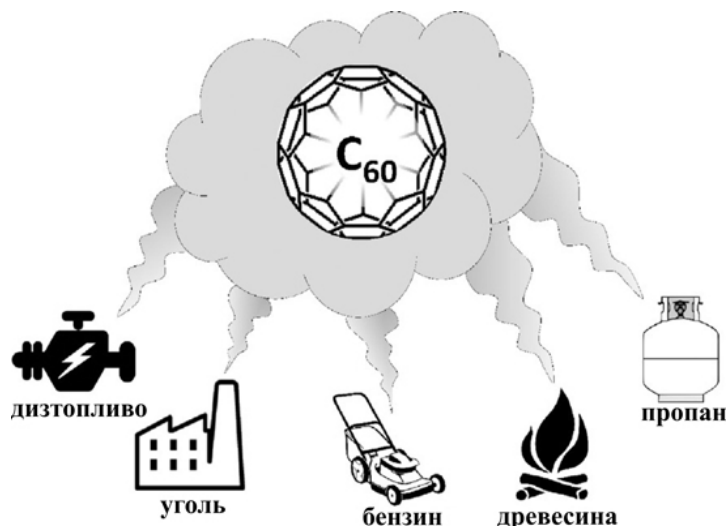
О.Алексеева

1. *ПерсТ II, вып. 5, с.3 (2004).*
2. P.Yuan et al., *Appl. Clay Sci.* **112–113**, 75 (2015).
3. Yu.Lvov et al., *Adv. Mater.* **28**, 1227 (2016).
4. L.Yu et al., *Environ. Sci. Nano* **3**, 28 (2016).
5. <http://rosgeo.com/ru/> (2016).
6. Z.Shu et al., *Appl. Clay Sci.* **112–113**, 17 (2015).
7. J.Zhang et al., *Solar Energy* **86**, 1142 (2012).
8. W.Liang et al., *RSC Adv.* **6**, 19669 (2016).

### Фуллерены выхлопных труб

Все чаще на страницах научной периодики появляются публикации, посвященные нанотехнологической безопасности окружающей среды, а именно, ограждению последней от возможных последствий негативного влияния, так называемой нанотехноло-

гической революции, которая, по мнению некоторых исследователей, уже давно идет полным ходом. Не желая отставать от сложившегося тренда, авторы работы [1] решили оценить потенциальные риски, связанные с выбросом в атмосферу фуллеренов  $C_{60}$  вместе с многочисленными продуктами горения широко распространенных топлив. Под распространенными в статье понимаются всего лишь пять



знакомых каждому энергоносителей: дизтопливо, уголь, бензин, древесина и пропан (см. рис.).

Источники выброса фуллеренов  $C_{60}$  в окружающую среду

Источниками выхлопных газов стали, соответственно, дизельный генератор, угольная электростанция, газонокосилка с бензиновым двигателем, костер, сложенный из древесины лиственных пород, и газовый гриль. Забегая вперед, скажем, что фуллерены были обнаружены в продуктах горения всех пяти. Однако авторы поставили перед собой задачу не просто отыскать фуллерены во всевозможных вредных отходах, но и представить общую картину распространенности искусственно выбрасываемых в окружающую среду  $C_{60}$ . Итак, наиболее высокая их концентрация была обнаружена в продуктах горения дизельного топлива и угля. В целом же содержание  $C_{60}$  в выхлопе сильно зависит от исходного образца. Диапазон, указанный авторами, оказался достаточно широким: от  $10^{-2}$  до  $10^3$  нг/м<sup>3</sup>. С помощью просвечивающей электронной микроскопии авторы попытались проследить закономерности между геометрическими характеристиками продуктов горения – графитовых чешуек и концентрацией  $C_{60}$ . Гипотеза исследователей состояла в том, что по

расстоянию между чешуйками и их кривизне можно однозначно определить выход фуллеренов. Однако это предположение не подтвердилось. В то время, как содержание  $C_{60}$  изменяется на пять порядков величины в зависимости от исходных веществ, геометрические характеристики продуктов горения значительных изменений не претерпевают, оставаясь практически одинаковыми для топлив с низким (древесина, пропан) и высоким (уголь, дизтопливо) выходом фуллеренов. В результате авторы оценивают мировые выбросы  $C_{60}$  в атмосферу от сжигания угля и дизтоплива в зависимости от условий горения от 1.6 до 6.3 тонн в год, что сравнимо с ежегодным промышленным синтезом фуллеренов. То есть, если пофантазировать, то грамотный отвод выхлопных газов с каждой трубы позволит не просто оградить окружающую среду от “вредных” бакиболов, но и вдвое увеличить их производство.

М. Маслов

1. A.J.Tiwari et al., *Sci. Total Environ.* 547, 254 (2016).

## КОНФЕРЕНЦИИ

**Первая российская конференция  
“Физика - наукам о жизни”,  
12-16 сентября 2016,  
г. Санкт Петербург  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)**



Конференция посвящена междисциплинарным исследованиям на стыке физики, биологии и медицины.

### Секции:

1. Физические подходы и проблемы интерпретации данных в науках о жизни
2. Разработка технологий, диагностик и функциональных материалов и структур
3. Разработка приборов и устройств для практических применений

В ходе конференции проводится Школа молодых ученых, программу которой составят обзорные лекции по наиболее актуальным проблемам взаимодействия физики и наук о жизни. Запланировано проведение выставок и презентаций современного оборудования для исследований.

Исследователи, желающие принять участие в конференции, могут зарегистрироваться и прислать тезисы через сайт <http://www.ioffe.ru/PhLS2016/>

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

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto:ichugueva@yandex.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О. Алексеева, А. Гаврилюк,

И. Любутин, М. Маслов, Л. Опенов, И. Троян

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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