

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Органику с серой удалось добавить до сверхпроводимости при почти комнатной температуре

Как мы уже писали в ПерстТе [1], рекорды по достижению всё более высокотемпературной сверхпроводимости связаны в последнее время с исследованием водородосодержащих соединений при высоких давлениях. Существенным успехом на этом пути было обнаружение сверхпроводимости в сероводороде с $T_c = 203$ К при давлении 150 ГПа [2] в 2015 г. А в 2019 г. Для LaH_{10} с так называемой клатратной структурой, в которой каждый атом лантана находится в "клетке" из 10 атомов водорода, сразу две экспериментальные группы сообщили, что при давлениях от 120 до 185 ГПа T_c у него лежит в интервале 250–260 К [3, 4].

И вот новый рекорд. Исследователи из Univ. of Rochester и Univ. Nevada, Las Vegas (США) достигли сверхпроводимости при комнатной (287.7 К) температуре и давлении в 267 ГПа [5]. Комната эта, правда, довольно прохладная (около 15°C), да и давление запредельное, но все равно прогресс налицо. Все это сразу вызвало бурю откликов и активные обсуждения в научной и околонаучной прессе.

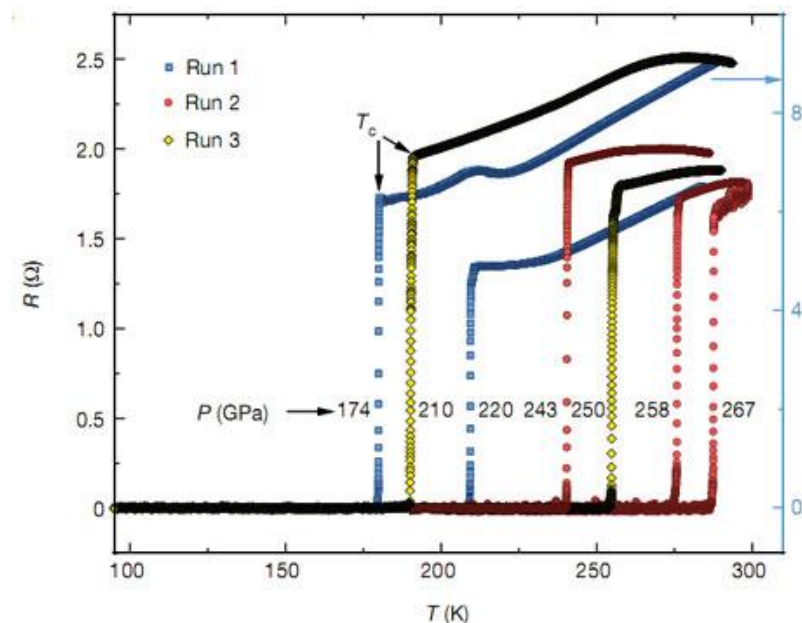


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления при разных значениях давления.

Авторы работы [5] поместили некоторую смесь углерода, водорода и серы в микроскопическую полость (реально смешивались метан, сероводород и молекулярный водород), сжимаемую алмазными наковальнями. С помощью лазерного

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

2 Муаровый узор алмазов

4 Размер наночастиц золота определяет их воздействие на клеточную мембрану

СПИНТРОНИКА

4 Спиновая структура хирального кристалла или ежик в зазеркалье

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

6 Ещё один повод накрасить губы

ТОРЖЕСТВО

7 Нобелевская премия 2020

облучения они инициировали фотохимическую реакцию в смеси и могли наблюдать кристаллизацию материала, а при понижении температуры и повышении давления исследователи обнаружили падение электросопротивления до нуля (см. рис. 1).

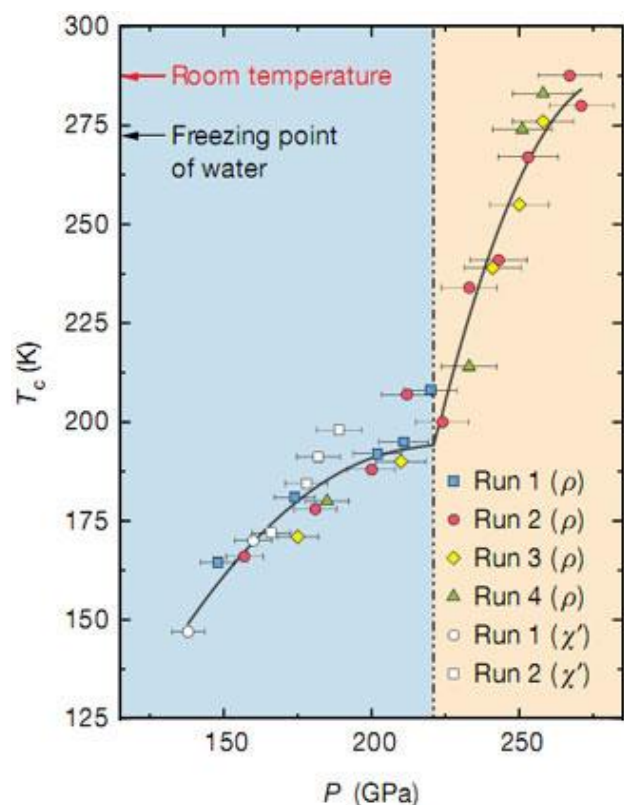


Рис. 2. Зависимость температуры сверхпроводящего перехода от давления.

Сверхпроводимость наблюдалась, начиная с давления примерно в 140 ГПа и с T_c около 150 К, затем T_c сравнительно медленно увеличивалась с давлением, а начиная примерно со 190 ГПа, наблюдался резкий рост T_c (см. рис. 2). Наличие сверхпроводимости было подтверждено и по измерениям магнитной восприимчивости: система демонстрировала хорошо выраженный эффект Мейснера. T_c , естественно, падала с ростом магнитного поля, и оценки верхнего критического поля при нулевой температуре, выполненное в рамках теории Гинзбурга–Ландау, давали значение равно примерно 62 Тл.

К сожалению, авторам не удалось снять надёжные рентгенограммы полученного материала, но рамановские спектры дают некоторое представление об его структуре. Однако более надежные данные о структуре и фазовом составе были получены только до металлизации исследуемого материала. Структуру же

сверхпроводящей фазы еще предстоит разгадать.

Судя по поступающим откликам специалистов на эту работу, тройная система углерод-водород-сера является весьма перспективной в смысле поиска новых сверхпроводников. Что же, будем следить за развитием событий.

1. [ПерсТ 26, в.17/18, с. 1 \(2019\).](#)
2. A.P.Drozhdov et al., *Nature* **525**, 73 (2015).
3. M.Somayazulu et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 027001 (2019).
4. A.P.Drozhdov et al., *Nature* **569**, 528 (2019).
5. E.Snider et al., *Nature* **586**, 373 (2020).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

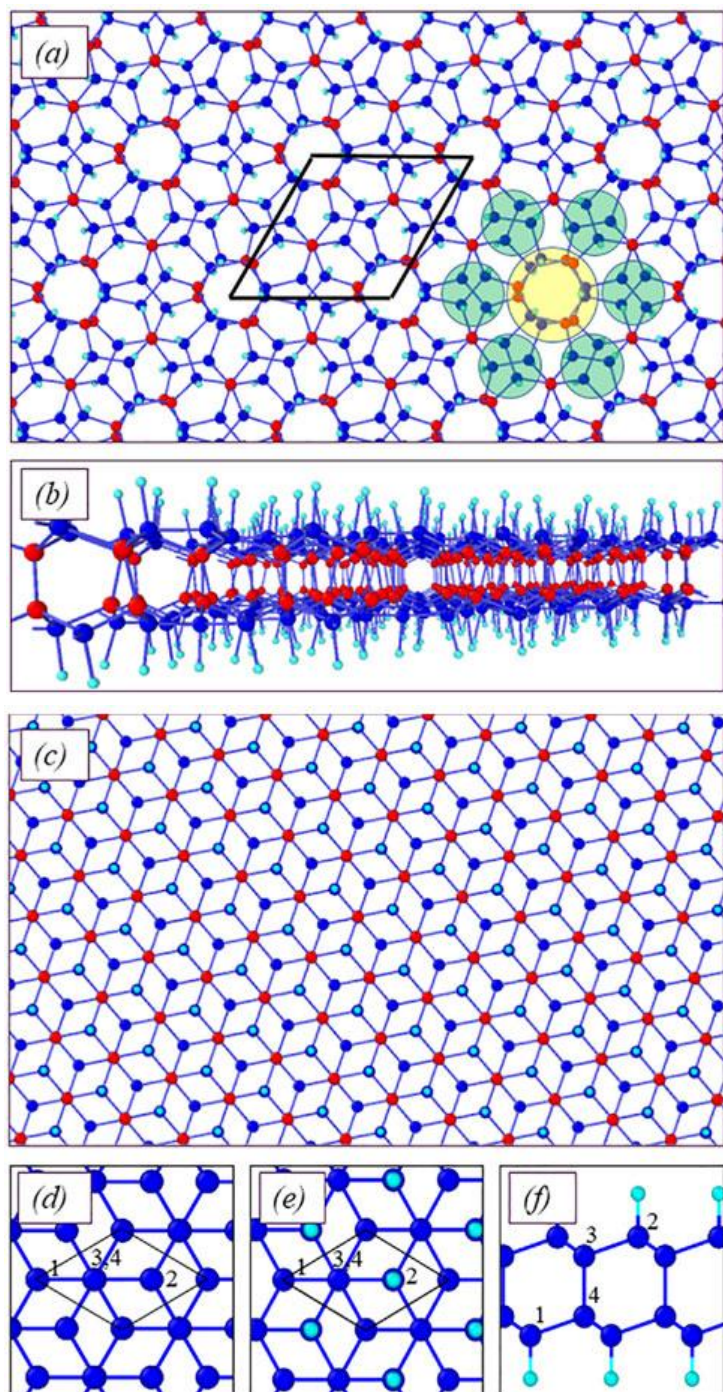
Муаровый узор алмазов

Классический алмаз, впервые предсказанный в 2009 году, представляет собой структуру типа C_2H на основе биграфена, в которой, как и в графене, каждый углеродный атом sp^3 -гибридизирован [1]. Причем в слое графена атомы углерода одной из двух его атомных подрешеток, ковалентно связаны с атомами водорода, а другой – с углеродными атомами соседнего слоя (см. рис.).

Получается, что фактически алмаз – это “пленка” алмаза нанометровой толщины. В работе [2] исследователи из Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН и МИФИ с помощью теории функционала плотности определили электронную структуру и предсказали рамановские и ИК-спектры новых алмазоподобных наноматериалов, производных алмаза, которые получили название муаровых или скрученных алмазов. Скрученные алмазы (см. рис.) построены на основе гидрированных ($Dn_{21.8}$) или фторированных ($F-Dn_{21.8}$) двухслойных графенов, в которых поворот слоев друг относительно друга вместе с ковалентным связыванием приводит к формированию красивого муарового узора.

Такая структура бислоя существенно отличается от традиционной компоновки AA или AB в биграфене, что, конечно, определяет уникальные свойства муаровых алмазов. Расчеты авторы выполняли в программе Quantum ESPRESSO в приближении локальной плотности с использованием функционала PW и сохраняющих норму псевдопотенциалов. Они рассмотрели характеристики систем с наиболее простой элементарной ячейкой, характерной для материалов, у которых слои повернуты

друг относительно друга на угол величиной в $\theta = 21.8^\circ$ (см. рис.).



Атомные структуры скрученного диаманта Dn21.8 (*a* – вид сверху, *b* – вид сбоку) и традиционный диамант с АВ-упаковкой (*c*). Красные и синие шары соответствуют атомам углерода, которые образуют и не образуют межслоевые связи, соответственно. Маленькие бирюзовые шарики соответствуют атомам водорода или фтора. Сплошная черная линия ограничивает элементарную ячейку. Зеленые кружки обозначают «Х»-пересечения связей С–С в разных слоях. Для каждой наноструктуры представлены виды сверху и сбоку. Вид сверху двухслойного графена (*d*), который трансформируется в диамант (*e* – вид сверху, *f* – вид сбоку) после гидрирования/фторирования и межслоевого ковалентного связывания.

ПерсТ, 2020, том 27, выпуск 19/20

Такой угол соответствует элементарным ячейкам, включающим двадцать восемь атомов углерода и восемнадцать атомов водорода или фтора. Анализ плотности электронных состояний и зонной структуры показал, что ширина запрещенной зоны составляет более 4 эВ и превышает величину, характерную для традиционных алмазов. Наличие большого числа узких пиков на плотности электронных состояний, по мнению авторов, связано с уплощенными минизонами, что открывает перспективы применения муаровых алмазов в оптических и оптоэлектронных устройствах. Для идентификации наносистем Dn21.8 и F-Dn21.8 авторы предлагают ориентироваться на их спектральные особенности.

К слову, рамановские и ИК-спектры для гидрированных и фторированных муаровых алмазов оказались схожими. Однако, относительно традиционных АА или АВ-упакованных алмазов наиболее активные рамановские частоты этих муаровых структур смещены в синий диапазон спектра. Кроме того, в отличие от алмазов с АА и АВ упаковкой, скрученные алмазы способны взаимодействовать со светом, поляризованным параллельно плоскости пленки.

Авторы полагают, что муаровые алмазы расширят диапазон характеристик и применимость доступных в настоящее время углеродных наноматериалов. По их мнению, дальнейшие исследования могут также подтвердить их уникальные сверхтвердые механические свойства. Исследователи уверены, что рассмотренные в работе [2] особенности должны сохраниться для всех скрученных алмазов. Кроме того, при их производстве останется возможность тонкой подстройки электронных характеристик муаровых алмазов с помощью изменения угла θ . Таким образом, сочетание всех этих уникальных свойств делает скрученные алмазы перспективным материалом для электронных, химических и оптических приложений.

М. Маслов

1. [ПерсТ 16, вып. 15/16, с. 3 \(2009\).](#)
2. *L.A. Chernozatonskii et al., Appl. Surf. Sci. 537, 148011 (2021).*

Размер наночастиц золота определяет их воздействие на клеточную мембрану

Наночастицы золота широко используют при разработке новых материалов, приборов и устройств; применяют в пищевой промышленности, сельском хозяйстве, косметологии. Благодаря уникальным физическим и химическим свойствам, доступным методам синтеза и функционализации наночастицы золота чрезвычайно важны для биомедицины (диагностика, фототермическая и фотодинамическая терапии, целевая доставка лекарств [1]). Конечно, и исследователей, и технологов, и потребителей волнуют вопросы возможной токсичности этих перспективных наноматериалов. Изучать их воздействие на живой организм очень сложно, т.к. оно зависит и от размеров, и от формы, и от функционализации наночастиц. Ключевым является взаимодействие с фосфолипидной клеточной мембраной. Наночастицы могут незначительно деформировать мембрану, присоединившись к ней снаружи, а могут вызвать серьезные повреждения и проникнуть внутрь клетки. Английские исследователи решили проверить влияние одного из важных параметров – размера [2]. В экспериментах использовали “чистые”, без какой-либо функционализации, наночастицы золота в диапазоне размеров 5-60 нм (5, 10, 25, 35 и 60 нм). Для имитации живых клеток синтезировали липосомы диаметром 180 нм. Эти пузырьки широко применяют в научных исследованиях, т.к. их стенки состоят из липидных бислоев, по составу близких к клеточным мембранам. Исследования проводили с помощью методов динамического светорассеивания, электронной микроскопии и криоэлектронной микроскопии. Также были сделаны оценки на основе теории упругости. В целом, используя простую модельную систему, авторы показали, что воздействие на мембрану сильно зависит от размера наночастиц (рис. 1).

В случае мелких наночастиц (5-10 нм) происходит их агрегация, обволакивание агрегатов мембраной (“обёртывание”) с образованием глубоких каналов и проникновение отдельных наночастиц золота внутрь. Наночастицы среднего размера (25-35 нм) частично обёртываются мембраной, вызывая небольшой изгиб. Для крупных наночастиц наблюдаются лишь отдельные случаи присоединения наночастиц золота к мембране. Таким образом, у наночастиц размером до 10 нм больше возможностей проникнуть внутрь мембраны. Это важно для

оценки токсичности наноматериалов, используемых в медицине. С другой стороны, эффект проникновения в мембрану мелких наночастиц золота можно использовать для создания эффективных систем доставки лекарств и препаратов.

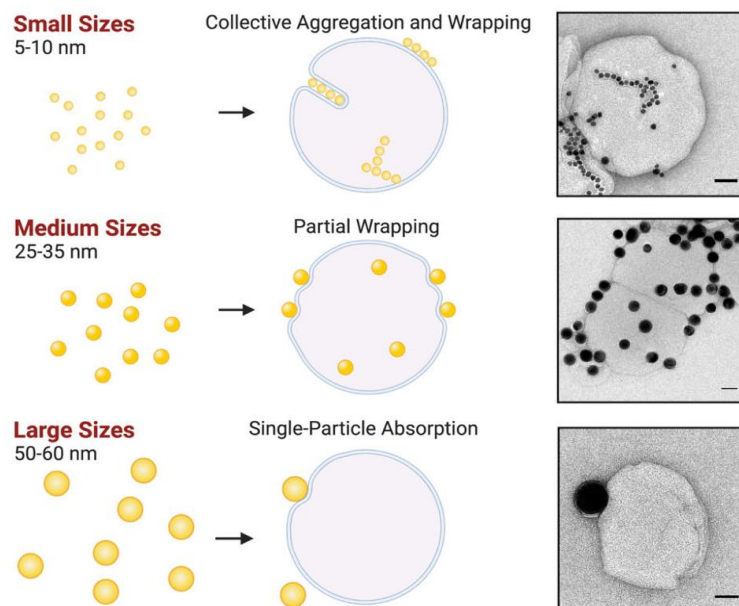


Рис. 1. Схематическое представление взаимодействия наночастиц разного размера с модельной липидной мембраной. Справа – соответствующие ТЕМ изображения для наночастиц размером 10, 35 и 60 нм. Шкала 50 нм.

О. Алексеева

1. П.Б.Курапов и др., *Вестник РГМУ №6*, с.86 (2018).

2. С.Contini et al., *Commun Chem* 3, 130 (2020).

СПИНТРОНИКА

Спиновая структура хирального кристалла или ежик в зазеркалье

Говорят, что спинтроника, в отличие от обыкновенной электроники, оперирует не зарядом, а дополнительной степенью свободы электрона – спином. Однако мало кто замечает ироничность данной формулировки, ведь эта “дополнительная степень свободы” становится тем самым поводом, с помощью которого и можно управлять движением электрона (интересно, почему, после написания этих строчек взгляд невольно обращается к мобильному телефону?). Так и возникают в научной литературе сюжеты, в которых, за счет спин-орбитальной связи, на направление движения электрона налагаются ограничения,

связанные с ориентацией его спина. Известно, что подобная ситуация реализуется в топологических изоляторах, а теперь очередь дошла и до простых полупроводников, таких как элементарный теллур [1].

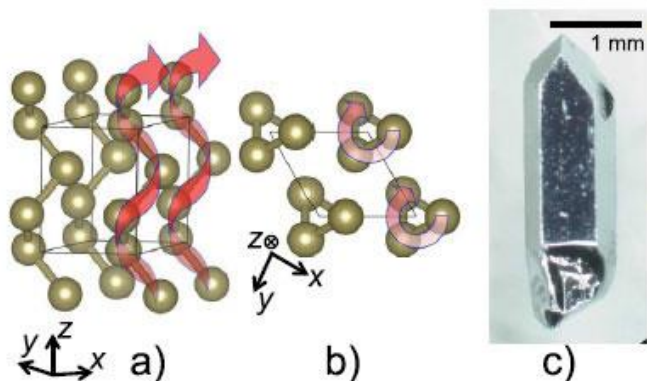


Рис. 1. Цепочки атомов в кристалле теллура а) и б) вид с разных позиций с) монокристалл теллура

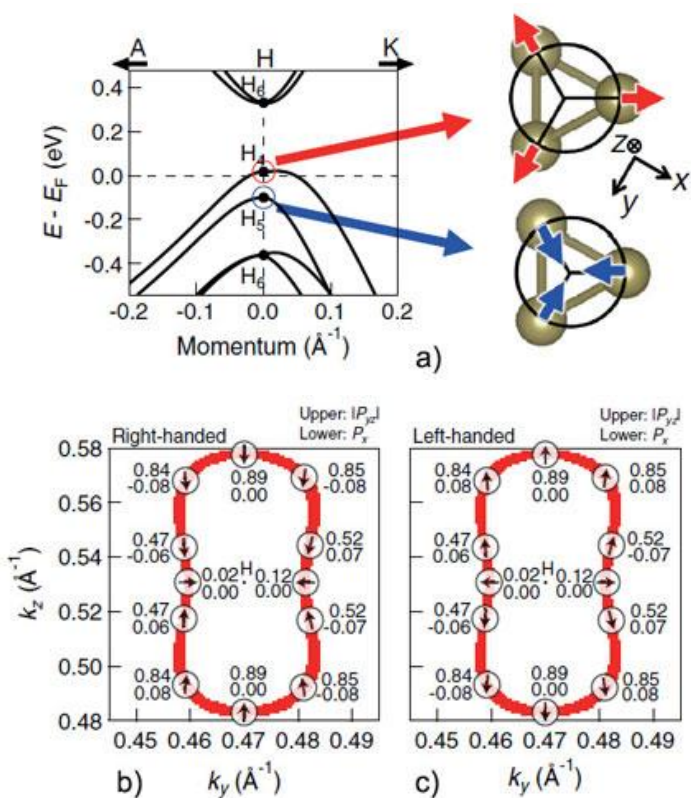


Рис. 2. Электронные состояния и спины в теллуре: а) - дисперсия электронных состояний: двум экстремумам H_4 H_5 соответствуют различные магнитные конфигурации спинов в цепочках; б) - конфигурация спинов на поверхности Ферми на уровне Ферми вблизи точки H_4 ; с) - та же конфигурация для энантиоморфа.

При химической простоте кристалл теллура имеет затейливую кристаллическую структуру – в форме спиралевидных атомных цепочек вдоль главной оси кристалла, которые суще-

ствуют в двух модификациях: правой и левой, отличающихся направлением закрученности спирали (рис. 1а,б). Нарушение зеркальной симметрии приводит к потере центра инверсии в кристалле, благодаря чему, а также большому порядковому номеру элемента, в нем ярко выражено спиновое расщепление за счет спин-орбитального взаимодействия: для одной из магнитных конфигураций спинов в цепочке потолок валентной зоны оказывается выше уровня Ферми (рис. 2а).

Японские ученые исследовали с помощью фотоэмиссионной спектроскопии со спиновым и угловым разрешением (SARPES) поверхность Ферми материала (рис. 1б,с) [1]. Ориентация спина меняется в различных точках поверхности, что означает привязку к спину направления движения электрона и пониженную вероятность его рассеяния на дефектах: изменение направления движения означало бы также изменение ориентации его спина, а такое, в силу сохранения момента количества движения, невозможно (точнее возможно только, если дефект является магнитным ионом).

Уровень Ферми находится на расстоянии всего 20 мэВ от потолка валентной зоны, поэтому небольшое легирование донорной примесью поднимет уровень Ферми так, что поверхность Ферми сожмется в точку, а распределение спинов в этой точке, соответствующей потолку валентной зоны H_4 , станет радиально симметричной конфигурацией сходящихся в точку спинов. Таким образом, можно сказать, что японские ученые наблюдают что-то вроде монополя в импульсном пространстве. Интересно, что для кристалла, являющегося зеркальным двойником (энантиоморфом) к данному, картина распределения спинов на поверхности Ферми инвертируется, и будет похожа на ошестинившегося ежа.

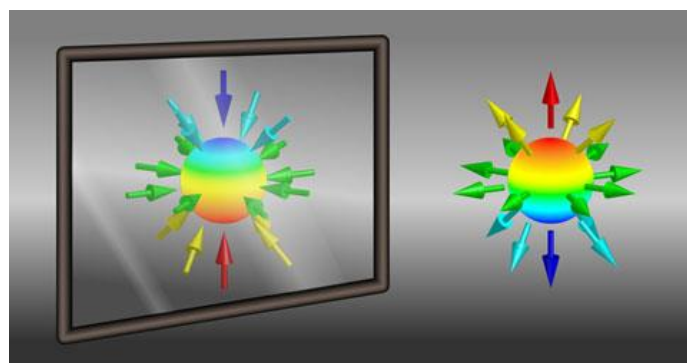


Рис. 3. Структура из радиально расположенных спинов при зеркальном отражении преобразуется также в радиальную с другим знаком “заряда” [2].

Так и должно быть при зеркальном преобразовании аксиальных векторов, к которым относится спин. При отражении в зеркале параллельные зеркальной плоскости компоненты аксиального вектора меняют знак, а перпендикулярные сохраняются. В результате зазеркальным собратом радиально-симметричной структуры в форме ежа является конфигурация из сходящихся к центру стрелок (рис. 3).

Обнаруженная необычная “спиновая текстура” как называют ее авторы [1], должна играть в спинтронике ту же роль, что и электронная структура в электронике обычной. Так, управление положением уровня Ферми не только меняет тип проводимости в материале, но и переключает его из спин-поляризованной фазы в вырожденное по спину состояние [2].

А. Пятаков

1. *M.Sakano et al., Phys. Rev. Lett. 124, 136404 (2020).*

2. *J.Hugo Dil, Physics 13, 45(2020).*

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

Ещё один повод нарисовать губы

Распространение коронавируса в мире подстегивает не только медицинские исследования – поиск вакцин и лекарств – но и изучение физических механизмов распространения вирусов. Многие до сих пор считают, что заражение передается только при чихании, но мало кто знает о том, что и при обычной речи изо рта человека вылетают микроскопические капельки слюны, которые не видны невооруженным глазом, но могут стать переносчиком болезни.

Механизмам образования этих капелек и была посвящена недавняя работа французских и американских исследователей, опубликованная в журнале *PhysRevFluids* [1].

Человек в течение некоторого времени произносил слоги из согласных, относящихся к разным группам по месту и способу образования. Капли, образованные в процессе речи, попадали на лазерный экран, находящийся на некотором расстоянии от говорящего. Капельки рассеивали лазерный свет, это рассеяние регистрировали высокоскоростной камерой, и по обработанным изображениям рассчитывали количество капель в зависимости от времени. Также проводилась высокоскоростная съемка самих органов речи говорящего, чтобы визуализировать процесс образования микроскопических капель слюны.

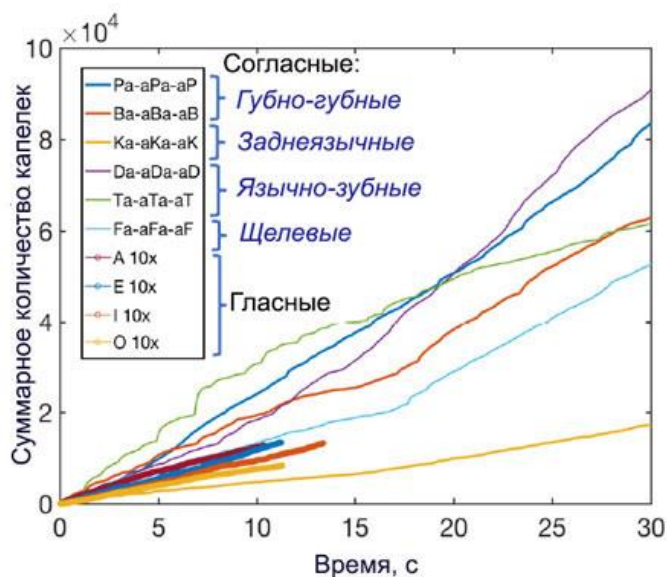


Рис. 1. Суммарное количество капель, зарегистрированных при произнесении различных звуков – согласных и гласных – в зависимости от времени

На рис. 1 приведены экспериментальные результаты – количество капель в зависимости от времени при произнесении слогов с согласными П, Б, К, Д, Т, Ф и гласных – А, Е, И, О. Оказалось, что слоги с П, Б, Т и Д производят больше всего капелек, причем облако капель от “П” направлено вперед, перпендикулярно говорящему, а от “Т” – вниз, под углом около 50 градусов к горизонтали.

Механизмы образования капель были также исследованы в данной работе. В приложении к статье есть видеоматериалы, показывающие, что вначале, когда открываются губы, образуется тоненькая нить слюны, которая затем деформируется и уносится воздушным потоком, разбиваясь в процессе на маленькие капельки. Эти материалы находятся в открытом доступе по ссылке <https://journals.aps.org/prfluids/abstract/10.1103/PhysRevFluids.5.102301#supplemental>.

В условиях распространения инфекций важно знать не только механизм образования капелек, но и пути подавления этого процесса. Безусловно, медицинская маска не будет пропускать эти капли, но авторами [1] был предложен еще один вариант. Оказывается, что если губы смазать бальзамом для губ, то его вязкость препятствует образованию нитей из слюны, и капелек, вылетающих при речи, будет существенно меньше. На рис. 2 приведены экспериментальные результаты по количеству капель, вылетающих при произнесении слога “Па” сухими и смазанными губами. Получается, что

смазка уменьшает количество капель почти до уровня фоновых отсчетов, снятых в условиях тишины.

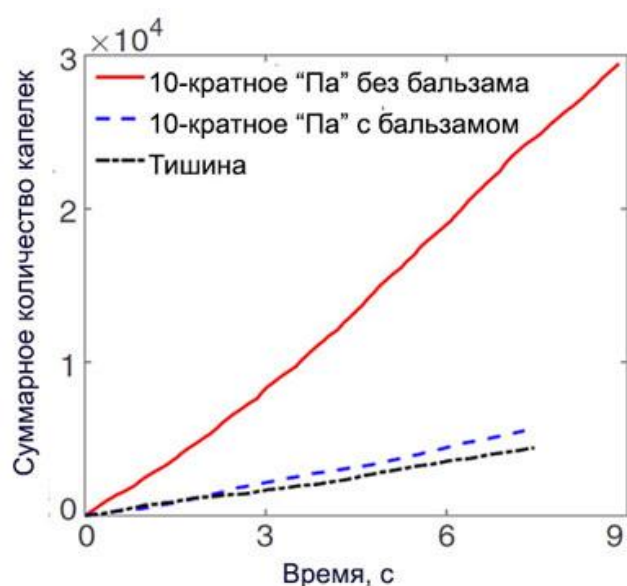


Рис. 2. Суммарное количество капель, вылетающих при произнесении слога "па" сухими губами, губами, смазанными бальзамом, и фоновые отсчеты в условиях тишины.

Теперь у нас есть еще один повод накрасить или просто смазать губы. Но конечно, надевать маски в общественных местах всё равно необходимо, так как путей распространения вируса очень много, и не все они ещё изучены. Будьте здоровы!

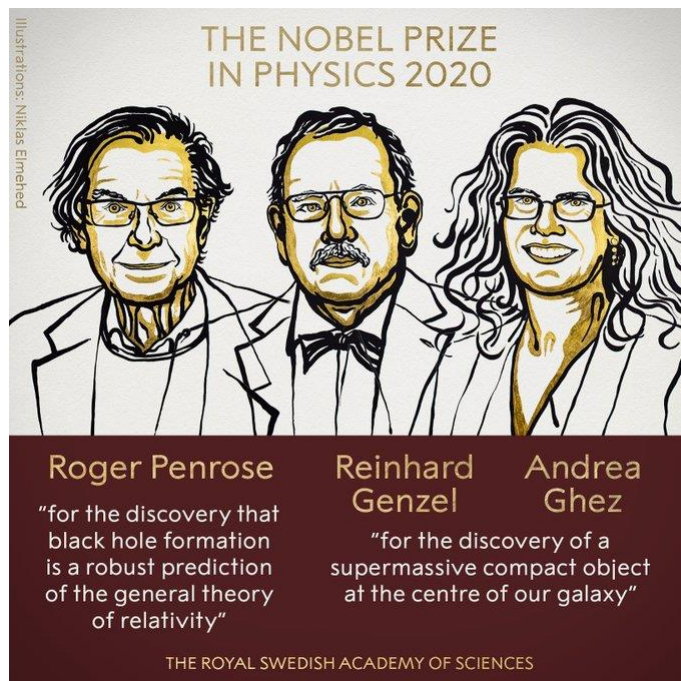
З. Пятакова

1. M.Abkarian and H.A.Stone, *Phys. Rev. Fluids* 5, 102301(R) (2020).

ТОРЖЕСТВО

Нобелевская премия 2020

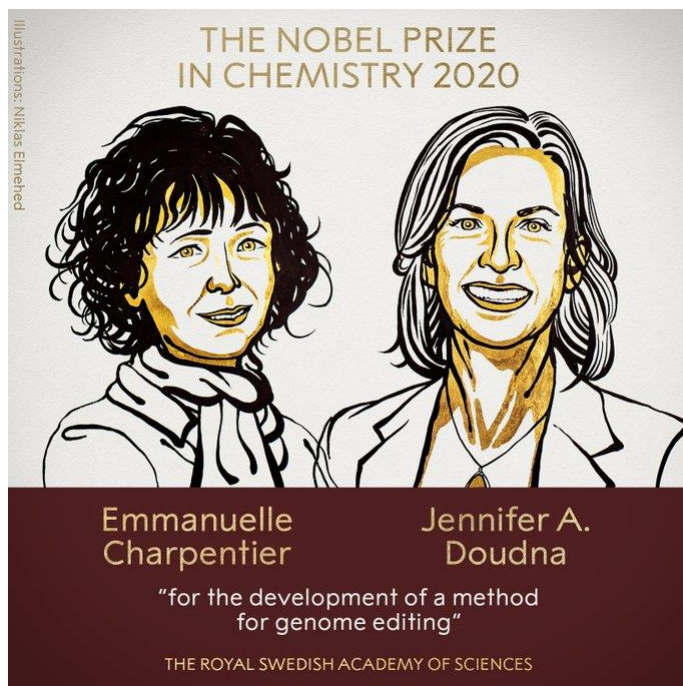
С 5 по 12 октября в Стокгольме прошла 119-я Нобелевская неделя, на которой стали известны имена лауреатов Нобелевской премии в области медицины и физиологии, физики, химии, премии мира и экономики.



Нобелевскую премию по физике присудили за исследования черных дыр Роджеру Пенроузу (Roger Penrose) "за открытие того, что образование черной дыры является надежным предсказанием общей теории относительности", а также Рейнхарду Генцелю (Reinhard Genzel) и Андреа Гез (Andrea Ghez) "за открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей галактики".

Британский физик-математик и философ Роджер Пенроуз (*возглавляет кафедру математики Оксфордского университета*) открыл, что образование черных дыр является следствием общей теории относительности. Нобелевский комитет отмечает, что Пенроуз "изобрел гениальный математический метод для исследования общей теории относительности Эйнштейна". Он показал, что эта теория "приводит к образованию черных дыр – монстров времени и пространства, которые захватывают все, что в них входит".

Немецкий ученый-астрофизик Рейнхард Гензель (*Институт внеземной физики общества Макса Планка*) и американский астроном доктор философии Андреа Гез (*профессор кафедры физики и астрономии в Калифорнийском университете*) обнаружили, что невидимый и чрезвычайно тяжелый объект управляет орбитами звезд в центре нашей галактики. Они пришли к выводу, что единственным объяснением этому может быть сверхмассивная черная дыра.



Премия по химии за 2020 год получили французский учёный-микробиолог (*Институт инфекционной биологии Общества Макса Планка*) Эммануэль Шарпантье (Emmanuelle Charpentier) и американский биохимик и генетик (*Калифорнийский университета в Беркли*) Дженнифер Дудна (Jennifer Doudna) за развитие методов редактирования генома. Они открыли систему CRISPR-Cas9, которая сейчас

широко используется в качестве передового и высокоточного средства внесения изменения в ДНК.

Система CRISPR-Cas9 представляет собой генетические “ножницы”, которые бактерии используют в борьбе с вирусами. С ее помощью ученые изменяют нуклеотидную последовательность ДНК. Белок Cas9 разрезает двойную цепочку на определенном участке гена. Это место (сайт) определяет направляющая РНК (sgРНК), которая связывается со специфическим сайтом узнавания, указывая Cas9, где нужно произвести разрез. Если рядом с разрезом находится отрезок ДНК, то он автоматически встраивается в цепочку.

Д. Дудна и Э. Шарпантье создали очень точный метод редактирования генома CRISPR/Cas9. С его помощью можно изменять гены растений, животных и микроорганизмов, а также создавать новые методики лечения тяжелых заболеваний – например, удалять ВИЧ из зараженных Т-лимфоцитов, лечить диабет, лейкемию, шизофрению и так далее.

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О. Алексеева, М.Маслов, А.Пятаков, З.Пятакова

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64