

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Скейлинг магнетосопротивления в безмедном ВТСП

Во всех семействах как купратных, так и безмедных ВТСП образцы с оптимальным составом (максимальной критической температурой  $T_c$ ) характеризуются строго линейной температурной зависимостью удельного сопротивления  $\rho$  при  $T > T_c$ . Принято считать, что причина линейности  $\rho(T)$  заключается в близости квантовой критической точки (ККТ). Вспомним, что при классических фазовых переходах второго рода сильные флуктуации приводят к отсутствию у системы характерной длины, и поэтому роль масштаба в зависимостях различных термодинамических величин от внешних параметров играет просто-напросто один из этих параметров. Как следствие, та или иная величина зависит от *отношения* двух параметров (а не от каждого из них по отдельности), например, от  $H/(T-T_c)$  – так называемый *скейлинг*. При квантовых фазовых переходах отсутствует не только характерная длина, но еще и характерное время, поэтому идея скейлинга распространяется на динамические величины, например, сопротивление.

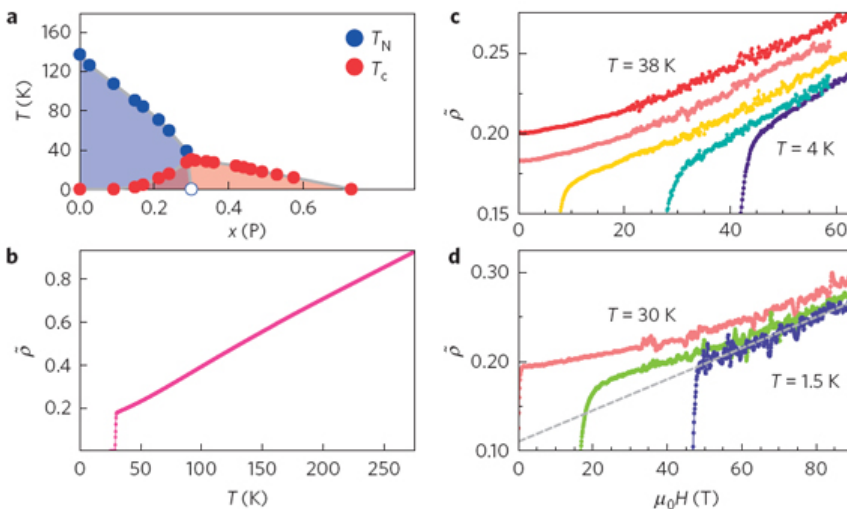


Рис. 1. а - Фазовая диаграмма  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ .  $T_N$  – температура антиферромагнитного перехода.  $T_c$  – температура сверхпроводящего перехода. Антиферромагнитная и сверхпроводящая фазы отмечены синим и красным цветом, соответственно. Кружок – предполагаемая квантовая критическая точка.

б - Температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho$  образца с  $x=0.31$  (нормировка на  $\rho(T=300\text{ K})$ ).

с - Зависимость  $\rho$  того же образца от магнитного поля при  $T = 4\text{ K}, 14\text{ K}, 25\text{ K}, 31\text{ K}$  и  $38\text{ K}$  (снизу вверх).

д - Полевые зависимости  $\rho$  другого образца с  $x=0.31$  при  $T = 1.5\text{ K}, 20\text{ K}$  и  $30\text{ K}$  (снизу вверх).

И далее ...

## ГРАФЕН

- 2 Аномальная динамика графеновых мембран
- 3 Нарушение хирального порядка в графене на медной подложке  
Нанопрослойка воды между графеном и клеткой важна для работы биосенсоров
- 4 Графеновый сенсор для мониторинга диоксида азота в атмосфере

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

- 4 Магнитоэлектрический конструктор

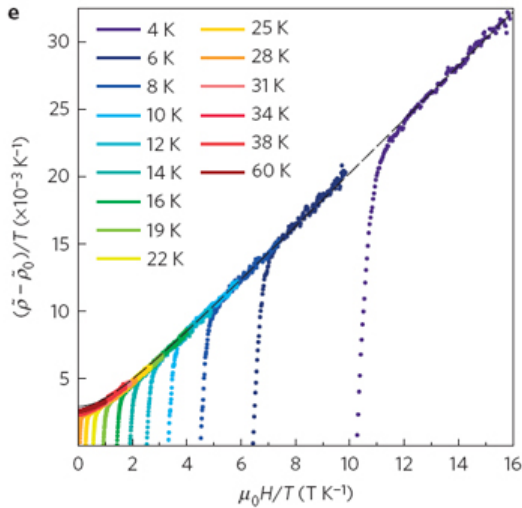
## ТОРЖЕСТВО

- 5 Нобелевскую премию по физике присудили за топологические фазовые переходы

Институту физики им. Л.В. Киренского – 60 лет!

## КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 The ESAS School 2016 on “Novel frontiers in superconducting electronics: from fundamental concepts and advanced materials towards future applications” from 12<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup> December, 2016, will be held at the C.N.R. Research Area in Pozzuoli, Napoli, Italy



е - Скейлинговые зависимости  $\rho$  (за вычетом остаточного удельного сопротивления  $\rho_0$ ) от  $\mu_0 H/T$  при различных температурах ( $x=0.31$ ).

В поисках такого скейлинга авторы работы [1] детально изучили зависимости  $\rho$  монокристаллов  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  от  $T$  и  $H$ . Измерительный ток был направлен параллельно плоскости  $a$ - $b$ , а магнитное поле с  $\mu_0 H \leq 92$  Тл – параллельно оси  $c$ . При  $x = 0$  этот пниктид представляет собой антиферромагнитный металл. Замещение мышьяка фосфором приводит к подавлению антиферромагнетизма и возникновению сверхпроводимости (рис. 1а). Экстраполяция к  $T = 0$  дает для ККТ  $x \approx 0.3$ . Вблизи этого уровня допирования температурная зависимость  $\rho$  при  $T > T_c$  линейна (рис. 1b). Зависимость  $\rho$  от магнитного поля тоже линейна в сильных полях (рис. 1c,d). Анализ показал, что деленная на температуру разность  $\rho$  и остаточного удельного сопротивления  $\rho_0$  является универсальной функцией  $H/T$  (рис. 1e). Авторы полагают, что причина линейности  $\rho$  по  $H$  и по  $T$  одинакова, а именно – рассеяние носителей заряда на критических квантовых флуктуациях вблизи ККТ и, как следствие, скейлинг скорости релаксации носителей по  $H$  и  $T$ .

Л.Опенюв

1. J.M.Hayes et al., *Nature Phys.* **12**, 916 (2016).

## ГРАФЕН

### Аномальная динамика графеновых мембран

Современные модели мембран, основанные на теории упругости и учитывающие стохастические эффекты, предсказывают максвелловское распределение перпендикулярных поверхности локальных скоростей атомов. В работе [1] (США, Иран, Бельгия) методом сканирующей туннельной микроскопии изучена динамика поперечных смещений атомов углерода в мембранах из монослоев графена (рис. 1). Определив зависимость координаты  $z$  того или иного атома от времени, авторы [1] численно рассчитывали скорость этого атома. Выяснилось, что распределение по скоростям гораздо лучше

описывается функцией Коши-Лоренца, чем гауссианом (рис. 2).

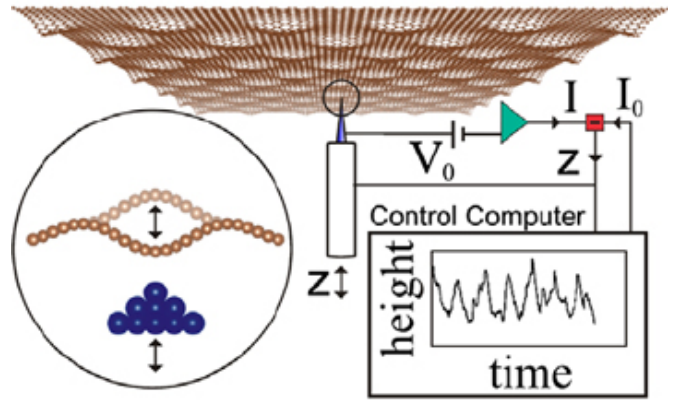


Рис. 1. Схема эксперимента.

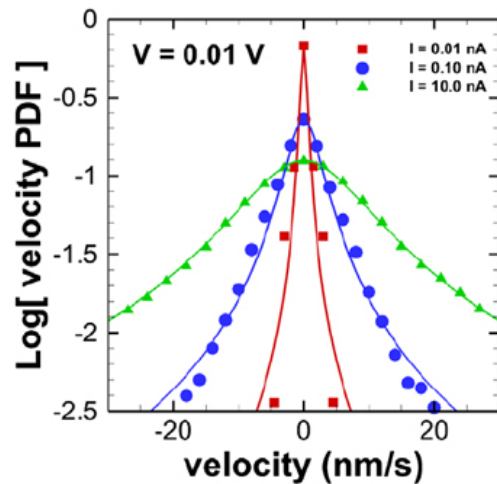


Рис. 2. Функция распределения поперечных скоростей для различных туннельных токов. Символы – эксперимент. Сплошные линии – подгонка под распределение Коши-Лоренца.

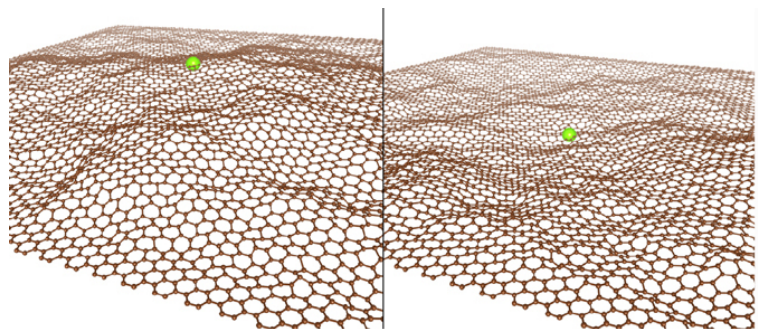


Рис. 3. Изменение кривизны мембраны в процессе моделирования ее поперечных колебаний методом молекулярной динамики.

Моделирование 10000-атомной мембраны методом молекулярной динамики показало, что время от времени кривизна поверхности меняется на противоположную (рис. 3). Это согласуется с экспериментом и свидетельствует о так называемых блужданиях Леви, хорошо известных в теории случайных процессов.

1. M.L.Ackerman et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 126801 (2016).

ПерсТ, 2016, том 23, выпуск 19

## Нарушение хирального порядка в графене на медной подложке

Специфическая кристаллическая и, как следствие, электронная структура графена приводит к тому, что носителями заряда в нем являются безмассовые дираковские фермионы с коническим законом дисперсии, а щель в электронном спектре отсутствует. Для технологических приложений было бы желательно придать этим носителям конечную массу, потому что тогда в спектре графена появилась бы запрещенная зона, и он стал бы полупроводником. В работе [1] показано, что открыть в дираковских точках запрещенную зону можно, если нарушить эффективную хиральную симметрию графена. В графене на медной подложке это достигается за счет искажения связей С–С медными вакансиями, в результате чего формируется волна плотности связей (так называемый порядок Кекуле), которая нарушает симметрию относительно поворота монослоя на угол  $\pi/3$ . Авторы иллюстрируют свои результаты данными сканирующей туннельной микроскопии. Порядок Кекуле сохраняется при комнатной температуре и атмосферном давлении.

По материалам заметки “Heavy going”,  
C.Mudry, *Nature Phys.* **12**, 895 (2016).

1. C.Gutierrez et al., *Nature Phys.* **12**, 950 (2016).

## Нанопрослойка воды между графеном и клеткой важна для работы биосенсоров

Графен и оксид графена всё шире используют в области медицины и биомедицины для создания сенсоров, систем адресной доставки, имплантатов нового поколения [1, 2]. Много работ посвящено вопросам возможной токсичности. Но есть еще одна проблема, на которую меньше обращают внимание – тепловые эффекты на границе раздела графена и биологической ткани, материалов с резко различающимися механическими свойствами. Тепловой барьер может создать помехи в работе наноприборов, из-за перегрева могут погибнуть живые клетки. Прямые эксперименты по изучению теплопередачи в нанобиообъектах провести очень трудно. Ученые из Китая и США использовали компьютерное моделирование методом молекулярной динамики и получили очень интересные результаты [3]. Они выяснили, что нанопрослойка воды между графеном (оксидом графена) и клеткой может обеспечить условия теплопереноса, необходимые для эффективной работы графеновых устройств, в частности, сенсоров. В живом организме везде есть вода, в том числе и на поверхности клеточных мембран. Авторы [3] предложили следующую модельную структуру: монослой графена (оксида графена) и клеточная мембрана (липидный бислой), разделенные небольшой щелью. Структура погружена в воду (рис. 1). Некоторые экспериментальные данные позволяют предположить, что между графеном

и клеточной мембраной удерживается слой воды толщиной несколько нанометров, поэтому исследователи провели расчеты для ширины щели в диапазоне 0-2 нм.

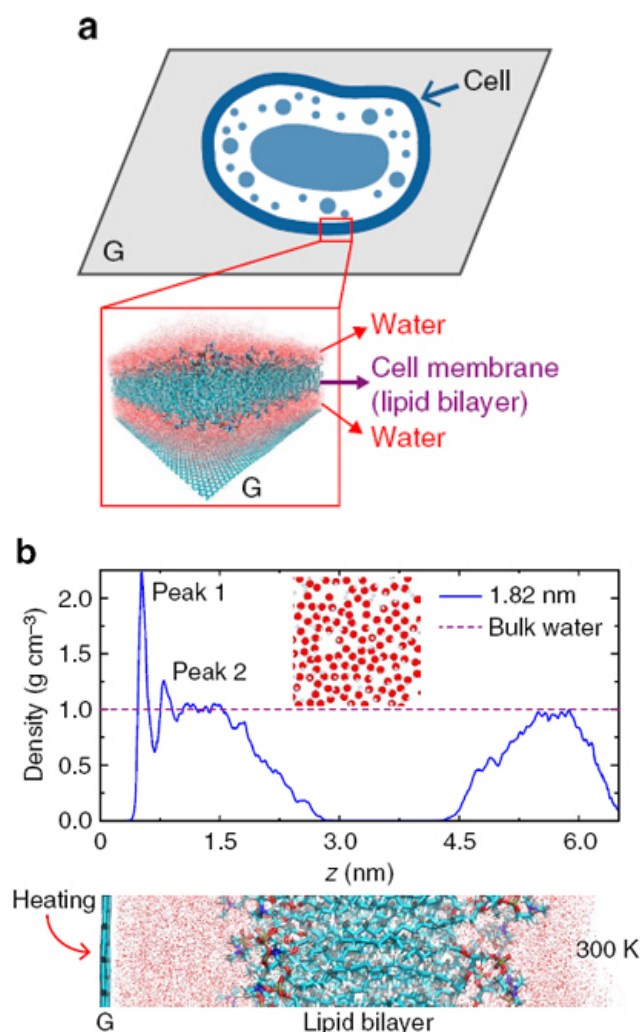


Рис. 1. Модельная система графен (G)-вода-липидный бислой: а - схема модели; б - профиль плотности воды ( $Z=0$  соответствует поверхности графена; расстояние между графеном и липидным слоем 1.82 нм.

Ученые обнаружили, что вблизи поверхности графена ( $\leq 1$  нм) на кривой плотности воды проявляются два четких пика, которые говорят о слоистой структуре воды. Величина плотности в этих пиках (особенно в первом) гораздо выше, чем для обычной, не ограниченной в нанопространстве, воды. Именно эти слои “плотной” воды и регулируют процессы переноса тепла. Авторы [3] выяснили, как меняется количество тепла, переданное от графена клетке в зависимости от толщины водной прослойки и мощности, подводимой к наноприбору. Идеальное расстояние, обеспечивающее структурирование воды и, соответственно, необходимый теплообмен между графеном и клеткой, составляет 1 нм. Рост температуры в липидном бислое в зависимости от мощности для этой толщины слоя воды показан на рис. 2. При небольшой мощности  $\sim 1-2$  ГВт/м<sup>2</sup> температура клеточной мембраны практически не повышается, а при мощности

7.5 ГВт/м<sup>2</sup> нагрев уже составляет 20 градусов, что может быть опасным для здоровых клеток или, наоборот, полезным для уничтожения опухолей. При дальнейшем повышении мощности температура резко растет.

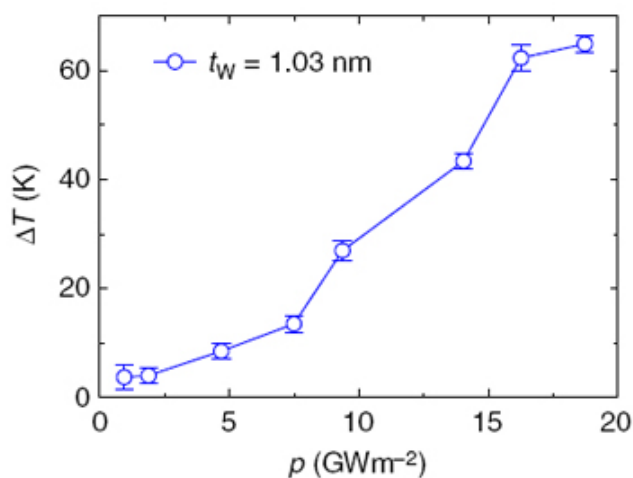


Рис. 2. Рост температуры в липидном бислое при генерации тепла в графене. Критическая мощность 7.5 ГВт/м<sup>2</sup> повышает температуру на 20 градусов. Толщина водной прослойки 1.03 нм.

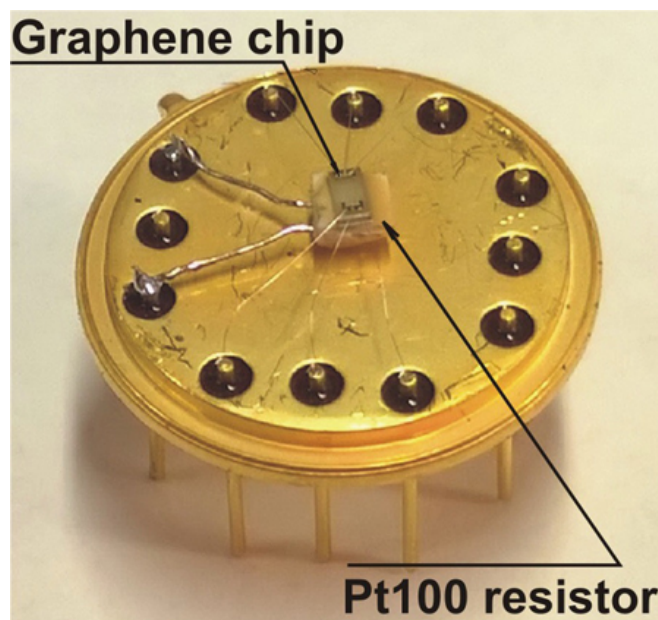
Результаты, полученные в работе [3], важны для разработчиков приборов термотерапии и имплантируемых биомедицинских устройств на основе графена, например, биосенсоров.

*О.Алексеева*

1. [ПерсТ 23, вып. 1/2, с. 3 \(2016\).](#)
2. [ПерсТ 21, вып. 13/14, с. 3 \(2014\).](#)
3. *Y.Wang et al., Nature Commun. 7:12854 (2016).*

### Графеновый сенсор для мониторинга диоксида азота в атмосфере

Российским исследователям (часть из которых, правда, работает в Финляндии) удалось создать графеновый сенсор для мониторинга диоксида азота в окружающей среде [1]. Известно, что диоксид азота чрезвычайно токсичен. Даже в малых концентрациях он раздражает дыхательные пути и способен привести к серьезному отравлению. Поэтому проблема его своевременного обнаружения в приземной атмосфере задача достаточно актуальная. Здесь необходимо отметить, что традиционные металлоксидные сенсоры имеют относительно высокий порог детектируемых концентраций – от 0.1 до 100 миллионных долей (млн<sup>-1</sup>), что недостаточно для эффективного мониторинга, в то время как авторам работы [1] удалось на основе эпитаксиального графена, сформированного на карбиде кремния, создать датчик, способный улавливать NO<sub>2</sub> в воздухе вплоть до 1 млрд<sup>-1</sup>. Исследователи также представили прототип мобильного прибора на базе разработанного сенсора, который позволяет проводить быстрые и воспроизводимые измерения концентрации NO<sub>2</sub> в характерном диапазоне загрязнений окружающей среды (5–50 млрд<sup>-1</sup>).



Графеновый сенсор на держателе

Дополнительные тесты на избирательность устройства для типичных атмосферных загрязнений показали, что основным препятствующим компонентом, влияющим на точность во время измерения концентрации диоксида азота, является озон O<sub>3</sub>. Однако авторы рассчитывают, что детальный анализ изменения сопротивления датчика в процессе десорбции газов при высоких температурах позволит разделить вклады от NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> в общем отклике. К сожалению, ограничения доступного в настоящий момент авторам оборудования не позволили в должной мере в этом убедиться. Тем не менее, по мнению исследователей, благодаря низкой стоимости, минимальному потреблению электроэнергии и высокой эффективности предложенный ими сенсор на графене имеет неплохие шансы стать перспективным устройством для сверхчувствительного обнаружения NO<sub>2</sub>.

*М. Маслов*

1. *S.Novikov et al., Sens. Actuators B 236, 1054 (2016).*

### МУЛЬТИФЕРРОИКИ

#### Магнитоэлектрический конструктор

Группа японских исследователей из Национального института наук о материалах создали искусственный мультиферроик на основе сверхрешетки из Ti<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>O<sub>2</sub> и ниобата кальция. Пленки, толщиной в один или несколько атомных слоев, получали отшелушиванием от соответствующих объемных образцов. Затем их осаждали друг на друга с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт. В результате такой, поистине, ювелирной работы, исследователи получали слоеные среды с выраженными магнитными и сегнетоэлектрическими свойствами при комнатной температуре. Причем, меняя порядок чередования слоев, авторам удавалось регулировать параметры петель магнитного и диэлектрического

гистерезисов. Оптимальное сочетание образовывали два слоя магнитного материала, перемежающиеся одинарным слоем ниобата кальция.

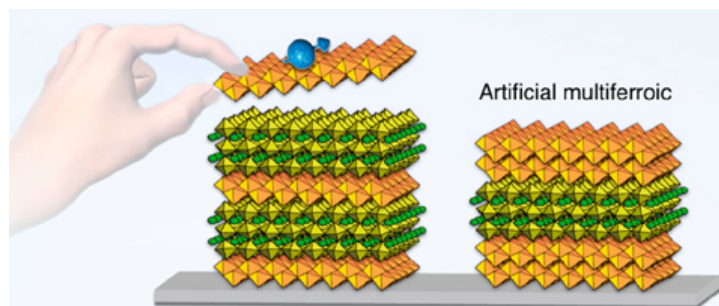


Рис. 1 Аллегорическая картина создания искусственного мультиферроика на основе сверхрешетки из магнитного и сегнетоэлектрического материалов [1].

Стоит отметить, что это, конечно, не первая попытка создать сверхрешетку из пьезоэлектрического и магнитного материалов со свойствами мультиферроика. Однако, как правило, в таких случаях ученые ограничиваются демонстрацией наличия сегнетоэлектрических и магнитных свойств у данной структуры, деликатно обходя стороной исходную цель создания такого рода материалов – получение магнитоэлектрического эффекта при комнатных температурах. В данном же случае авторы [1] успешно продемонстрировали линейный магнитоэлектрический эффект порядка 100 мВ/(см·Э) при нормальных условиях и в отсутствие подмагничивающих полей, что в 5 раз превышает эффект в “естественном” магнитоэлектрике  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при тех же условиях.

*А. Пятаков*

*I. B.-W. Li, J. Am. Chem. Soc. 138, 7621 (2016).*

## ТОРЖЕСТВО

### *Нобелевскую премию по физике присудили за топологические фазовые переходы*



Лауреатами Нобелевской премии по физике в 2016 году стали Дэйвид Таулес (David J. Thouless), Данкан Холдейн (Duncan Haldane) и Джон Костерлиц (John Kosterlitz): “за теоретические открытия в

топологических фазовых переходах и топологических фазах материи”.

Они разработали продвинутые математические методы для описания необычных фаз и свойств материи, таких, как сверхпроводники, сверхтекучие жидкости и магнитные пленки. Работы ученых сделали возможным нынешние поиски необычных фаз вещества, которые ведут многие исследователи в мире.

В начале 1970-х годов Д. Костерлиц и Д. Таулес перевернули существующие теории, предполагавшие, что явления сверхпроводимости и сверхтекучести не могут наблюдаться в тонких слоях. Они продемонстрировали, что сверхпроводимость может наблюдаться при низких температурах и объяснили фазовые переходы, которые заставляют сверхпроводимость исчезать при более высоких температурах. Физиками-лауреатами был объяснен механизм фазового перехода от сверхпроводящего состояния при низких температурах к обычному (при высоких) - этот переход получил название перехода Березинского-Костерлица-Таулеса. Советский физик-теоретик Вадим Березинский, участвовавший в разработке теории, не дождался до получения Нобелевской премии.

### ***Институту физики им. Л.В. Киренского – 60 лет!***

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН отметил свой 60-летний юбилей! 12 октября 1956 г. было подписано постановление президиума Академии наук СССР о создании в г. Красноярске института физики. Это произошло благодаря силам и энергии Леонида Васильевича Киренского, имя которого институт и носит.

Институт занимает ведущие позиции в России в области физики конденсированного состояния, его работы хорошо известны и за рубежом. Интеграция сферы образования и фундаментальной науки является в институте одним из приоритетных направлений, вовлекая в научно-исследовательскую деятельность творческую молодежь. Коллективом были подготовлены сотни кандидатов и десятки докторов наук.

*Поздравляем коллектив со славной годовщиной!  
Творческих успехов, новых свершений и открытий!*

## КОНФЕРЕНЦИИ

*The ESAS School 2016 on “Novel frontiers in superconducting electronics: from fundamental concepts and advanced materials towards future applications” from 12<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup> December, 2016, will be held at the C.N.R. Research Area in Pozzuoli, Napoli, Italy*

The School is organized by the Institute [SPIN \(Superconducting and Innovative Materials and Devices\)](#) of the National Council of Research (CNR) of Italy in collaboration with the [University of Napoli Federico II](#), the [Second University of Napoli](#), the [University of Salerno](#), and the [National Institute for Nuclear Physics \(INFN\)](#).

The **School** offers a unique possibility to learn, in a relatively short time and by direct interaction with highly qualified experts, the novel trends and the latest developments at the frontier of science where fundamental physical effects, advanced materials, novel device concepts and methodologies in nanotechnology can lead to innovative solutions for facing the needs and the challenges of a futuristic electronics employing superconducting phenomena and technologies. The scope of the school is to bridge the world of fundamental phenomena and advanced materials to technological applications with the aim to provide a background and a vision on futuristic concept devices and related applications.

### Topics:

1. **Toward energy-efficiency electronics:** big societal challenges, state-of-the-art and possible role of superconducting (SC) electronics

2. **Basic aspects of electronics with only superconducting materials:**

I) digital SC electronics

II) analog SC electronics

III) SC memories

3. **Interfacing superconductivity with other functional degrees of freedom:**

I) superconducting spintronics

II) spin control through light: fundamentals, devices and perspectives towards the integration with superconductivity

III) semiconductor-superconductor hybrids. Unconventional superconductivity and quantum topological order. Concepts, materials and devices toward a quantum topological computation.

IV) ferroelectricity and superconductivity: hybrid solutions

V) coherent superconducting caloritronics

4. **Superconducting fast interconnections down to low dimensional nanostructures, nanowires, two-dimensional one-layer materials**

([e.g. graphene, silicene, etc.]):

I) low dimensional SC electronics for fast interconnections

II) interconnection from the SC to the non-SC world: open questions

### Tutorials:

Methodologies for the design of nanostructures based on advanced materials

For further information on application fee, please refer to [events.isec2017.org](http://events.isec2017.org)

Экспресс-бюллетень ПерсТ 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, М. Маслов, Л. Опенов, А. Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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