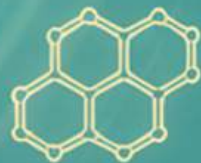


ЗА НАУКУ

SAPERE AUDE!

ВЫХОДИТ С 1958 ГОДА

№2 (1969) 2025 ГОД





ОТ РЕДАКЦИИ

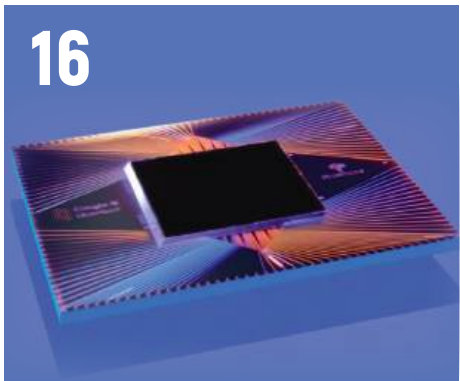
Бытовое наблюдение: выбор локальной системы летосчисления определяется средой и меняется вместе с ней. Школьные и студенческие годы, как правило, хранятся в памяти под порядковыми номерами вроде «в шестом классе» и «на первом курсе». Пример: высказывание «Новый год на третьем курсе мы встречали...» странным не кажется, и под него каждый из нас может найти воспоминание (ну или зафиксировать его пропажу за давностью лет).

А вот дальше системы летосчисления, судя по всему, дифференцируются по специальности. Для научных журналистов, например, годы нередко ассоциируются с инфоповодами, а «стандартными свечами» для этой системы работают Нобелевские премии — ими ты безусловно занимаешься, и потому в памяти остаются засечки: это, мол, было в год CRISPR / Cas9. Какой у того года номер был? Хороший вопрос, так сразу и не вспомнишь — точно знаешь, что за два года до того были лазер и оптический пинцет, и Фрэнсис Арнольд за направленную эволюцию награждали, это какой был? В этой системе 2025-й — год джозефсоновских контактов, металл-органических каркасов и T-регуляторных лимфоцитов (про всех них читайте дальше). Хороший! С чем мы вас и поздравляем, пусть 2026-й будет не хуже.

А теперь про дифференциацию. Таким образом, 2010-й год — год графена. Но если спросить нормального ученого, то для него год графена был в 2004-м, когда вышла оригинальная статья Гейма и Новосёлова, а в 2010-м мир уже был совсем другой (и про это тоже мы подробно расскажем дальше).

Почему при этом тут рядом у нас сидят Капица с Ландау, спросите вы? А это поймет уже только тот, кто долистает номер до самого конца. :)

СОДЕРЖАНИЕ



КРУПНЫМ ПЛАНОМ

4 **Электробагги «Мегавольт».** Фото: Анастасия Каплина / пресс-служба МФТИ

ОТКРЫТО

6 **Физика**
«Жидкие электроны»

7 **Биотехнологии**
ДНК-трансформеры

8 **Космос**
Секрет стабильных полетов у поверхности Марса

9 **Биофизика**
Металинза рассмотрела органоид мозга целиком

10 **Экология**
Отработавшие шины превращаются...

11 **Технологии**
Карта «мышления» искусственного интеллекта

КАРТИНА МИРА

12 **Подавляющее меньшинство**
Как нобелевские лауреаты открывали T-регуляторные лимфоциты

16 **Есть контакт!**
Что такое джозефсоновский контакт и зачем он миру

24 **Кто смог сделать МОК**

ИНФОГРАФИКА

30 **К генеалогии «Нобелей»**

В ФОКУСЕ

34 **Графен: 15 лет**
после Нобелевской премии

44 **Путешествие в плоский мир**
Фоторепортаж из Центра фотоники и двумерных материалов



72



52 Новые материалы
для «нобелевской» электроники

54 Алан Бекуле:
«ИТЭР – это моя "Феррари".
Ей нужны пилоты,
а не водители»

ИСТОРИЯ

62 Микроскопическая
теория сверхпроводимости
и эффект Джозефсона
Рассказывает Алексей Левин

КАРЬЕРА

68 Молодые ученые: блиц-опрос

ALUMINI

72 Татьяна Устинова: «Я не верю в сказки
коучей, что один человек может все. Это
не так. Человеку нужно помогать»

COMMUNITY

78 Для твоей же пользы

78



№ 2 (1969) 2025 ГОД

Издатель

Центр научной коммуникации МФТИ

Главный редактор

Иван Шунин

Визуальное представление

Анатолий Лапушко

Эмма Вурляева

Фотограф

Анастасия Каплина

Корреспонденты

Варвара Кравцова, Михаил Орлов,
Игорь Воронцов, Анастасия Медведева
Полина Лосева, Александра Борисова,
Егор Бирюлин, Алексей Левин

Редактор рубрики «Открыто»

Татьяна Небольсина

Корректор

Ирина Степачева-Бохенек

Ответственный секретарь

Наира Ковалева

Ректор МФТИ

Дмитрий Ливанов

Проректор по научной работе

Виталий Баган

Директор

Центра научной коммуникации

Егор Быковский

e-mail, TG и сайт редакции:

zn@phystech.edu

<https://t.me/zanauku>

zanauku.mipt.ru

Подписано в печать

15.12.2025

Тираж 999 экз.

Отпечатано в типографии

ООО «Андоба пресс», 105005

г. Москва, Аптекарский пер., 4, стр. 2

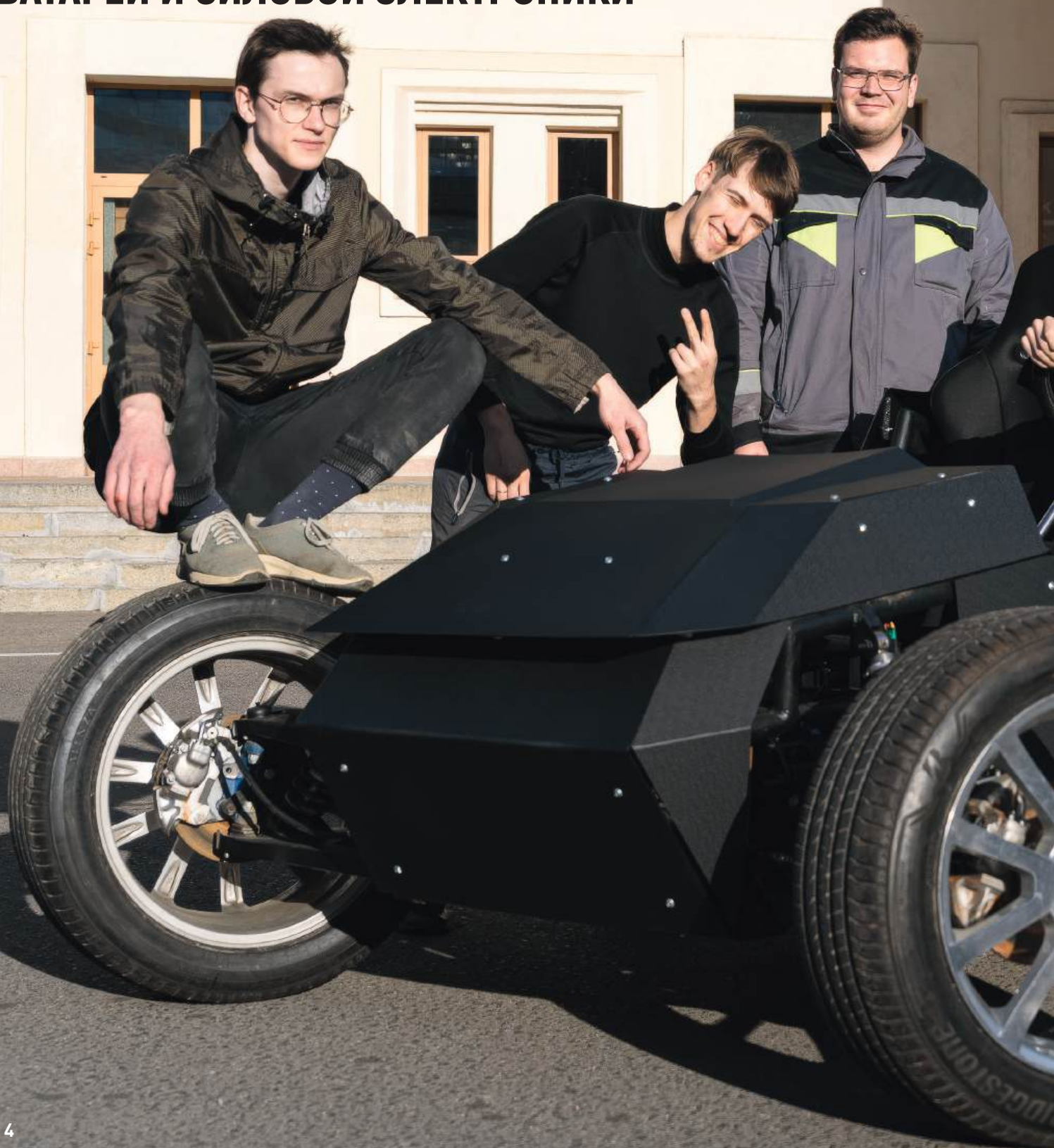
Корпоративное издание.

Перепечатка материалов
невозможна без письменного
разрешения редакции журнала.

Мнения и высказывания,
опубликованные в материалах
журнала «За науку», могут
не совпадать с позицией
редакции.

«МЕГАВОЛЬТ»

**МОДУЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОБАГГИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ
БАТАРЕЙ И СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**





Габариты: 3092 × 2125 × 1584 мм
Масса: 400 кг
Создан в лаборатории симбиотического проектирования Института электродвижения МФТИ

«ЖИДКИЕ» ЭЛЕКТРОНЫ В ГРАФЕНЕ

Игорь Воронцов

В сверхчистых материалах, таких как графен, электроны могут двигаться не как отдельные частицы, а как единая вязкая среда, подобно воде или воздуху. Одна из ключевых теорий в этой области, гипотеза «томографической» жидкости, предсказывала, что в двумерных материалах коллективные волны в электронной жидкости должны вести себя необычно. Возмущения с четной симметрией (похожие на симметричное сжатие) должны быстро исчезать, в то время как нечетные возмущения (похожие на сдвиг) должны существовать аномально долго. Однако доказать это напрямую не удавалось из-за отсутствия подходящих экспериментальных методов.

Команда ученых из Центра фотоники и 2D-материалов МФТИ с коллегами из Сингапура и Германии разработала и применила новый подход. Используя метод высокопорядкового циклотронного резонанса, они смогли целенаправленно возбуждать в графене



**Дмитрий Свинцов,
заведующий
лабораторией
оптоэлектроники
двумерных
материалов
Центра фотоники
и 2D-материалов
МФТИ:**

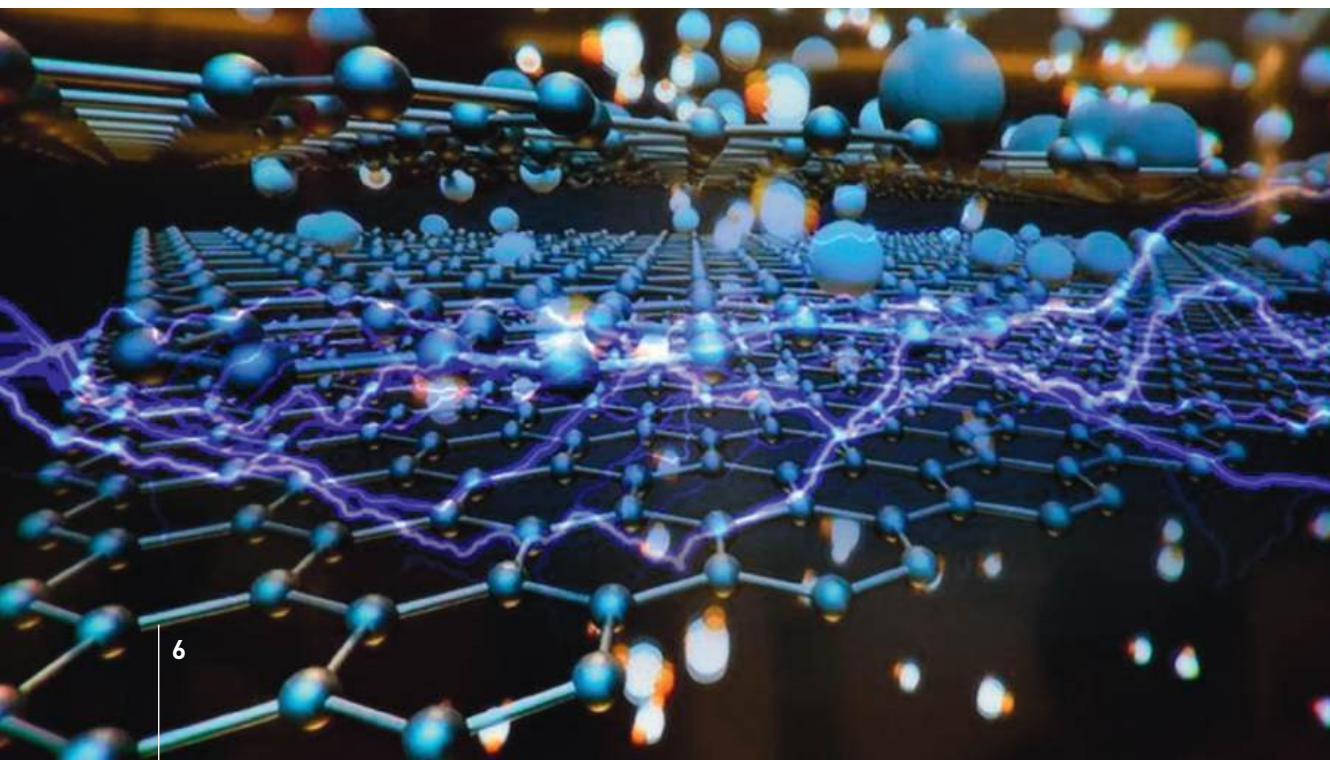
“ ”

Наши результаты — первое прямое подтверждение гипотезы «томографической» жидкости. Мы показали, что обнаруженная иерархия скоростей затухания однозначно указывает на доминирующую роль электрон-электронных столкновений в специфическом гидродинамическом режиме. Это открывает возможность использовать наш метод для изучения квантовых жидкостей

электронные возмущения разной симметрии и измерять время их жизни. Для этого образец графена помещался в сильное магнитное поле и облучался терагерцовым лазером.

Эксперимент показал, что резонансный пик, соответствующий нечетному возмущению (третьего порядка), был значительно уже, чем пик четного возмущения (второго порядка). Это стало прямым доказательством того, что нечетные моды затухают медленнее, полностью подтвердив гипотезу томографической жидкости.

Подтверждение гипотезы имеет важное практическое значение. Аномально долгоживущие нечетные возмущения могут быть использованы как носители информации, что позволит передавать сигналы с минимальными потерями. Это может стать основой для создания нового поколения сверхбыстрой и энергоэффективной терагерцовой электроники. Ученые Центра фотоники и двумерных материалов МФТИ видят серьезный потенциал для внедрения технологии в системы связи и обработки данных и активно ищут промышленных партнеров для дальнейшего развития и применения открытия.



ДНК-ТРАНСФОРМЕРЫ

Михаил Орлов

Российские ученые работают над созданием инновационных наноматериалов на основе ДНК. Это направление имеет большую ценность для биомедицины, биотехнологий и в целом относится к числу самых перспективных. Проблемой заняты группы ученых из лаборатории нанобиотехнологий МФТИ и направления нанобиомедицины университета «Сириус» под руководством Максима Никитина, доктора физико-математических наук, лауреата Государственной премии Российской Федерации в области науки и технологий 2024 года. Для того чтобы избирательно

уничтожать раковые клетки, надо хорошо знать метки болезнетворности — ученые называют их биомаркерами. К сожалению, в подавляющем большинстве случаев единственного и абсолютного биомаркера нет. Патологические клетки отличает целый набор признаков, которые следует рассматривать одновременно. Таким образом, приходится решать задачу вида «если в окружении этой клетки присутствует маркер А, а также обязательно маркер В, но ни в коем случае не маркер В, то ее надо уничтожить». Коллектив авторов новой работы предлагает использовать подход, который развивает уже более десяти лет. В 2014 году исследователи вы-

двинули инновационную концепцию «интеллектуальных» терапевтических наноагентов, способных решать логические задачи и запускать, в зависимости от результата, ту или иную лечебную функцию. «Молекула ДНК — идеальный объект для создания сложных логических устройств, — пояснила Елизавета Мочалова, старший научный сотрудник лаборатории функциональных лекарственных систем МФТИ. — Легкий синтез, предсказуемая структура и реакционная способность, широкий спектр специфичности (от малых молекул до белков и макромолекул). Но мы столкнулись с проблемами, связанными с поведением ДНК на поверхности наночастиц, и их пришлось преодолевать при разработке наноагентов». Ученым удалось продемонстрировать четкость срабатывания логических вентилях, в том числе при взаимодействии с раковыми клетками. А главное — показать возможность реализации сложных гейтов (со многим входами) на одной-единственной частице, что является ключевым шагом к созданию терапевтических нанороботов, действующих непосредственно в живом организме. Авторы надеются, что вскоре эта задача будет решена.



Владимир Черкасов,
старший научный
сотрудник лаборатории
нанобиотехнологий МФТИ:

“ ”

Интеллектуальный анализ РНК и ДНК не только дополняет иммунохимические подходы высокочувствительными методами детекции вирусов, бактериальных патогенов, онкозаболеваний и так далее. Он приближает нас к решению одной из главных загадок нашего столетия — обнаружению в крови человека большого числа свободно циркулирующих коротких фрагментов ДНК и РНК, чьи функции поначалу откровенно недооценивали. Сейчас же очевидно, что такие последовательности превратились из «биологического шума» в мощный инструмент современной медицины. Они играют важную роль в регуляции генов, межклеточной коммуникации и развитии заболеваний. А изучение таких нуклеиновых кислот открывает новые возможности для неинвазивной диагностики, мониторинга состояния пациентов и даже персонализированной терапии



СЕКРЕТ СТАБИЛЬНЫХ ПОЛЕТОВ У ПОВЕРХНОСТИ МАРСА

Игорь Воронцов

Полеты над Красной планетой – вызов для инженеров. Атмосфера Марса почти в сто раз менее плотная, чем земная, что кардинально меняет законы аэродинамики. Особенно критичным становится понимание динамики вблизи поверхности – на финальном этапе посадки, когда любая нестабильность может привести к катастрофе.

Чтобы пролить свет на эти сложные процессы, коллектив ученых из МГУ им. М. В. Ломоносова, Института системного анализа РАН и МФТИ поставил перед собой две цели: во-первых, детально изучить, как близость к поверхности влияет на силы, действующие на тонкое крыло, а во-вторых, оценить, можно ли в таких условиях создать эффективный двигатель по принципу машущего крыла насекомого. Для этого они использовали сложный численный метод, основанный на решении сингулярных интеграль-

ных уравнений, который позволил с высокой точностью промоделировать движение тонкой пластины в разреженном газе. Результаты моделирования преподнесли сюрприз, опровергающий классические представления. Как и ожидалось, при приближении к поверхности подъемная сила резко возрастает, это явление известно как «экраный эффект». Однако его природа на Марсе оказалась иной. Если на Земле его вызывает «воздушная подушка» из-за роста давления, то в разреженном газе доминируют силы вязкого трения. Главное открытие было связано с точкой приложения результирующей силы. В отличие от полетов в плотной атмосфере, где эта точ-



Александр Шамин,
ассистент кафедры
высшей математики
МФТИ:

“ ”

Мы обнаружили, что в разреженном газе поверхность как бы протягивает аппарату невидимую руку помощи. Смещение центра сил назад создает естественный стабилизирующий момент, который стремится опустить нос аппарата и уменьшить угол атаки. Это саморегулирующийся механизм, который помогает гасить колебания и обеспечивает более безопасную посадку на поверхности Марса

ка смещается к передней кромке крыла, создавая опрокидывающий, дестабилизирующий момент, в вязкой марсианской среде все происходит наоборот. Моделирование показало, что центр давления смещается к задней кромке. Вторая часть исследования была посвящена концепции марсолета — миниатюрного аппарата, передвигающегося за счет машущих крыльев. Ученые смоделировали систему из двух соединенных пластин и доказали, что такой способ движения не только возможен, но и может быть весьма эффективным.



МЕТАЛИНЗА

РАССМОТРЕЛА ОРГАНОИД МОЗГА ЦЕЛИКОМ

Анастасия Медведева

Органоиды — «мини-версии» человеческих органов, выращенные из стволовых клеток, позволяют ученым моделировать процессы, которые происходят при заболеваниях или воздействии лекарства. По сравнению с клетками, растущими плоским слоем на дне чашки Петри, трехмерная структура дает клеткам расти и взаимодействовать в условиях, более близких к условиям живой ткани. Увы, при этом рассматривать в микроскоп трехмерные структуры сложнее, потому что расположенные дальше от объектива части объекта выпадают из фокуса.

Международная команда ученых усовершенствовала метод фотоакустической микроскопии трехмерных органоидов. Чтобы лазерный луч мог проникнуть в весь объем об-

разца и вызвать в нем звуковые колебания, исследователи предложили использовать мультифокальную металинзу — покрытие, состоящее из наностолбиков оксида титана. Свет, проходя через нее, разбивается на множество параллельных лучей, которые фокусируются сразу в 60 точках на разных расстояниях от линзы. Такой кластерный фокус позволил исследователям увидеть органоид человеческого мозга целиком и отследить, как в его глубинах с течением времени меняется концентрация нейромеланина — одного из маркеров развития болезни Паркинсона.

«Каждый элемент массива определенным образом меняет траекторию и фазу излучения, проходящего через металинзу, — прокомментировал Александр Барулин, ведущий научный сотрудник лаборатории контролируемых оптических наноструктур МФТИ, — в результате получается луч, способный сфокусироваться в области шириной порядка 2 микро-

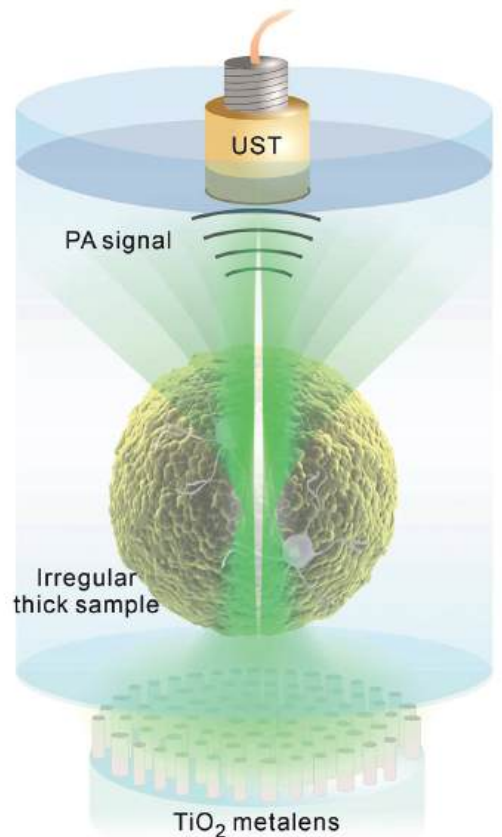


Схема эксперимента: лазерный луч, проходя через металинзу, вызывает акустические колебания в органоиде, получившийся сигнал регистрируется с помощью ультразвукового детектора.

Источник: Science Advances

метров и глубиной до полумиллиметра. Это в 13,5 раза больше, чем глубина изображения системы из оптических линз, а значит, нам не нужно получать длинную последовательность изображений на разных глубинах биообъекта — всю информацию мы получим за один раз».

В этой работе ученые показали, что распределения нейромеланина в живых органоидах переднего и среднего человеческого мозга, рассчитанные по снимкам с использованием металинзы, соответствуют полученным традиционно, с помощью гистологии. При этом за одно сканирование возможно получить объемное изображение нейромеланина в цельных органоидах.

Более того, новый метод позволяет наблюдать изменения, происходящие в живых клетках, день за днем.



“ ”

Александр Барулин,
ведущий научный сотрудник
лаборатории контролируемых
оптических наноструктур
МФТИ:

Потенциал нашего метода не ограничивается исследованием органоидов мозга и детектированием нейромеланина, можно «увидеть» и другие вещества или биообъекты, поглощающие на длинах волн лазерного излучения, причем эти длины можно менять в пределах диапазона видимого света, это не влияет на способность металинзы создавать удлинённый фокус. Таким образом, наши результаты открывают путь для создания быстрых и портативных систем для усовершенствованных диагностических инструментов и платформ скрининга эффективности лекарственных средств на основе фотоакустической микроскопии



ОТРАБОТАВШИЕ ШИНЫ ПРЕВРАЩАЮТСЯ...

Варвара Кравцова

Ежегодно в мире выбрасывается более 1,2 млрд изношенных шин, которые из-за образования поперечных связей с участием серы в вулканизированном каучуке и наличия антиоксидантов практически не поддаются разложению. Есть два распространенных метода утилизации: переработка материала и рекуперация энергии. Первый предполагает измельчение или дробление до состояния резиновой крошки, которая стала популярным материалом для покрытия, например, детских площадок. Рекуперация энергии заключается в использовании шин в качестве альтернативного топлива в цементных печах. Ученые Центра фотоники и двумерных материалов МФТИ и РКЦ, совместно с китайскими коллегами предложили метод преобразования старой резины в однослойные углеродные нанотрубки и газообразный водород (H_2) с помощью химического осаждения из газовой фазы. В основе предложенного метода лежит использование пористого кобальтового катализатора на основе оксида магния (Co/MgO). В результате

термического разложения каучука образуются углеводороды и оксиды углерода. Затем на этапе катализа эти углеродсодержащие вещества служат источником для синтеза однослойных углеродных нанотрубок и при этом выделяется H_2 . Однослойные нанотрубки обладают превосходными оптическими и электрическими свойствами. Это делает их идеальными для таких областей применения, как прозрачные проводящие тонкие пленки, мембраны для фильтрации воды и современные композитные материалы. Сами нанотрубки можно представить как свернутые слои углерода толщиной 1 атом. Они протяженные, но диаметр составляет не более 3 нанометров. В зависимости от диаметра и геометрии сворачивания они могут стать либо металлом, либо полупроводниками. То есть для производства требуются трубки с узким распределением хиральности или даже полностью идентичные. Но достижение хирально-селективного синтеза остается задачей, которая решена только для отдельных геометрий. Научной группе удалось подобрать оптимальные температуры реакций



Александр Чернов, заведующий лабораторией физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий МФТИ:

“ ”

Из груды бывших покрышек мы получаем нанотрубки, которые можно применить в других областях. Если правильно подобрать параметры синтеза, можно создать трубки с одинаковыми свойствами, и благодаря этому использовать их, например, для электроники нового поколения. Это открывает широкое окно возможностей, которые мы тщательно исследуем. В нашем проекте китайская сторона синтезирует новые нанотрубки с различными свойствами. В Центре фотоники и двумерных материалов МФТИ и в РКЦ мы занимаемся непосредственно изучением оптических свойств и на их основе даем рекомендации о возможном улучшении. Уже сейчас продемонстрирована вполне рабочая технология утилизации

синтеза для получения доли нанотрубок с одинаковой геометрией на 20,1%, то есть добиться узкого распределения по хиральности. При этом ученые синтезировали нанотрубки из отработанных шин разных типов и производителей. Это первая успешная демонстрация преобразования разного каучука в однослойные углеродные нанотрубки.



КАРТА «МЫШЛЕНИЯ» ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Игорь Воронцов

Современные большие языковые модели остаются для своих создателей во многом загадкой. Несмотря на их впечатляющие способности, внутренние механизмы их «мышления» остаются непрозрачными. Это фундаментальная проблема, мешающая созданию по-настоящему надежного и безопасного искусственного интеллекта. Одним из прорывов в этой области стало использование разреженных автоэнкодеров (SAE) — специальных словарей-дешифраторов, которые позволяют извлекать из сложной активности нейронов отдельные, понятные человеку концепции или признаки, такие как «научная терминология» или «ссылки на законы физики». Однако было неясно, как проследить судьбу одного и того же понятия по мере его продвижения через десятки слоев модели. Задача, которую поставили перед собой исследователи из «Т-Технологий» и МФТИ, — создать «бесшовную» карту, связывающую эти разрозненные этажи и показывающую, как именно информация трансформируется в процессе обработки. Разработанный ими метод позволяет отследить, как конкретные признаки зарождаются, передаются от слоя к слою или исчезают. Для этого ученые использовали не требующий данных подход, осно-

Механизм внимания. Этот граф потока, построенный с помощью нового метода, демонстрирует эволюцию единственной концепции. Горизонтальная ось представляет собой глубину нейросети. Каждая точка — конкретное проявление этой концепции на определенном слое, а линии показывают ее «наследование»

Источник: ICML 2025



Никита Балаганский,
руководитель
научной группы
LLM Foundations,
T-Bank AI Research,
аспирант МФТИ:

“ ”

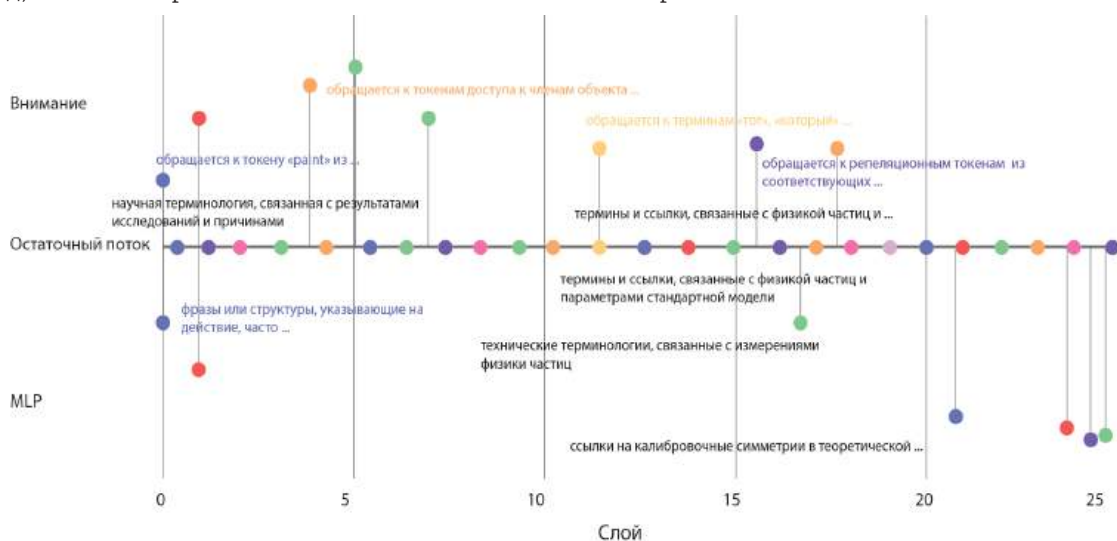
Мы создали своего рода генеалогическое древо для «мыслей» нейронной сети. Наш метод позволяет проследить всю родовую конкретную идею внутри модели. Мы можем увидеть, как из простых признаков, отвечающих за отдельные слова на ранних слоях, рождаются более сложные семантические конструкции на средних, и как они в итоге собираются в абстрактные темы на финальных этапах. Это похоже на то, как ручейки сливаются в реки, а реки — в океан

ванный на вычислении косинусного сходства между векторами признаков, извлеченных с помощью SAE на разных уровнях модели. Их метод работает как лингвистический

компаратор: он берет векторное представление одного понятия на одном слое и ищет в следующем слое наиболее похожее по направлению, тем самым выстраивая цепочку преемственности.

Коллектив ученых смог не просто сопоставить похожие признаки, но и классифицировать их происхождение. Оказалось, что концепции на первых слоях чаще возникают из механизма внимания, который отвечает за понимание контекста, а на более поздних слоях концепции чаще возникают в MLP, в которых хранятся знания модели. Создавая такие графы потоков для тысяч признаков, исследователи получили беспрецедентную по детализации картину внутренней жизни нейросети.

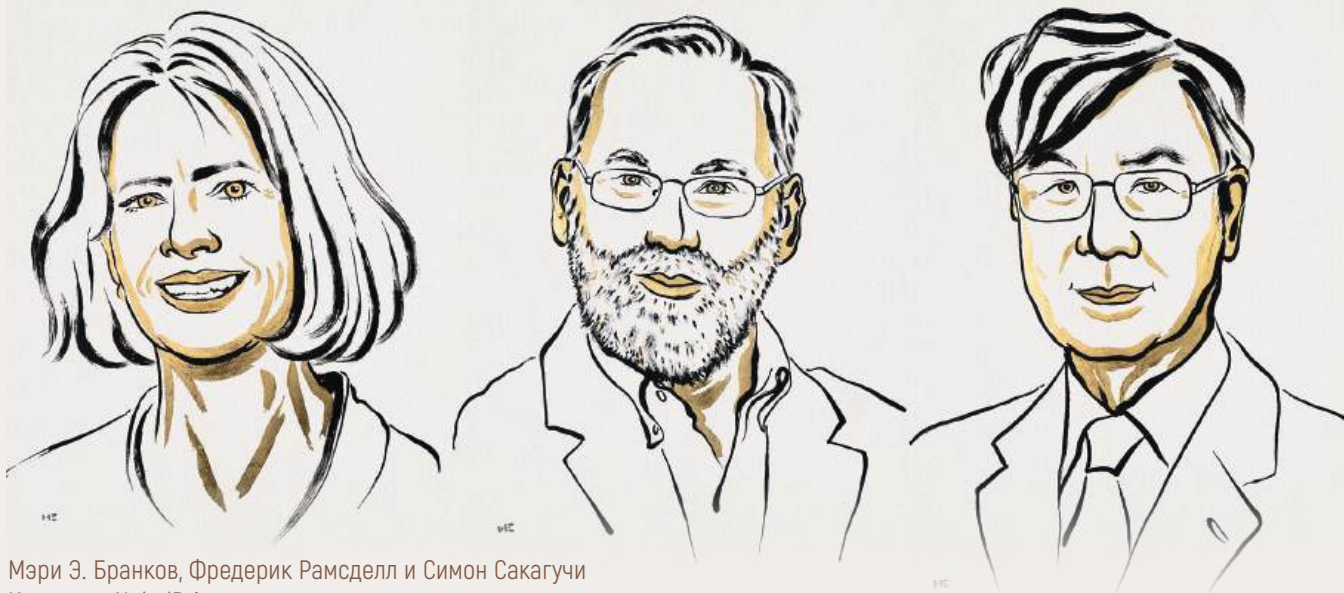
Понимание этих потоков — ключ к созданию более безопасного и предсказуемого ИИ. Этот подход, основанный на графах потоков признаков, не только открывает «черный ящик» ИИ, делая его работу прозрачной, но и дает разработчикам инструмент для точного управления поведением нейросетей. С его помощью можно будет выявлять и целенаправленно ослаблять нежелательные концепции, связанные с предвзятостью, токсичностью или дезинформацией, по всей цепочке их формирования. Это также открывает новые возможности для создания моделей с управляемым стилем и тематикой, что крайне востребовано в творческих и образовательных приложениях.



ПОДАВЛЯЮЩЕЕ

КАК НОБЕЛЕВСКИЕ ЛАУРЕАТЫ ОТКРЫВАЛИ Т-РЕГУЛЯТОРНЫЕ ЛИМФОЦИТЫ

Полина Лосева



Мэри Э. Бранков, Фредерик Рамсделл и Симон Сакагучи
Источник: NobelPrize

Мы привыкли думать об иммунной системе как о войсках. Но чтобы толпа вооруженных клеток не привела организм к распаду, ей нужно отличать своих от чужих и не нападать на них, а если уж напали — уметь тормозить. Люди с врожденными дефектами иммунных тормозов страдают не меньше людей с иммунодефицитом. Им не приходится жить в изоляции от мира, чтобы ничем не заразиться, но неприятности у них начинаются иногда до появления на свет. И тех, и других обычно спасает только трансплантация. А вот что именно им нужно трансплантировать, почему нынешние нобелиаты так долго это искали и кому еще оно поможет, сейчас расскажем.

КТО СКАЗАЛ «СТОП»

Симон Сакагучи подозревал, что среди иммунных клеток должны быть те, кто запрещает другим

лимфоцитам работать. Потому что в его экспериментах аутоиммунные болезни у мышей предотвращались переливанием крови или одной только ее Т-клеточной фракции от здоровых сородичей. А значит, рассудил он, в здоровой крови есть какие-то Т-лимфоциты, которые мешают иммунной полиции атаковать своих.

Раньше считалось, что эту проблему решает тимус. В нем созревают и обучаются Т-клетки (собственно, поэтому «Т-»), и важная часть этого обучения — отсев. Каждый лимфоцит несет рецептор только к одному антигену, и те из них, кто связываются со здоровыми белками, которые им показывают в тимусе, там и погибают. Этот



Сверху: здоровая мышь
Снизу: «паршивая» мышь
Источник: Eva N Hadaschik et al. / Arthritis Research & Therapy (2015)

МЕНЬШИНСТВО



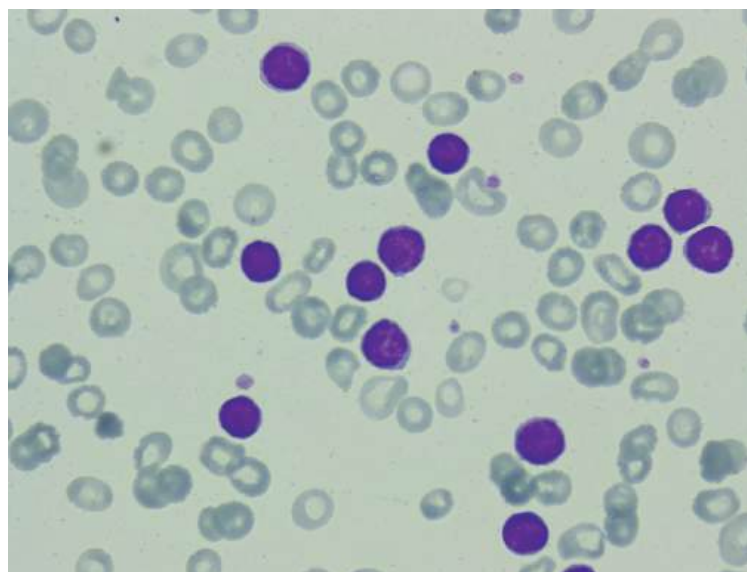
Лимфоциты обеспечивают приобретенный иммунитет:

В-клетки стреляют по противнику антителами издалека,

Т-киллеры цепляются за подозрительные антигены на поверхности клеток,

Т-хелперы узнают антигены и активируют Т-киллеров, подтверждая, что антигены правда подозрительные,

НК-клетки держатся особняком; они тоже отличают собственные клетки от чужих или сломавшихся, но используют для этого белки главного комплекса гистосовместимости



Зрелые лимфоциты в мазке крови
Источник:
Alparslan Merdin et al. /
Clinical Case Reports,
2017

феномен называют центральной толерантностью.

Когда здоровым мышам удаляли тимус через несколько дней после рождения, у них развивался целый букет аутоиммунных патологий: страдали желудок, яичники и щитовидная железа. Гибель собственных клеток организма — обычно дело рук Т-лимфоцитов, а значит, среди тех, кого тимус успел выпустить в кровоток до удаления, все же осталось сколько-то опасных недоучек. А раз переливание крови от этого помогает, значит, в норме существует еще и толерантность периферическая, и какие-то клетки могут остановить полицейский беспредел уже на местах. Оставалось только эти клетки найти.

Под микроскопом все лимфоциты на одно лицо. Различать надо по белкам на поверхности: например, на мембране Т-киллеров есть молекула CD8, а у Т-хелперов — CD4. Но какие белки сидят на «Т-супрессорах», никто не знал. Получился замкнутый круг: чтобы выделить клетки из крови и изучить их, нужно заранее знать, за какие белки хватать.

Сакагучи не был первым, кто взялся за эту работу. Иммунологи удаляли тимус и переливали кровь мышам еще в 1960-х, когда он еще заканчивал школу. В 1970-х, пока он учился в университете, они пробовали выловить из крови те самые «Т-супрессорные клетки». Но для этого не хватало ни точности методов, ни молекулярных знаний. Например, когда Сакагучи защитил диплом и присоединился к поискам этих клеток, ученые обнаружили, что белки, характерные для Т-супрессоров, кодируются в I-J локусе генома. Но уже в 1982-м, одновременно с тем, как Сакагучи защитил диссертацию по Т-супрессорам, оказалось, что в I-J локусе никакого гена нет. Многие иммунологи из этого сделали вывод, что и Т-супрессоров не существует.

Но Сакагучи продолжил поиски — почему-то же переливание Т-клеток спасает мышам от аутоиммунных болезней. Метод, которым он действовал, выглядел так: Сакагучи обрабатывал мышинные Т-лимфоциты антителами к разным поверхностным белкам и потом вводил их мышам с удаленным тимусом. Если

у мышам начинались аутоиммунные проблемы, значит заблокированный белок связан с миротворческой деятельностью Т-клеток, и к нему стоит присмотреться повнимательнее. Таким путем к 1982 году он определил два характерных белка: CD5 и CD45. Но они встречаются на всех Т-клетках, и на роль идентификатора не годились. Третьего кандидата Сакагучи нашел 13 лет спустя, в 1995-м, — им оказалась молекула CD25, она встречалась только на каждом десятом Т-хелпере. Сейчас мы знаем, зачем регуляторным Т-клеткам CD25. Это рецептор интерлейкина-2, мощного провоспалительного сигнала (который активирует лимфоциты). Оказавшись в очаге воспаления, Т-регуляторы собирают на себя молекулы ИЛ-2, чтобы те не достались Т-киллерам. Это свойство Т-регуляторов тормозит воспаление, но оно же затормозило и работу Сакагучи: поскольку ИЛ-2 в норме действует на Т-киллеры, у них тоже есть рецепторы к нему, и чем дольше бьет набат, тем этих рецепторов больше. Поэтому за несколько дней воспаления все Т-киллеры покрываются CD25.

Так что и эта молекула оказалась не уникальной, доказательством существования Т-регуляторов не стала, и квест Сакагучи продолжился.

ГДЕ У НЕГО КНОПКА

У двух других нобелиатов этого года не было пятнадцати лет на поиски нужного белка. Они работали в биотехе, где время течет гораздо быстрее. Сотрудники Celltech Chiroscience искали лекарство от аутоиммунных болезней — и потому разбирались, что сломалось в организме «паршивых» мышей (линия scurfy).

Эту линию модельных животных вывели в середине прошлого века на Манхэттенском проекте, когда изучали влияние радиации на организм человека и других млекопитающих. «Паршивыми» мышей назвали из-за характерных проплешин на коже вокруг ушей и глаз. Это результат воспаления кожи — одного из многих аутоиммунных процессов в их организме. Кроме того, у них поражены селезенка и печень, а умирают они в первые недели жизни от кровотечения в кишечнике. Правда, гибнут только самцы — самки остаются здоровыми, «парша» обходит их стороной. Поэтому Бранков и Рамселл знали, что природа болезни — генетическая, а поломка лежит где-то на Х-хромосоме. У самок Х-хромосом две, и даже если от матери ей досталась «паршивая» мутация, то здоровая отцовская хромосома компенсирует ее эффект.

Бранков и Рамселл взялись найти этот ген. Если бы им удалось выяснить, для чего он нужен и с каким процессом связан, можно было бы запустить этот процесс у людей с аутоиммунными болезнями. В то время поиски генов были устроены гораздо сложнее, чем сейчас: ученые и раньше искали, что сломалось у «паршивых» мышей, но им не хватало ни методов секвенирования, ни базы данных — найденный ген было бы не с чем сравнить. Но на 1990-е, когда Бранков и Рамселл взялись за несчастных мышей, пришелся бум секвенирования. В разгаре был проект «Геном человека» (Human genome project, HGP), и мышиную ДНК тоже секвенировали в параллель. Поэтому будущим нобелиатам хватило и методов, и материалов. Впрочем, задача все равно была не из легких: мышиный геном еще не был готов, и они искали свой ген вручную. Для этого они скрещивали мутантных самок со здоровыми самцами, их потомство — опять со здоровыми. В результате таких скрещиваний получается набор мышей, унаследовавших разные участки Х-хромосомы от мышей scurfy, и, следовательно, позволяет судить, какой именно связан с аутоиммунной «паршой».

После того как Бранков и Рамселл сузили поле поиска до 500 тысяч пар оснований, они перешли к секвенированию, чтобы выяснить, есть ли на нем гены и за что они отвечают. Гены нашлись: какие-то были известны, но один оказался новым. Это

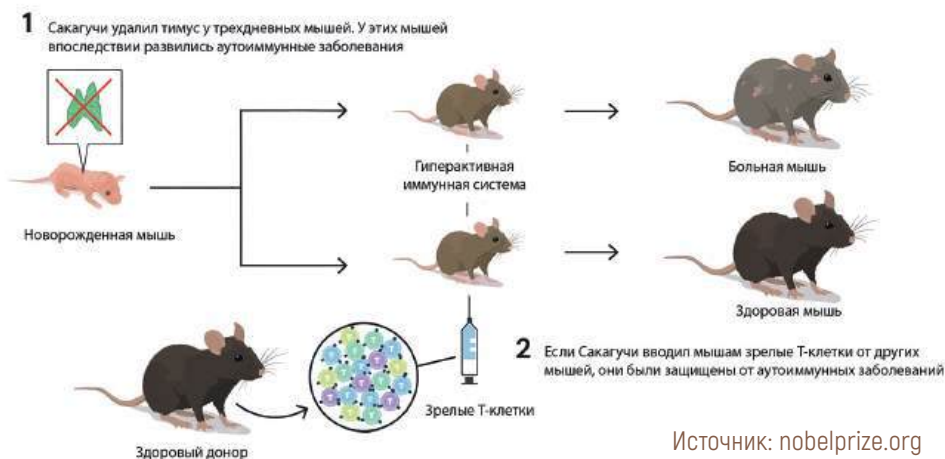
было в 2001 году — геном мыши еще не расшифровали, а HGP опубликовал только один черновик ДНК человека. Так что Бранков и Рамселлу пришлось искать, на какие известные гены похож их новооткрытый. Они заключили, что тот кодирует какой-то ДНК-связывающий белок. Его назвали Foxp3.

Вместе с этим будущие нобелиаты решили подробнее изучить аутоиммунный синдром IPeX, похожий на мышиную «паршу». Это врожденное заболевание, которое проявляется у младенцев в первые месяцы жизни. У них страдают в основном кожа, кишечник и поджелудочная железа (развивается диабет первого типа), но могут быть поражены и другие органы. Дети с IPeX умирают ко второму-третьему году жизни, если не получают пересадку костного мозга. Бранков и Рамселл выяснили, что проблемы детей с IPeX вызваны тем же, чем и страдания мышей scurfy: мутацией в человеческом аналоге Foxp3.

В этот момент их путь наконец пересекся с многолетним маршрутом Сакагучи. Японец шел снаружи внутрь: он отталкивался от клеточной функции и искал, какой белок за нее отвечает. Бранков и Рамселл двигались ему навстречу: нашли ген, выделили белок, а потом стали разбираться, чем именно в организме они занимаются. В 2003 году они убедились в том, что действительно стоят в одной точке.

Сакагучи прочел работы своих американских коллег и обнаружил, что Foxp3 активен в его Т-регуляторах (к тому времени их стали называть именно так, чтобы лишний раз не вызывать в памяти споры о «Т-супрессорах»). Более того, он показал, что можно запустить Foxp3 в обычных Т-хелперах и тем самым превратить их в Т-регуляторы. Так выяснилось, что Foxp3 управляет судьбой Т-лимфоцитов и запускает их дифференцировку в Т-регуляторы. В том же году Рамселл с коллегами продемонстрировали, что в организме мышей scurfy не хватало именно Т-регуляторов. Так Т-регуляторные лимфоциты получили уникальный маркер и признание

Эксперимент Сакагучи

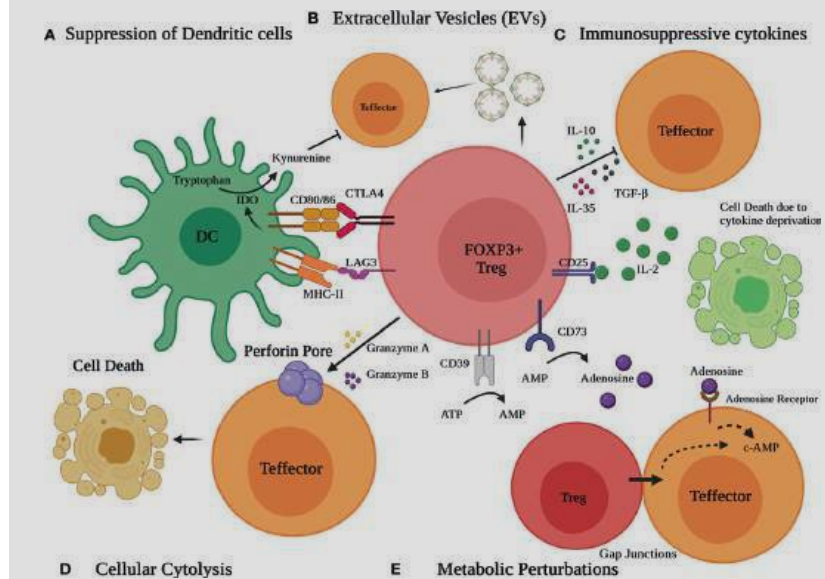


Источник: nobelprize.org

научного сообщества, а люди с синдромом ИРЕХ — подробное описание причин и механизмов своей болезни. Но до решения Нобелевского комитета оставалось еще 22 года.

СИЛА УБЕЖДЕНИЯ

За это время иммунологи подробно разобрались в том, откуда берутся и чем заняты Т-регуляторные клетки. Например, стало известно, что не все они получают свою специализацию в тимусе, некоторые появляются уже в тканях из обычных Т-хелперов (но эти обычно работают не так эффективно). Кроме того, стало понятно, что отъем ИЛ-2 — не единственный способ, которым они могут повлиять на Т-киллеров. Работа любого Т-лимфоцита начинается с встречи с антиген-презентирующей клеткой, которая демонстрирует, какие части белков ей попались в последнее время внутри ткани. Если лимфоцит узнает какой-то белок, он активируется и начинает действовать: Т-хелпер активирует Т-киллера, а Т-киллер отправляется искать клетку, которая этот белок произвела, чтобы ее уничтожить. Примерно так же действуют и Т-регуляторы, только на них, в отличие от Т-киллеров, находятся рецепторы к собственным белкам организма. Они прилипают к антиген-презентирующей клетке и могут даже отобрать у нее антиген, чтобы он не попался никому на глаза. Если же рядом оказывается Т-киллер, Т-регулятор может или украсть у него ИЛ-2, или, наоборот, выделить ИЛ-10 — противовоспалительную молекулу, которая не дает киллеру активироваться. К тому же на поверхности у Т-регуляторов встречается CTLA-4 — еще одна тормозящая молекула, за открытие которой дали Нобелевскую премию в 2018 году. Иными словами, получается, что периферическая толерантность, которой ведают Т-регуляторы, заключается не в том, чтобы сделать невозможным полицейский беспредел, а в том, чтобы создать для него неблагоприятный фон. Технически Т-киллер все равно может атаковать ни в чем не повинную клетку, но не делает этого — потому что вокруг



Как работают регуляторные Т-клетки (в центре)

- A. Не дают дендритным клеткам (DC) активировать Т-киллеры
 - В-С. Тормозят Т-киллеры с помощью внеклеточных пузырьков или противовоспалительных сигнальных веществ
 - D. Убивают Т-киллеры напрямую
 - E. «Воруют» у Т-киллеров провоспалительные молекулы и выделяют свои тормозящие
- Источник: Payal Grover et al. / Frontiers in Immunology (2021)

накапливаются Т-регуляторы, которые убеждают его этого не делать. Со временем стало понятно, что на этом работа Т-регуляторов не заканчивается. В жизни человеческого организма есть еще немало ситуаций, в которых нужно остудить пыл Т-киллеров и убедить их не вмешиваться. Это, например, беременность, когда внутри материнского организма скапливаются чужеродные клетки, которые нельзя уничтожать. Или — заживление ран и регенерация: когда в поврежденной области накапливаются сломанные клетки, Т-киллеры принимают их за чужаков и могут сделать только хуже. Или даже ожирение: избыток жировой ткани вызывает в организме хроническое воспаление, и Т-регуляторы могут быть очень полезны, чтобы его притушить. Все эти свойства могут сделать Т-регуляторы хорошим лекарством — безопасным и многофункциональным. С одной стороны, их можно прицельно «навести» на мишень, если речь идет об аутоиммунных болезнях вроде диабета первого типа или рассеянного склероза, когда Т-киллеры атакуют конкретный

тип клеток. С другой стороны, их можно использовать как универсальный иммуномодулятор, если нужно помочь заживлению раны или если в организме возникло хроническое воспаление, как это бывает при многих болезнях неиммунной природы, вроде болезни Альцгеймера или Паркинсона. Такие лекарства есть, но ни одно из них еще не дошло до клиники, — как это часто бывает с открытиями, отмеченными Нобелевской премией. Нобелевский комитет вообще не гонится за практически никакими применениями — достаточно и того, что лауреаты убедили своих коллег немного иначе смотреть на мир. Благодаря Сакагучи, Бранков и Рэмсделлу мы знаем, что иммунный ответ действует не столько по закону, сколько по ситуации. Не так важно, на кого нацелился воинственный лимфоцит, важнее — какие клетки столпились вокруг него и окажутся ли их голоса поддерживающими или, наоборот, отговаривающими. А клинические применения — дело времени и вопрос того, удастся ли последователям нобелиатов убедить Т-регуляторы поработать на благо пациентов.

ЕСТЬ КОНТАКТ!

ЧТО ТАКОЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ КОНТАКТ И ЗАЧЕМ ОН МИРУ

Игорь Воронцов



Джон Кларк, Мишель Деворе, Джон Мартинис
Источник: NobelPrize

Половина Нобелевской премии по физике 2025 года была присуждена Джону Кларку — за фундаментальные эксперименты по наблюдению макроскопических квантовых эффектов в электрических цепях. Вторую поделили Мишель Деворе и Джон Мартинис, создавшие сверхпроводящие кубиты и первые работающие квантовые процессоры. В этом тандеме Деворе выступает как архитектор квантовых схем и автор фундаментальных концепций, а Мартинис — как инженер, доведший идеи до практической реализации.

МАКРОКВАНТУМ

В 1957 году Джон Бардин, Леон Купер и Джон Шриффер предложили элегантную теорию сверхпроводимости (теория БКШ), за которую в 1972 году получили Нобелевскую премию. Ключевая

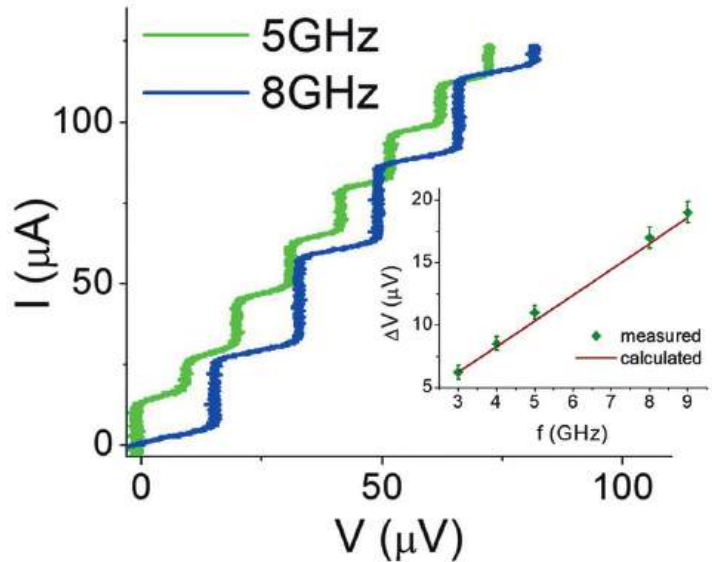
идея заключалась в том, что электроны в сверхпроводнике перестают быть «одиночками». Вместо этого они объединяются в пары Купера с помощью механизма фононного посредничества: электрон деформирует решетку, образуется квазичастица деформации — фонон, который создает область избыточного положительного заряда. К этой области притягивается второй электрон, в результате чего два электрона, которые в вакууме бы отталкивались, образуют связанную пару. Эти пары — не просто два электрона рядом. Это единая квантовая сущность, ведущая себя как одна частица (бозон). И самое главное — все куперовские пары в сверхпроводнике пребывают в одном и том же квантовом состоянии. Фундаментальная идея теории в том, что весь этот гигантский ансамбль можно описать единой волновой функцией, как будто это одна частица.

Именно общая волновая функция и заставляет их двигаться идеально согласованно — как синхронизированный балет. Это позволяет им обтекать любые дефекты решетки без потерь энергии, то есть без сопротивления.

В 1962 году Брайан Джозефсон, будучи всего лишь 22-летним аспирантом в Кембридже, задался вопросом: а что если взять два куска сверхпроводника и разделить их тончайшим слоем изолятора — барьером, который классический ток преодолеть не может? Классическая физика говорит: цепь разорвана, тока не будет. Но Джозефсон предположил иное: что куперовские пары могут туннелировать через изолятор, создавая ток даже без всякого приложенного напряжения (стационарный эффект Джозефсона). А во-вторых, если приложить к переходу даже небольшое постоянное напряжение, система отвечает не обычным током, а колебаниями тока — что критически важно, со стабильной частотой (нестационарный эффект).

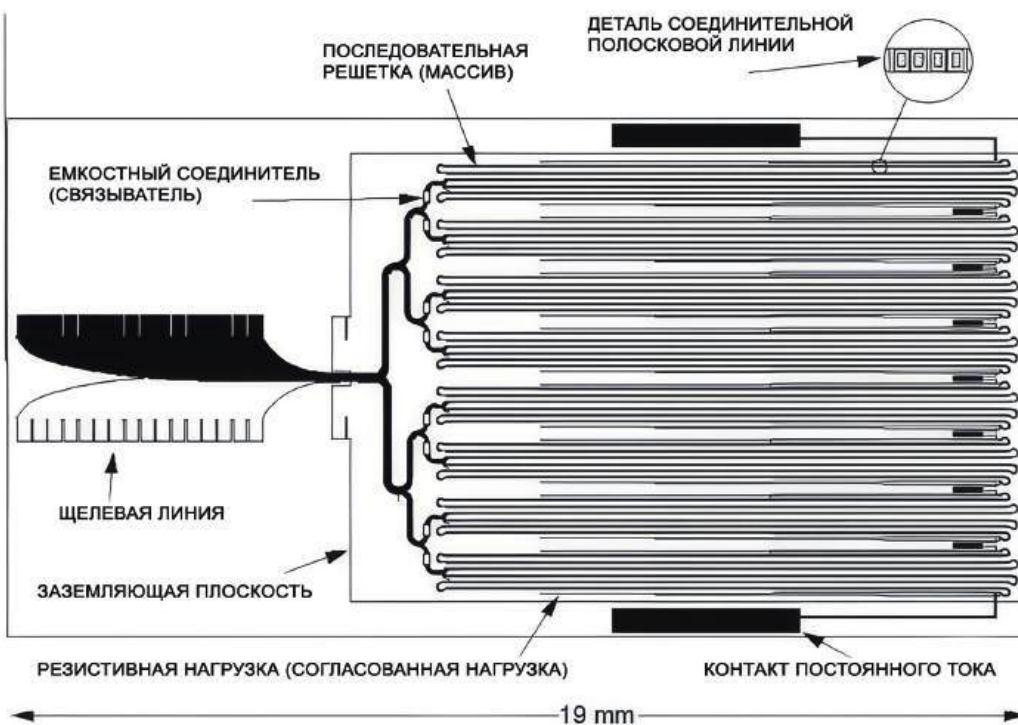
Первым стационарный эффект Джозефсона экспериментально подтвердили Филип Андерсон и Джон Роуэлл в Bell Labs в 1963 году. В том же году Сидни Шапиро увидел нестационарный эффект (ступени Шапиро).

Джон Кларк — тот самый человек, который вскоре превратил предсказание Джозефсона в осязаемый инструмент. Например, еще во время работы над докторской диссертацией в Кембридже он создал сверхчувствительный вольтметр, который назвал SLUG (сверхпроводящий малоиндуктивный волновой гальванометр). Позже он



Квантование напряжения в джозефсоновском переходе. Источник: Richard William Moseley, «Focused Ion Beam Fabricated Non-equilibrium Superconducting Devices» (2000)

сконструировал вольтметр, способный измерять напряжение до 10 фемтовольт (10-15 вольт), что в 100 тысяч раз превосходило чувствительность приборов того времени. Его разработки легли в основу сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИД), которые уже в 1969 году начали применяться в геологоразведке. Джозефсоновский переход перевел понятие электрического напряжения в понятие частоты — величину, которую уже можно измерять с высочайшей точностью. Благодаря экспериментальным прорывам Кларка, нестационарный эффект Джозефсона лег в основу работы квантовых вольтметров, позволяющих измерять напряжение с погрешностью 0,0000001%. Более того, он предоставил самый точный на сегодняшний день



Чип современного эталона напряжения. Чтобы получить напряжение 1 или 10 Вольт, ученые соединяют на одном кристалле десятки тысяч джозефсоновских переходов в единую цепь. На микрофотографии часть цепи. Источник: EE483597 / wikimedia commons / CC BY-SA 3.0

метод воспроизведения единицы электрического напряжения — вольта — через фундаментальные константы.

Старые эталоны вольта основывались на нестабильных электрохимических элементах (нормальный элемент Вестона), которые «старели», зависели от температуры и давления. Кларк и другие исследователи показали, что если облучить джозефсоновский переход микроволновым излучением с очень стабильной и точно известной частотой f (например, от атомных часов), то на его вольт-амперной характеристике появятся горизонтальные «ступени» напряжения, так называемые ступени Шапиро. Напряжение на этих ступенях будет квантоваться по формуле $V = n \times (h/2e) \times f$, где n — номер ступени, а h и e — постоянная Планка и заряд электрона.

Главная проблема была в том, что напряжение от одного перехода было очень маленьким, микровольтовым. Чтобы получить 1 вольт, нужно было соединить в последовательную цепь тысячи джозефсоновских переходов, заставить их всех работать синхронно и облучить их микроволнами так, чтобы все они «встали» на одну и ту же ступеньку напряжения. Естественно, Кларк стал одним из пионеров технологии создания таких массивов.

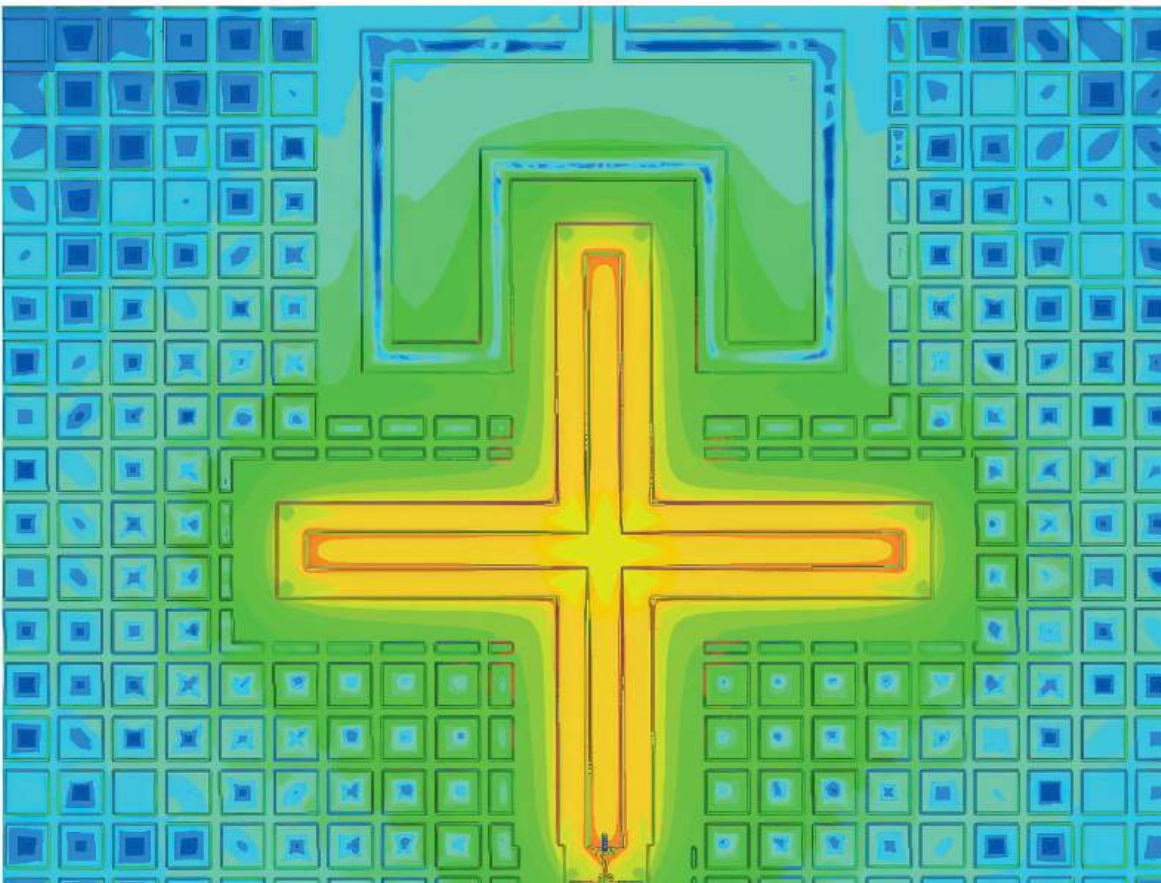
Это измерение было настолько надежным, что вошло в набор ключевых экспериментов, которые комитет по данным Международного совета по науке (CODATA) использовал для вычисления фундаментальных физических констант. А с 1990 года именно таким методом задавался стандарт вольта в Международной системе единиц (СИ), хотя фактически он привязывал единицу измерения напряжения к постоянной Джозефсона, а не к амперу и секунде — базовым единицам СИ. После реформы СИ 2019 года джозефсоновский стандарт напряжения перестал быть определением вольта, но остался его лучшей практической реализацией — эталон вольта и впредь воспроизводится в лабораториях этим методом.

ОТ ЭФФЕКТОВ К КУБИТАМ

Чтобы получить хороший кубит, необходимо решить две фундаментальные проблемы. Первая — добиться того, чтобы у него было ровно два изолированных состояния для кодирования информации. Вторая, не менее важная, — защитить его хрупкое квантовое состояние от разрушительного воздействия окружающей среды, известного как декогеренция.

С точки зрения электротехники ключ к решению первой проблемы лежит в джозефсоновском

X-МОН



Распределение электрического поля внутри трансмона с крестообразной емкостью. Источник: Елена Егорова, МФТИ

контакте. Он ведет себя не как обычная катушка с постоянной индуктивностью, а как нелинейная индуктивность, значение которой зависит от протекающего тока. Именно этот физический эффект открыл дорогу к созданию сверхпроводниковых кубитов.

Представим себе обычный LC-контур, аналог простых качелей в электронике. В этой схеме из катушки и конденсатора энергия постоянно перетекает от электрического поля к магнитному и обратно. Если такой контур охладить до сверхнизких температур, его энергия начнет квантоваться, образуя дискретные уровни, словно ступеньки лестницы. Можно было бы сказать, что нижняя ступенька — это состояние $|0\rangle$, а следующая — $|1\rangle$. Но здесь возникает сложность: в такой системе все «ступеньки» находятся на одинаковом расстоянии друг от друга. Это гармонический осциллятор. Если попытаться подтолкнуть систему с уровня $|0\rangle$ на $|1\rangle$ микроволновым импульсом, то с той же легкостью она перейдет с $|1\rangle$ на $|2\rangle$, и так далее. Изолировать только два нужных состояния не получится. Решением стало использование джозефсоновского перехода вместо обычной катушки. Его нелинейность делает энергетическую «лестницу» неравномерной. Теперь расстояние между уровнями $|0\rangle$ и $|1\rangle$ отличается от расстояния между $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Это позволяет настроить микроволновый импульс на совершенно определенную частоту, которая будет резонансной только для перехода $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$, не затрагивая другие уровни. Однако даже создав идеальную двухуровневую систему, мы сталкиваемся с проблемой декогеренции. Источников шума, разрушающего квантовое состояние, множество. Это и случайные флуктуации электромагнитных полей, и остаточные тепловые колебания в материалах чипа, и микроскопические дефекты на его поверхности, где случайные заряды создают помехи. Даже высокоэнергетические частицы из космоса или шум от самой управляющей аппаратуры могут привести к потере информации. Первые поколения сверхпроводящих кубитов, зарядовые и фазовые, были особенно чувствительны к малейшим флуктуациям, и время их когерентности было крайне малым.

И тут на сцену выходит трансмон — блестящая идея ученых из Йельского университета во главе с Мишелом Деворе и Робертом Шелкопфом. К джозефсоновскому переходу они просто добавили очень большую емкость. Это было простое решение, но оно дало грандиозный эффект. Большая емкость делает кубит почти нечувствительным к зарядовому шуму. Да, уровни становятся немного менее «неровными», но выигрыш во времени когерентности оказался колоссальным. Именно трансмон стал тем

самым сверхпроводящим кубитом, который сегодня используется по всему миру.

Но одной идеи мало — ведь вам нужен работающий прибор. А этой проблемой занимался уже Джон Мартинис. Его команда в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре внесла ключевой вклад в инженерное развитие трансмонов. Среди блестящих инженерных решений и достижений команды Мартиниса следует особенно отметить знаменитую крестообразную (X-образную) геометрию трансмона. Она позволила легко соединять кубиты друг с другом на чипе и индивидуально управлять каждым из них. Группой Мартиниса были созданы сложнейшие системы микроволновых линий для отправки точнейших импульсов, которые переводят кубит в нужные состояния, и специальные резонаторы для считывания результата.

А когда Мартинис освоил мастерство создания безупречных кубитов, перед Деворе и его группой встала следующая, не менее сложная задача: как превратить этот набор отдельных квантовых элементов в работающую, взаимосвязанную схему? Просто иметь хорошие кубиты было недостаточно — их нужно было заставить «общаться» друг с другом.

Прорыв Деворе состоял в разработке сверхпроводящей схемотехники. Они не стали изобретать велосипед, а адаптировали для своих целей мощнейший инструмент из арсенала атомной физики, разработанный еще в 1980-х годах. Идея атомных физиков заключалась в следующем. Чтобы заставить очень хрупкий и чувствительный атом сильно взаимодействовать со светом (фотоном), нужно создать для них особые условия. Для этого атом помещают в «зеркальную коробку» — резонатор с почти идеальными отражающими стенками. Попавший внутрь фотон не улетает, а оказывается в ловушке, многократно отражаясь и снова и снова пролетая мимо атома. Это многократное «общение» резко усиливает их взаимодействие, позволяя точно измерять состояние атома и управлять им. Эта методика оказалась настолько фундаментальной для понимания и управления квантовыми системами, что ее создатель Серж Арош в 2012 году получил за нее Нобелевскую премию.

Деворе понял, что этот принцип — усиление взаимодействия через резонатор — идеально подходит для мира сверхпроводниковых схем. Их резонатор стал своего рода «квантовой шиной» или общей переговорной комнатой, где запертый микроволновый фотон мог служить посредником, передавая информацию между разными кубитами. Таким образом, команда Деворе заменила атом на сверхпроводящий кубит, а «зеркальную коробку» — на микроскопический резонатор на чипе, перенеся эту идею из вакуум-

ных установок в твердотельную электронику. Резонатор действует как фильтр, защищая хрупкий кубит от большинства внешних шумов, пропускает нужные для работы сигналы и используется для управления кубитом, а также считывает сигнал за счет того, что изменение состояния кубита изменяет резонансную частоту.

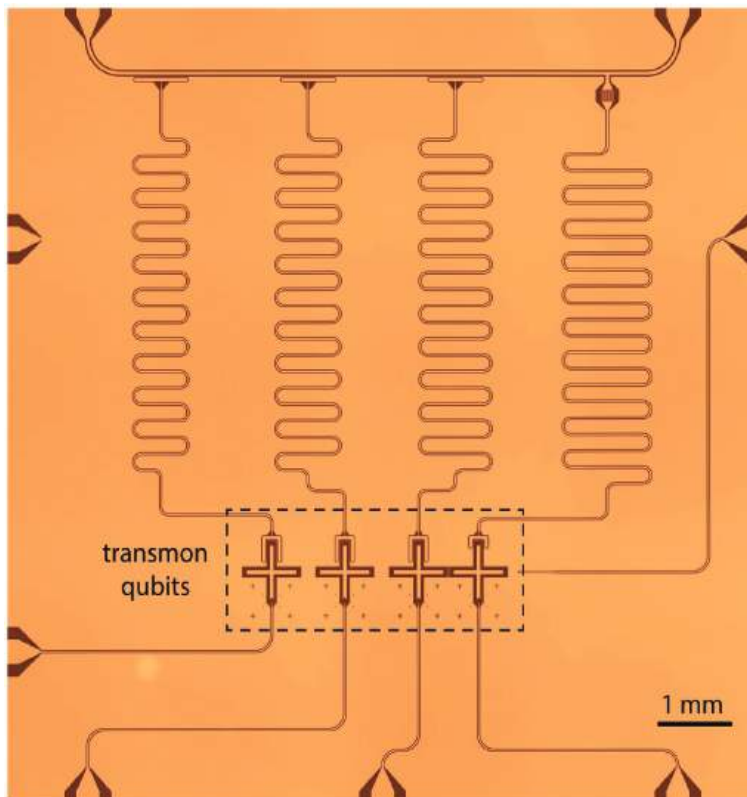
КВАНТОВЫЕ МАШИНЫ

История о сверхпроводящих схемах была бы неполной без упоминания еще одного направления, где технологии, отточенные при создании кубитов, нашли неожиданное применение. Речь идет о попытках создать «кота Шрёдингера» — перевести в состояние квантовой суперпозиции не просто электрический сигнал, а реальный макроскопический физический объект.

В 2010 году команда ученых из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре совершила исторический прорыв, который журнал Science назвал прорывом года. В группе, возглавляемой профессорами Эндрю Клеландом и Джоном Мартинисом, аспирант Аарон О'Коннел впервые в истории смог продемонстрировать квантовое поведение объекта, видимого невооруженным глазом.

Команда создала крошечный механический резонатор — микроскопическую «качельку» из пьезоэлектрического материала. Ее охладили до основного квантового состояния (полного «покоя») и затем управляли ее состоянием на уровне отдельных квантов вибрации (фононов).

На фотографии микрочипа видны четыре сверхпроводящих кубита-трансмона (крестообразные структуры в центре). Каждый кубит помещен внутрь индивидуального микроволнового резонатора (длинные извилистые линии).
Источник изображения: T. E. Roth et al., arXiv:2106.11352 [2021]



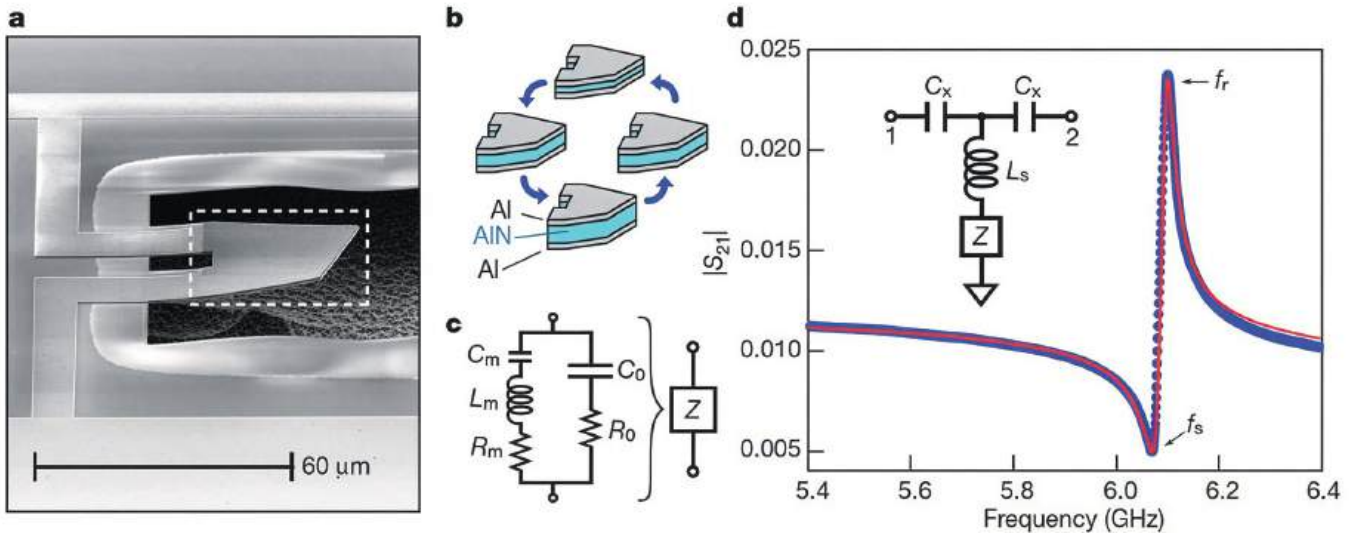
Резонатор Клеланда был электрически соединен со сверхпроводящим фазовым кубитом. Тот работал сверхчувствительным манипулятором и измерительным прибором. Сначала О'Коннел с помощью кубита убедился, что резонатор остыл до своего основного состояния $|0\rangle$. Затем, переводя кубит в состояние суперпозиции $(|0\rangle + |1\rangle)$, он передал это состояние механическому резонатору. Резонатор был специально спроектирован так, чтобы частота его колебаний совпадала с частотой перехода кубита между состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Это обеспечило возможность передачи квантового состояния от кубита, который был электрически соединен с резонатором.

После получения состояния от кубита микроскопическая «качелька», состоящая из триллионов атомов, одновременно и вибрировала, и находилась в состоянии покоя. Чтобы доказать, что макроскопический резонатор действительно находился в квантовой суперпозиции, ученые использовали тот же кубит, но уже в качестве измерительного прибора — состояние резонатора считывалось путем наблюдения за кубитом. После того как состояние было передано резонатору, его на короткое время оставили «эволюционировать» самостоятельно. Затем связь между резонатором и кубитом восстановили, и состояние резонатора было передано обратно на кубит. Измерив конечное состояние кубита, ученые смогли восстановить информацию о том, в каком состоянии находился резонатор в промежуточный момент времени. Многократное повторение этого эксперимента с последующим измерением состояния кубита позволило с высокой точностью охарактеризовать состояние резонатора и подтвердить, что оно обладало всеми признаками квантовой суперпозиции: резонатор не просто случайным образом то колебался, то покоился, а находился в обоих этих состояниях одновременно.

Это был первый случай, когда макроскопический объект удалось подчинить квантовым законам. Эксперимент открыл целое новое поле исследований — квантовую электромеханику, где сегодня создаются, например, сверхчувствительные датчики для поиска темной материи.

В НАЧАЛЕ ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

К середине 2010-х годов стало ясно, что сверхпроводниковые кубиты — не просто лабораторная экзотика. Технология, отточенная Мартинисом и Деворе, достигла уровня, при котором дальнейшее развитие требовало колоссальных инженерных и финансовых ресурсов. Академические лаборатории работали на пределе своих возможностей. Нужны



Первая в мире квантовая машина. На микрофотографии (а) показан микроскопический механический резонатор. Схема (b) показывает его внутреннюю структуру из пьезоэлектрика, которая позволяет связывать механику и электричество. Источник: O'Connell, A., Hofheinz, M., Ansmann, M. et al. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. Nature 464, 697–703 [2010]

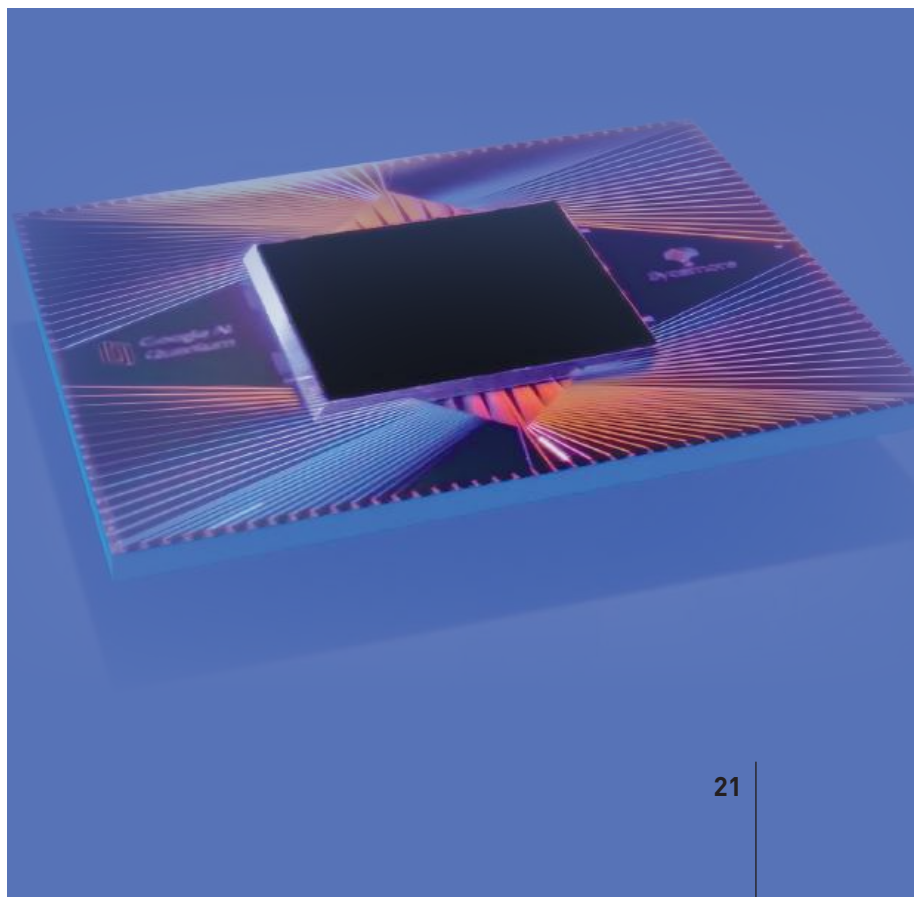
были целые команды инженеров по микроэлектронике, программистов, специалистов по криогенике. И в 2010-е, как только ИТ-бизнес потеснил нефтяников и финансистов на вершине рыночной капитализации, эти ресурсы нашлись — а мир вступил в эпоху «квантовой гонки».

К 2014 году группа Мартиниса была абсолютным лидером в создании качественных и стабильных многокубитных систем. Они не просто публиковали статьи о системах из двух-трех кубитов; они строили чипы с пятью, а затем и девятью кубитами, демонстрируя рекордно низкие уровни ошибок и длительное время когерентности. Они знали, как бороться с дефектами материалов, как проектировать сложные чипы и как калибровать их с ювелирной точностью.

В 2014 году Google нанял Мартиниса и заявил, что игры с квантовым отжигом закончились — они сами построят настоящий квантовый компьютер. Результатом этой работы стал процессор Sycamore, содержащий 54 кубита, построенных на технологии трансмонов Мартиниса в архитектуре, разработанной Деворе. В 2019 году в журнале Nature вышла статья, где Мартинис с коллегами заявили о достижении квантового превосходства: Sycamore за 200 секунд выполнил специфическую задачу по выборке случайных чисел, на которую, по их оценкам, у самого мощного на тот момент суперкомпьютера ушло бы 10 тысяч лет. Однако триумф 2019 года имел и обратную сторону. Вскоре после публикации знаковой статьи, весной 2020 года, Джон Мартинис покинул Google. Этот уход не был мирным и

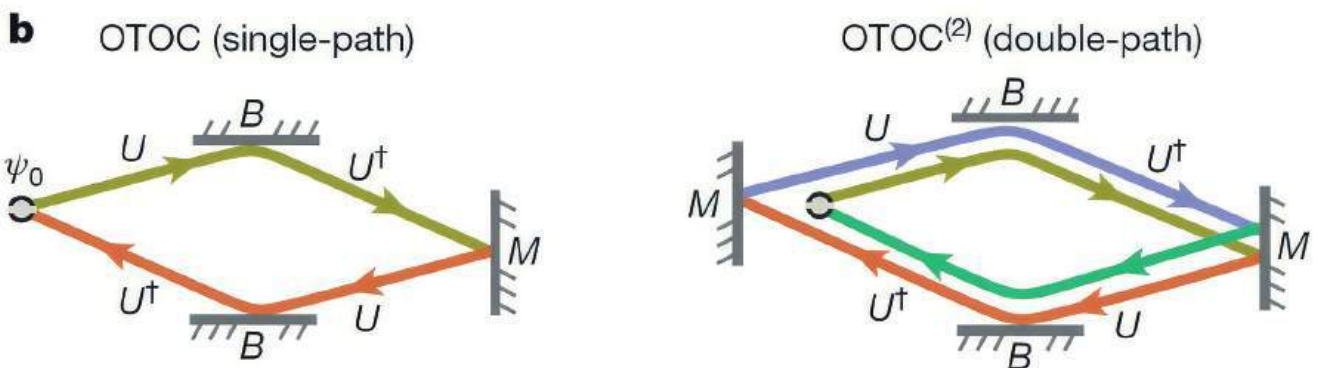
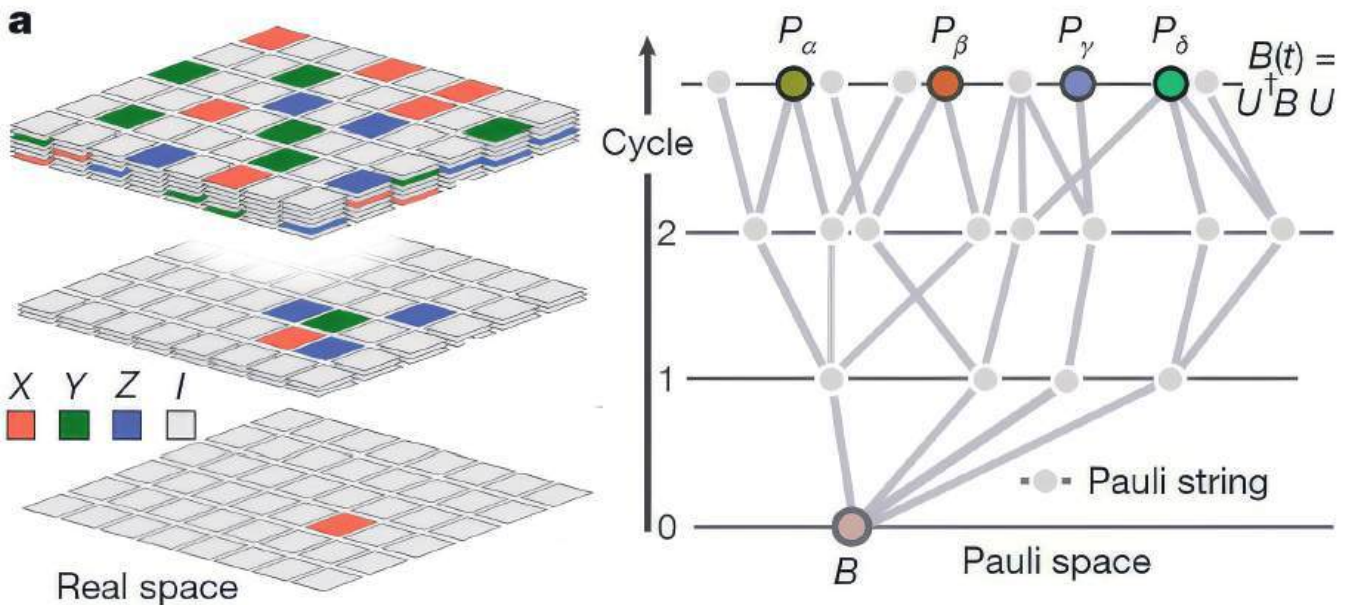
обнажил фундаментальный конфликт в стратегии развития квантовых технологий. Мартинис, как ученый-перфекционист, считал, что после демонстрации превосходства необходимо вернуться к основам и сосредоточить все силы на улучшении качества самих физических кубитов — снижении уровня ошибок еще на порядок. По его мнению, строить большие процессоры из текущих «шумных» кубитов было преждевременно. Руководство Google, напротив, стремилось быстрее двигаться вперед, масштабировать систему и искать практические применения для уже существующих, пусть и несовершенных,

Процессор Sycamore. Источник: Демонстрируя Quantum Supremacy / Google / Youtube

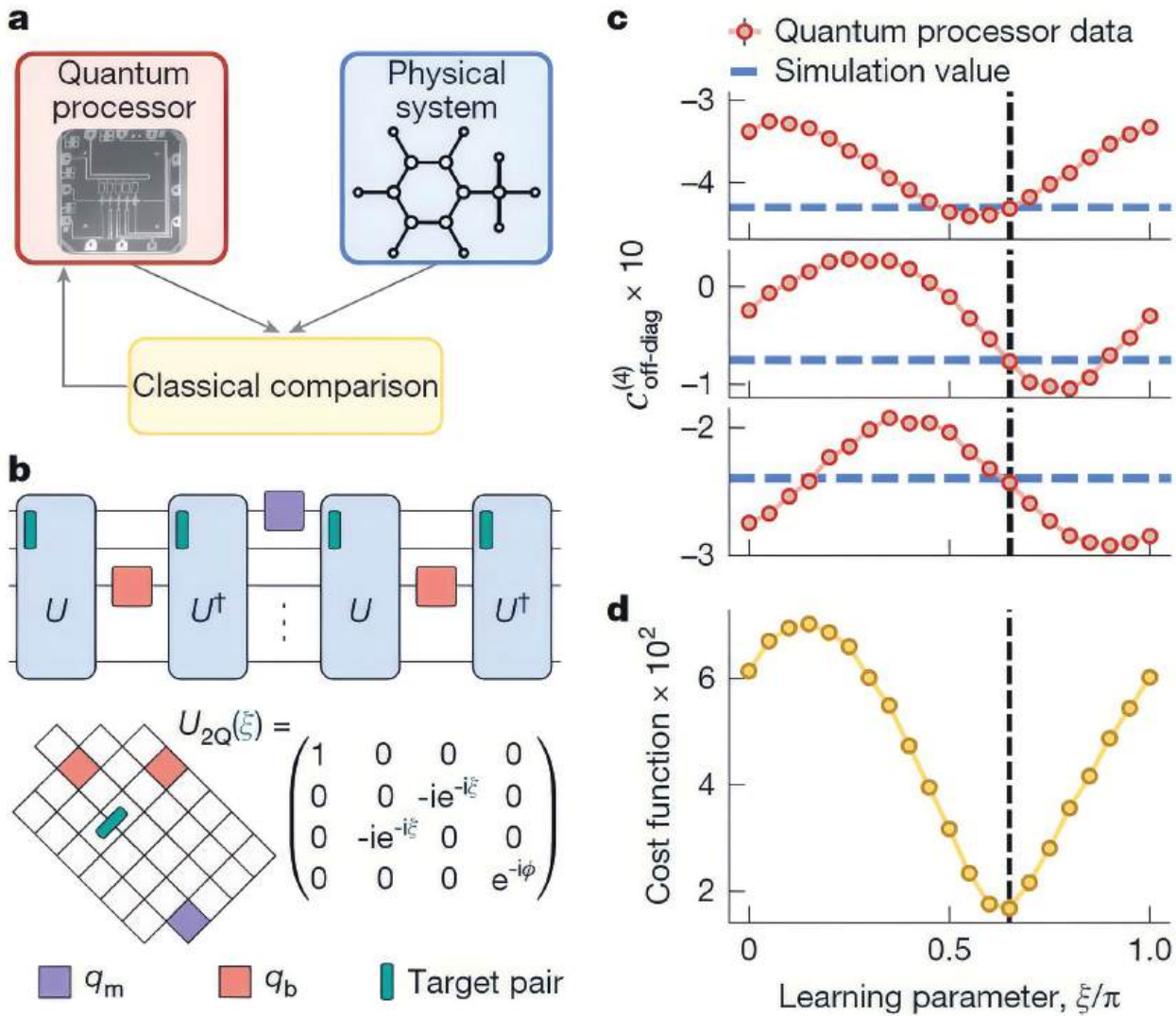


технологий эры NISQ (зашумленных квантовых компьютеров). Этот конфликт — «качество против количества» — привел к тому, что пути Мартиниса и Google разошлись. Несмотря на это, его наследие неоспоримо. Именно команда под его руководством создала аппаратную платформу, которая впервые в истории доказала, что квантовые вычисления — не просто теория. На замену Мартинису в Google в 2023 году вышел Деворе, который все то время, что создавался Sycamore, оставался профессором в Йельском университете. Главный вызов, стоящий сегодня перед всем сообществом, — квантовая коррекция ошибок. Может показаться, что проблема декогеренции актуальна только для твердотельных систем, но она остается ключевой даже для квантовых ловушек. Несмотря на высочайшую степень изо-

ляции удерживаемых в вакууме ионов, абсолютной защиты достичь невозможно. Нестабильность полей, остаточное тепловое движение и случайные взаимодействия с окружением — все это становится источником шума, который разрушает когерентность и мешает вычислениям. Однако недавние прорывы, подобные работе команды Google Quantum AI, показывают, что путь к полезным квантовым вычислениям не обязательно лежит исключительно через создание идеального, защищенного от ошибок компьютера. Возникает новая парадигма: вместо того чтобы просто бороться с шумом, можно научиться его «обманывать». Исследователи продемонстрировали, что с помощью изощренных протоколов можно заставить квантовую систему самостоятельно отфильтровывать хаотичные флуктуации и усилить полезный, содержательный сигнал.



Слева изображен однопутевой протокол (ОТОС), где квантовая система эволюционирует вперед во времени (U), подвергается локальному воздействию (B), после чего ее эволюция обращается вспять (U^\dagger) и производится измерение (M). Справа – ключевой для исследования двухпутевой протокол (ОТОС⁽²⁾), где эта последовательность повторяется дважды. Источник: Google Quantum AI and Collaborators. Nature (2025)



Квантовый процессор находит правильную настройку для сложной квантовой системы. Экспериментальные сигналы, полученные на процессоре (цветные точки), сравниваются с целевыми значениями (синие линии) для определения скрытого параметра. Все измерения безошибочно сходятся в одной точке (пересечение с пунктиром), демонстрируя решение практической научной задачи
 Источник: Google Quantum AI and Collaborators. Nature (2025)

Используемые ими квантовые протоколы создают два «пути» для распространения информации, которые могут интерферировать друг с другом, чтобы отфильтровать случайный шум и усилить сигнал от скрытых квантовых корреляций.

Этот подход уже привел к впечатляющим результатам. Та же научная группа показала, что современный, пусть и «шумный», квантовый процессор способен решать специфическую, но важную научную задачу — извлекать скрытые параметры системы — эффективнее, чем самые мощные классические суперкомпьютеры. Это и есть демонстрация практического квантового преимущества, достигнутого не в далеком будущем, а здесь и сейчас.

Они поставили эксперимент по определению параметров неизвестного гамильтониана кван-

товой системы. Сбор и анализ экспериментальных данных на квантовом процессоре для одного сложного варианта схемы занял 2,1 часа. Ученые оценили, что самый мощный суперкомпьютер в мире решал бы эту задачу 3,2 года. Это означает, что квантовый процессор из 65 кубитов справился примерно в 13 тысяч раз быстрее.

Таким образом, сегодня в квантовой гонке формируются два параллельных, но взаимодополняющих трека. Первый — марафон по созданию логических кубитов, отказоустойчивых информационных единиц, состоящих из тысяч объединенных и постоянно проверяющих друг друга физических кубитов.

Второй — серия спринтов, в которых ученые и инженеры учатся использовать существующие, несовершенные процессоры как инструменты для решения задач, недоступных классическому миру.



Сусуму Китагава, Ричард Робсон и Омар Яги
Источник: NobelPrize

КТО СМОГ СДЕЛАТЬ МОК

Александра Борисова

НОБЕЛЕВСКУЮ ПРЕМИЮ ПО ХИМИИ ПРИСУДИЛИ ЗА СОЗДАНИЕ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ (МОКОВ, ПО-АНГЛИЙСКИ – METAL-ORGANIC FRAMEWORKS, MOF) – НОВОГО КЛАССА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЪЕДИНЯЮЩИХ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ОБЛАДАЮЩИХ РЕКОРДНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ. ЛАУРЕАТАМИ СТАЛИ СУСУМУ КИТАГАВА ИЗ ЯПОНИИ, РИЧАРД РОБСОН ИЗ АВСТРАЛИИ И АМЕРИКАНЕЦ ОМАР ЯГИ.

ЗАЧЕМ НУЖНЫ ПОРЫ?

Трехмерные пористые материалы — феномен, взятый человеком у природы. Самый широко известный и используемый класс таких соединений — цеолиты, или алюмосиликаты. Это трехмерные сита, состоящие из металла, оксидов алюминия (основной компонент глины) и кремния (а это песок) и воды, их общая формула $Me_{x/n} [Al_x Si_y O_{2(x+y)}] \times zH_2O$. В каркасе из этих оксидов находятся полости, частично занятые молекулами воды и обеспечивающие большую **внутреннюю поверхность**. Это свойство интересно для катализа в нефтехимии и органической химии, хранения и разделения газов, очистки воды, например именно



Внутренняя поверхность — это как будто мы взяли кусок бумаги, скомкали его и плотно-плотно сжали: внешняя поверхность материала стала очень маленькой, но внутри она осталась такой же большой, как была, и с точки зрения химии продолжит работать как поверхность, а не как объем вещества

цеолитами чистят воздух на МКС. Таким же образом работает и обычный активированный уголь: у него структура слоистая (в отличие от трехмерных цеолитов) и «гости» — газы или растворители — в таком случае встраиваются между слоями (есть и другие соединения такого типа, однако они дороже угля). До сих пор для таких задач сорбции и катализа подходили только именно такие классические неорганические материалы. Они, однако, однообразны и мало поддаются контролируемой модификации. Это общее свойство неорганических соединений, их на порядки и порядки меньше, чем органических. Это связано с тем, что углерод — единственный (за редкими и не меняющими суть исключениями) элемент, который может образовывать разные связи сам с собой: формировать цепочки, кольца, листы, сетки, каркасы, в общем что угодно. У неорганических соединений гораздо меньше разнообразия, и химикам сложнее добиться от них новых свойств. Металл-органические каркасы, за которые в 2025 году присуждена Нобелевская премия, — это трехмерные структуры, состоящие из координационных соединений. Они носят такое название, потому что состоят из одного (реже нескольких) атомов металла, который «сажает» на себя (в этом и заключается координация) органические молекулы (возможно, в комбинации с неорганическими). Связанные с металлом частицы называются лигандами, а связи между металлом и лигандами — координационными. Только как это сделать? В органической химии ученые довольно хорошо наловчились строить нужные им структуры точно и селективно, то есть получать в колбе только то, что нужно, а не целевой продукт и еще пять побочных, которые надо потом еще как-то отделять. За такие подходы вручены с десятков Нобелевских премий, самую свежую — клик-химию — дали в 2022-м. Теперь настала очередь координационной химии.

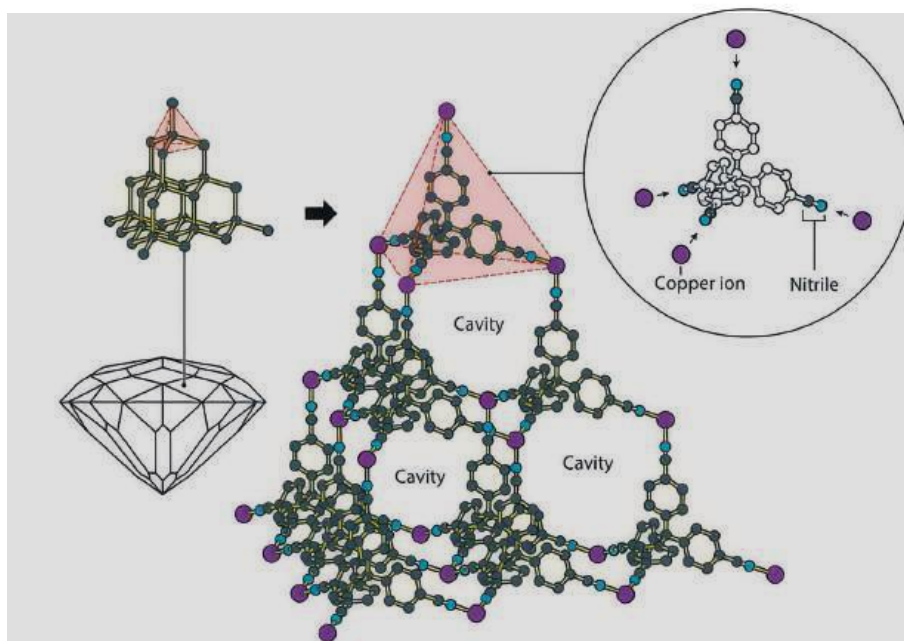
ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПУТИ

Ричард Робсон родился и учился в Англии, затем работал в США и осел в Австралии, где и выполнил свои основные работы. Он поставил перед собой непростую цель в конце 80-х годов: научиться собирать трехмерные координационные каркасы управляемо, как из лего. На тот момент консенсус состоял в том, что это невозможно: не будет никакой упорядоченной кристаллической структуры, а будет аморфный материал или нерегулярный полимер. Однако Робсону удалось вырастить **решетку** с большими полостями из комплекса одновалентной меди.



Когда химики говорят «решетка», они подразумевают не то, что мы видим на окне в тюрьме, а трехмерную структуру, что-то вроде стандартного панельного дома: у нее есть не только высота и ширина, но и глубина. Двумерные структуры химики называют сетками (этот термин более понятен, сети и правда плоские, то есть двумерные)

Выбор соединения был не случайным: Робсон вдохновлялся структурой алмаза, который образуется благодаря тому, что углерод образует четыре связи с собой. Робсон решил воспроизвести эту структуру из координационного соединения, поэтому он взял одновалентную медь (она тоже образует четыре связи, как раз тетраэдрические комплексы) и тетраэдрический же органический лиганд. Гипотеза сработала: у него получилось собрать «алмазную» структуру, где роль углерода в половине случаев играет медь, а в половине — объемный лиганд. На этом сходства заканчиваются: связи углерод-углерод в алмазе ковалентные и очень прочные. Координационные связи в комплексе Робсона гораздо более слабые, полости намного крупнее, а в полостях «сидели» растворитель и неорганический анион. Это было очень интересной, но бесполезной игрой ума: никакого применения каркасам с заполненными полостями не было, а удалить «гостей» из соединения было нельзя, да и вся структура бы от такого развалилась. Тем не менее Робсону удалось опровергнуть сложившийся консенсус о том, что сбор упорядоченных кристаллических металл-органических каркасов невозможен.



Структура алмаза и структура алмазоподобной решетки комплекса меди, полученного Робсоном. Источник: The Royal Swedish Academy of Sciences

Дело оставалось за малым: убрать из полостей «гостей» и сделать такие сети устойчивыми к температуре и разным средам. Тогда, теоретически, их можно было бы использовать там, где царили цеолиты.

«Если мы хотим создать открытую наноструктурированную архитектуру — такой многоквартирный дом, то нужно совместить координационные и ковалентные связи таким образом, чтобы ковалентные связи держали «стены», а координационные давали возможность развивать топологию. И вот сюда пришла координационная химия, когда строительными блоками стали комплексные соединения. Наличие металла позволяет делать очень разную топологию, потому что они образуют не четыре связи, как углерод, а больше. А из органического лиганда мы можем строить стены. МОК комбинирует невероятное многообразие органиче-

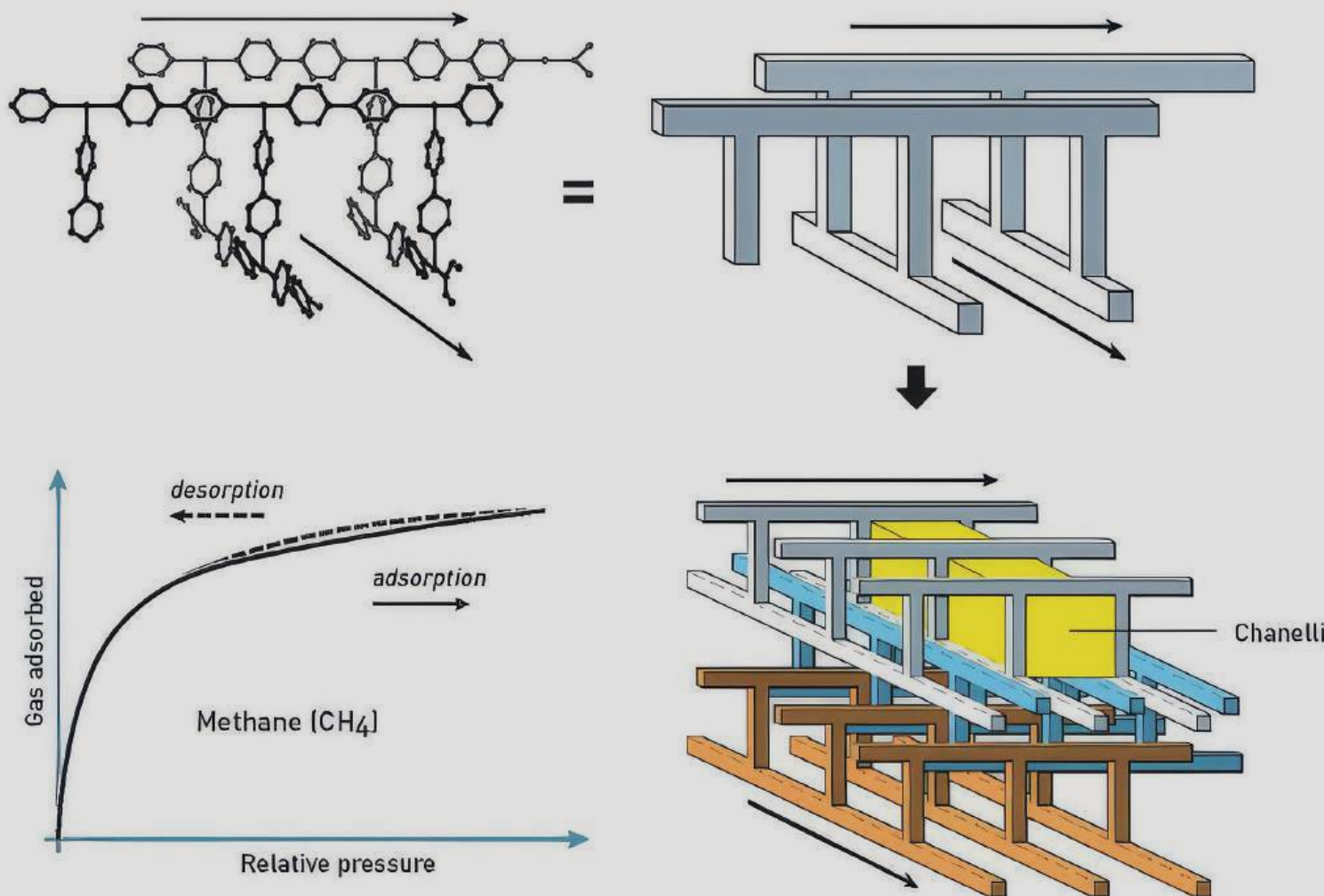
ской и координационной химии с возможностью создавать кристаллические материалы», — сказал Евгений Пидько, профессор Делфтского технического университета (Нидерланды).

Второй лауреат Сусуму Китагава, как он говорил в интервью Нобелевскому комитету, не стремился создать что-то обязательно полезное. Ему были интересны материалы с новыми, ранее не описанными свойствами. В Киотском университете (Япония), по его словам, уже были два нобелевских лауреата-химика (Кэнъити Фукуи и Акире Ёсино), поэтому там есть традиция ставить большие цели. В 1992 году он создал двумерную сетку на основе одновалентной меди, в полостях которой находились слабо связанные молекулы ацетона: это был пример подвижной гостевой молекулы внутри каркаса, в отличие от «гостей» в комплексе, полученном Робсоном.

В 1997 году его группа получила уже трехмерные решетки на основе комплексов кобальта, никеля и цинка с органическим лигандом, которые сохраняли свою структуру после удаления воды из полостей. Они оказались способны сорбировать метан, азот и кислород, сохраняя оригинальную форму и устойчивость. Но его работа поначалу все равно не вызвала энтузиазма у коллег, которые не поняли, чем новые структуры лучше цеолитов. Но это лишь подогрело энтузиазм Китагавы.

«Когда несколько людей говорят, что это невозможно, так в реальной жизни не бывает, у меня появляется очень сильная мотивация. Сильная мотивация создать новые материалы», — сказал он в блиц-интервью, которое давал Нобелевскому комитету в день объявления премии.

В 1998 году он показал, что металл-органические каркасы могут



быть мягкими и гибкими благодаря своим координационным связям, а это открывает перед химией принципиально иные возможности: неорганические каркасы не могут менять ни форму, ни размер, а соединения Китагавы могли. Приближался звездный час МОКов, и он связан с именем третьего лауреата: Омара Яги.

Яги родился в семье палестинских беженцев в Иордании. Он рассказывает, что увлекся химией, когда открыл книгу в библиотеке, а в США его отправил учиться в 15 лет отец. Вся его дальнейшая история связана с США, где он выучился, защитился и начал научную карьеру. Он тоже лелеял идею найти новые методы, чтобы создавать новые, дизайнерские материалы управляемо, как из «лего». Параллельно с группой Китагавы в середине 90-х ему удалось создать устойчивые при нагревании двумерные каркасы для молекул-гостей. В 1995 году он опубли-

ковал статью в *Nature*, где впервые употребил термин «металл-органические каркасы».

«Металл-органические каркасы — это наиболее известный подкласс семейства координационных полимеров. В зависимости от того, сколько связей могут образовывать металл и лиганд, в кристалле могут образовываться одномерные цепи (линейные, зигзагообразные и спиральные), двумерные сетки (непересекающиеся и взаимопересекающиеся) и трехмерные каркасы (непересекающиеся и взаимопересекающиеся). МОКи — это последнее», — объясняет Сергей Вацадзе, заведующий лабораторией супрамолекулярной химии ИОХ РАН, профессор химического факультета МГУ.

Отработав технологию, Яги решил к получению структур со свойствами, превосходящими известные неорганические аналоги. В 1999 году он опубликовал работу по MOF-5, это каркас, который оказался устойчивым к нагреванию и очень-очень пористым: его газопоглощающие свойства сильно превзошли существовавшие цеолиты. «Оказался» может звучать не очень научно, но факт в том, что в 1999 году синтез МОКов был весьма неточной, эмпирической наукой. Методы моделирования не могли работать с трехмерными структурами такой сложности.

«Есть примеры МОКов, у которых поверхности 7 тысяч квадратных метров на грамм, это недостижимо ни для одного неорганического или органического соединения», — говорит Евгений Пидько.

В начале нулевых Яги показал, что этот каркас можно модифицировать, увеличивая или уменьшая полости — их размер зависит от органического лиганда, который используется в решетке. А управляя размером полости, можно менять ее функции: решить, какой газ хочется сорбировать, а какой пропускать, например. Молекулы газов отличаются размерами, и, варьируя полость, можно задать ее под конкретного «гостя».

Так и свершилась революция: дизайнерские сорбционные материалы стали реальностью. Техникой начали пользоваться другие лаборатории, вокруг МОКов собралось целое комьюнити ученых, а Яги с конца нулевых стал одним из самых цитируемых в мире химиков — *Clarivate Analytics* называли его и Китагаву претендентами на Нобелевскую премию по цитируемости 15 лет назад, в 2010 году.

ЧТО ОНИ УМЕЮТ?

Одним из первых применений МОКов называют сорбцию и газоразделение. Сила дизайнерских материалов в том, что они могут эффективно разделять газы с близкими свойствами.

«У меня была работа, где мы теоретически показывали, почему возникает такая большая селективность отделения на МОКах углекислого газа от других газов, например азота», — рассказал Евгений Пидько. — В начальном состоянии МОК имеет очень маленькие поры, а когда входят молекулы газа, эти поры «раскрываются». Он может адаптироваться под те вещества, которые в него заходят, и за счет этого можно получать селективность разделения, которая невозможна на статических материалах, например разделять этилен и этан. Сейчас на такое разделение тратится много энергии, так как их разделяют дистилляцией по разнице температуры кипения, а МОКи могут сделать это низкозатратно». Расцвет МОКов в США совпал с модой на водородную энергетику, поэтому исследователи МОКов, конечно, обещали складировать и водород. Но спустя 15 лет мы все-таки ездим на электрических, а не водородных машинах, и перспективы такого применения по-прежнему не очевидны. Нередко говорили и еще об одной, модной до недавнего времени области применения — улавливание CO₂ для ограничения парниковых выбросов. Предыдущие американские администрации щедро спонсировали все, что обещало хоть какое-то решение проблемы с

Схема открытых каналов в решетках комплексов, полученных Китагавой
Источник:
The Royal Swedish Academy of Sciences

климатом, пусть и умозрительное, а у новой администрации другие взгляды на эту проблему. Однако даже не беря в расчет политику, учитывая масштабы задачи, улавливать углекислоты с помощью недешевого дизайнерского материала не выглядит реалистичным. То же касается и очистки воды — МОК тут конкурирует с углем, который справляется неплохо, а стоит гораздо меньше.

«Все думали, что МОКи будут применяться в катализе, но там тоже важно, чтоб было очень дешево», — признает Евгений Пидько.

В общем, внедрение МОКов в народное хозяйство пока хромает. Авторы обзора для *Nature Materials* конца 2024 года пишут, что для успеха нужно больше совместных усилий ученых, инженеров и инвесторов. Самые крупные производства — несколько сотен тонн в год — сейчас у BASF и NuMat Technologies. Чтобы представить потенциальные масштабы рынка катализаторов, приведем в пример катализатор полимеризации Циглера-Натты (Нобелевская премия 1963 года) — в 2023-м его производство составляло 185 тысяч тонн.

Для некоторых применений, впрочем, цена не имеет значения. «У лаборатории профессор Мирча Динка из MIT есть патент совместно с Lamborghini на суперконденсаторы на МОКах. Им, очевидно, не так важно, сколько эти материалы стоят», — заметил доцент кафедры химической физики функциональных материалов МФТИ Валентин Новиков.

Самым же красивым применением, которое упоминает и Нобелевский комитет, выглядит эксперимент Яги 2019 года по получению воды из воздуха в пустыне. Ночью МОК впитывал влагу из воздуха, а днем отдавал ее при нагревании. Тогда комьюнити МОКов заговорило о том, что вот сейчас-то они и выйдут на рынок.

«Недавнее исследование рынка предсказало, что продажи МОКов для практического применения, в

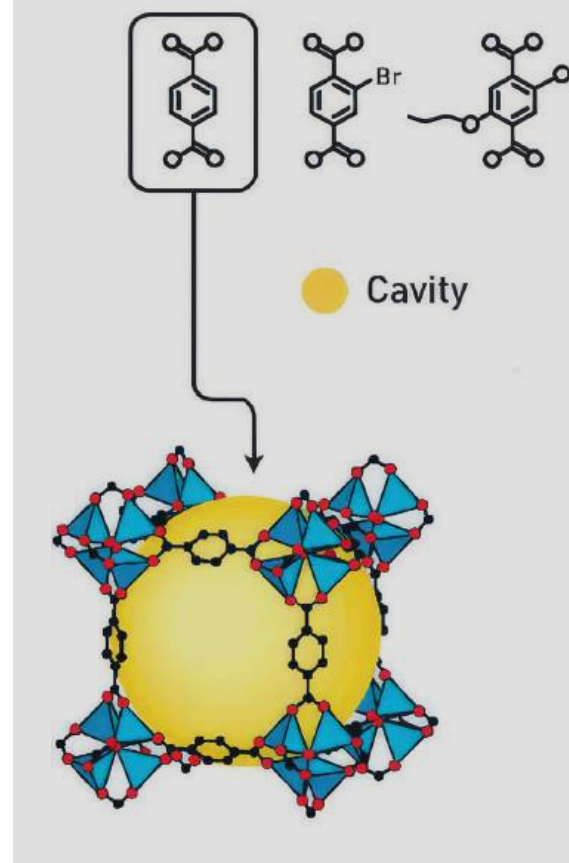
том числе для хранения и обнаружения газов, в ближайшие пять лет взлетят до \$410 млн в год с \$70 млн в этом году», — писал тогда журнал *Science*. Прошло шесть лет, и довольно сложно понять, сбывались ли этот прогноз. Разные источники дают как разные цифры объема рынка: от очень скромных \$38,89 млн до почти невероятных \$840,57 млн, так и разные прогнозы на начало 2030-х — от \$135,4 млн до \$2,2 млрд. Один самый щедрый прогноз 2025 года сулит к 2035-му триллионы долларов. Правда, в том же материале говорится: «Несмотря на то что более 100 тысяч соединений МОКов синтезированы в лабораториях по всему миру, коммерческое внедрение остается очень ограниченным. Лишь горстка продуктов достигла коммерциализации».

МОК: ВЖУХ ИЛИ ПШИК?

В академической среде металл-органические каркасы тоже не у всех вызывают единогласный восторг. Причем сомнения вызывают как прикладная ценность, так и наукометрическая — выражаемая в цитируемости.

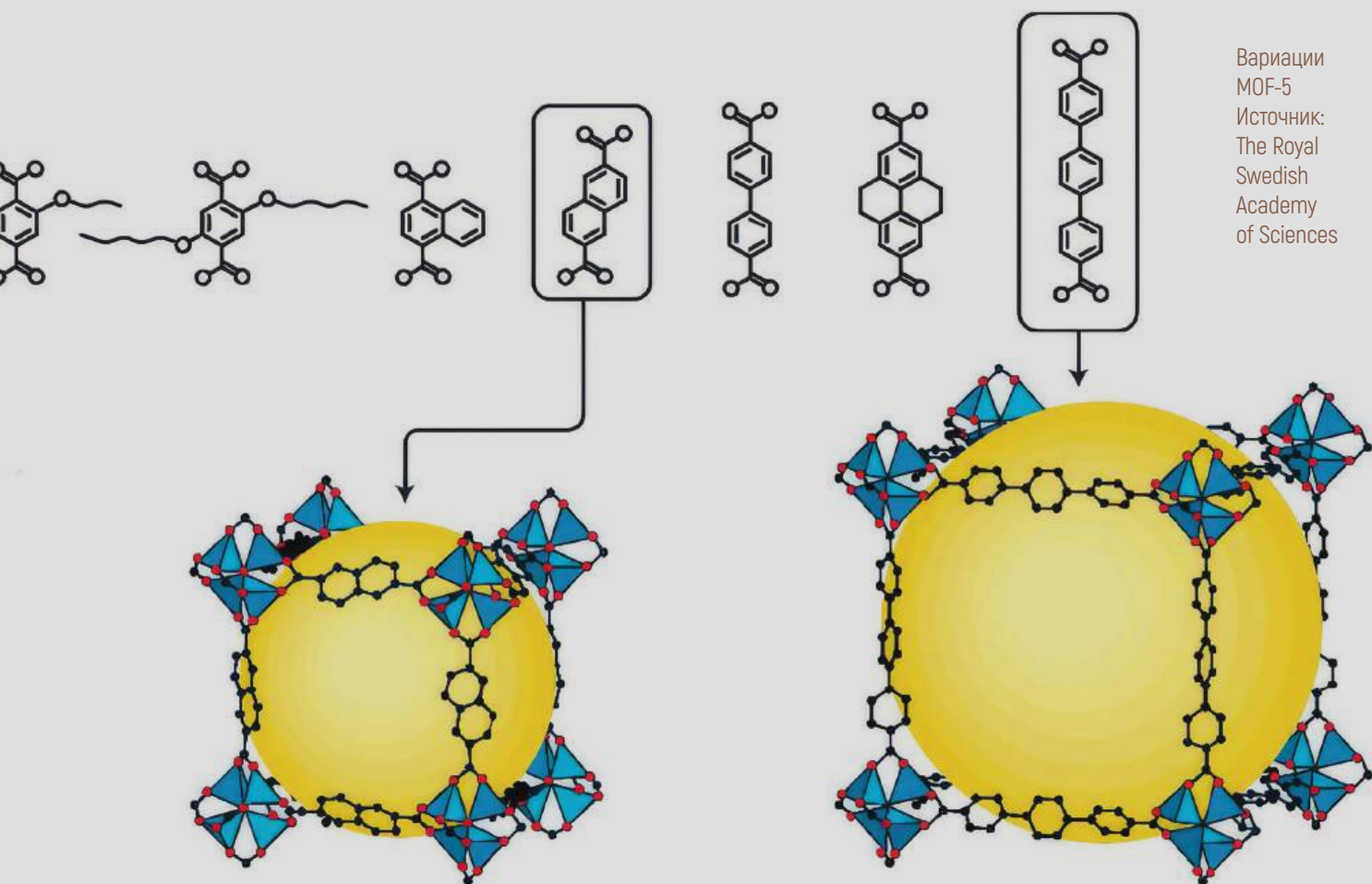
Проблема воспроизводимости методик в МОКах — предмет не только для дискуссий в научном твиттере, но и серьезных академических прений. Например, в журнале *Nature* в 2024 году вышла критическая статья «Воспроизводимость в исследованиях МОКов для наномедицины».

«Бурный рост исследований в этой области привел к отсутствию специализированной стандартизации ключевых синтетических и аналитических параметров (например, того, что представляет собой биосовместимый МОК). Я также повторяю призывы к тому, чтобы публикации сопровождалась архивацией исходных данных и подробными описаниями экспериментальных процессов и более полной характеристикой синтезированных материалов», — заключает ее автор Росс Форган из Университета Глазго, сам весьма успешно занимающийся синтезом МОКов.



Это сильное утверждение, учитывая, что в научной литературе принято высказываться мягче и нейтральнее, чем думать. По сути, Форган считает, что МОКи совершенно не готовы для применения на людях из-за ненадежности и непрозрачности методик и несоответствия стандартам безопасности, которые приняты (и необходимы) в медицине, причем авторы этих исследований, переживает Форган, не очень-то этим и озабочены.

Анонимный собеседник «За Науки» высказывается более жестко: «Это синтез “наудачу”. Люди растят кристаллы в 100 пробирках, в 99 получается порошок, в одной вырастает кристалл. И ученые говорят, что получили МОК, а иногда и детально объясняют, как они “спланировали” его получение, исходя из геометрии органических лигандов и координацион-



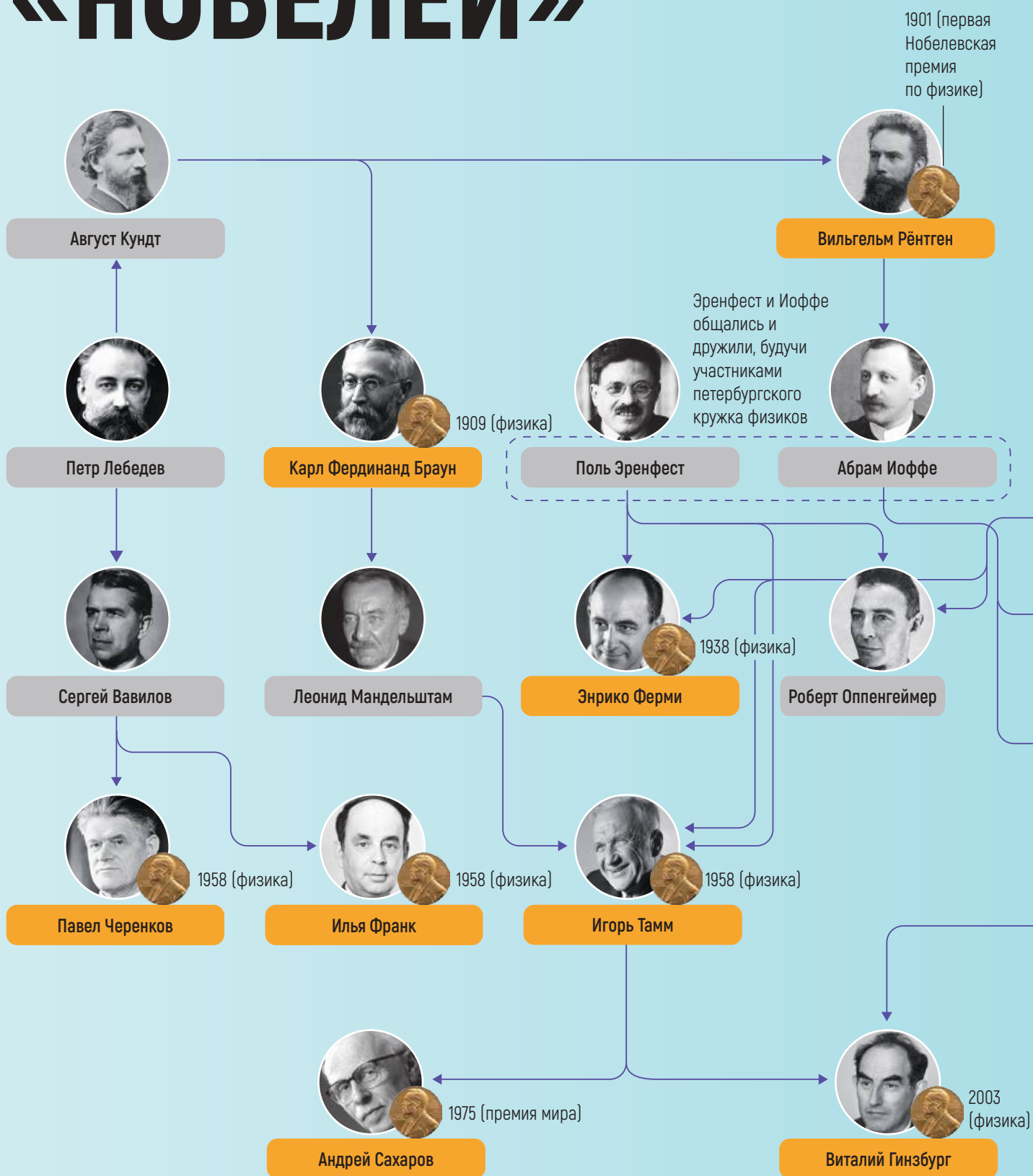
ных чисел металлов. Поскольку число неудачных попыток в статье как правило не попадает, то человеку со стороны трудно судить, надежно МОК получается или это случайность».

Эта претензия перекликается с дискуссией выше. Авторы утверждают, что управляют синтезом МОКов. Об этом говорил еще Робсон в своем первом синтезе, для которого он специально выбрал четырехвалентную медь. А теперь, конечно, на направленный дизайн МОКов с заданными свойствами брошена мощь машинного обучения. Но на деле оказывается, что успех эксперимента зависит от числа попыток, а не от четкости следования методике. Конечно, это верно не для всех МОКов, иначе BASF не смог бы наладить тоннажные производства. Но в целом репутация их несколько подмочена с разных сторон.

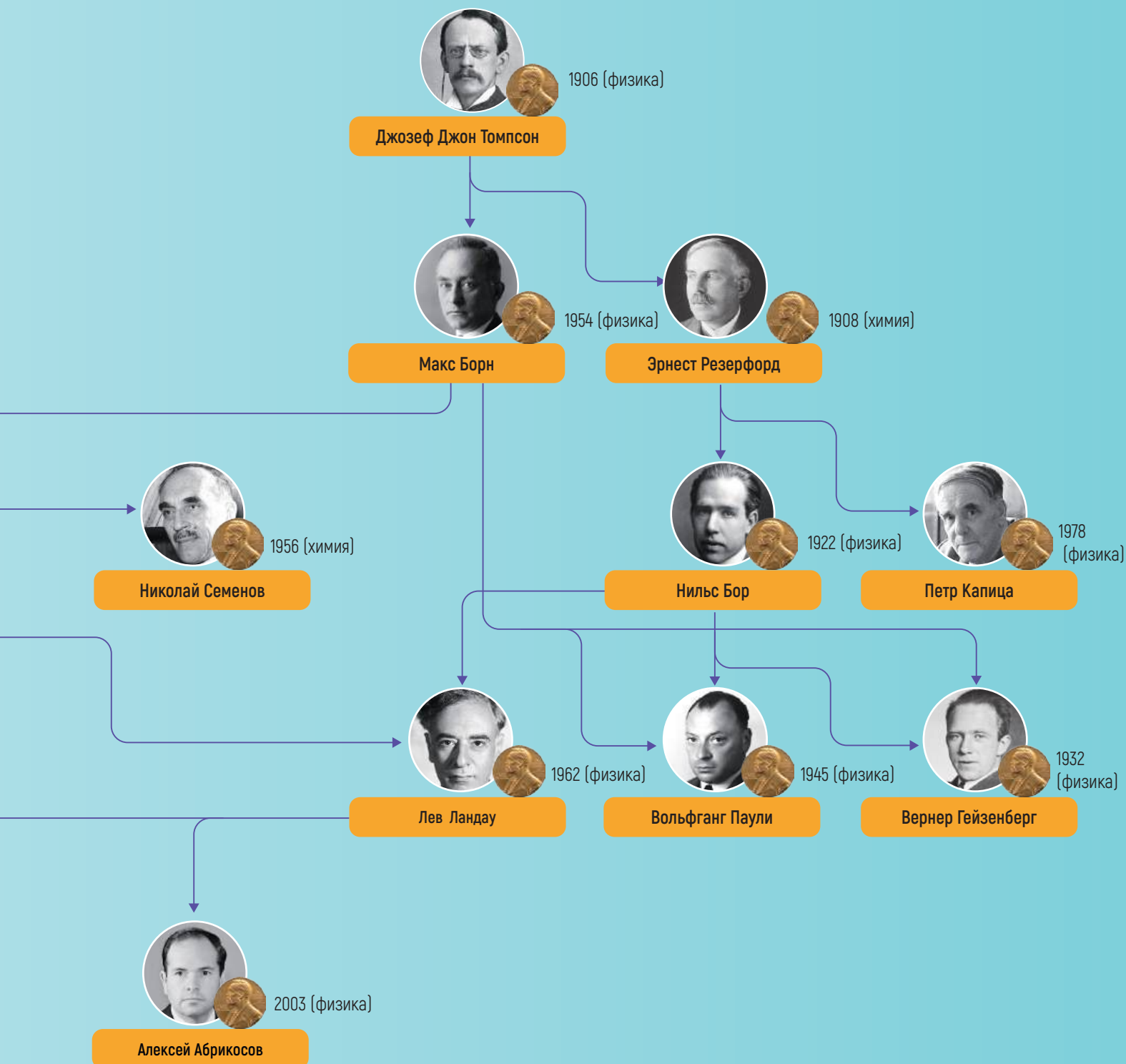
Что касается фундаментальной значимости для развития науки и вообще научной репутации этой области исследований, то наукометристы указывают, что граф цитируемости в тематике МОКов очень плотный. Это означает, что публикации на тему производит некоторое сообщество, где принято цитировать друг друга (термин MOFia приписывают чуть ли не самому Яги). В таком свете титул одного из самых цитируемых химиков современности выглядит уже не так красиво. Соседи Яги по таблице цитирования — часто биохимики, биотехнологи или материаловеды, чьи работы вышли в реальное массовое применение. Это означает, что их работы применяют (и цитируют) вне их непосредственного узкого профессионального круга. А смогут ли МОКи выйти в реальное широкое применение, пока вопрос открытый.

«Про воду в пустыне, мне кажется, просто красивый пиар-ход реального применения здесь не будет, — сказал Сергей Вацадзе из ИОХ РАН. — Существенных проблем с выходом МОКов в практику две: стоимость и синтетическая доступность, в плане воспроизводимости конкретной нужной структуры в промышленных масштабах. Мне кажется, эта Нобелевская премия, как и в 2016 году с молекулярными машинами, не за практику, а за красивую идею и ее воплощение. А именно: решить проблему взаимопроникновения сеток-решеток и сделать каркас достаточно устойчивым к удалению молекул-гостей (обычно их роль выполняет растворитель, использовавшийся при синтезе). Природа не терпит пустоты, а здесь мы ее как бы раз — и обманули, пустоту создали».

К ГЕНЕАЛОГИИ «НОБЕЛЕЙ»



Наукометрия разбирается с наукой как процессом: интересуется, как его можно измерить и можно ли разглядеть в нем какие-то закономерности. Нобелевские лауреаты, естественно, тоже интересуют исследователей как феномен. Например, в 2024 году было показано, что 727 лауреатов распадаются на 25 «семейств», где родством считаются те или иные формы академического взаимодействия. Причем 696 из них принадлежат одному и тому же клану, который не ограничивается одной только физикой, химией или экономикой (например, одним из родственников Вольфганга Паули считается и Карл Густав Юнг). Есть среди ее членов и наши лауреаты. Мы воспользовались базой *The Academic Family Tree*, чтобы показать (увы, далеко не полностью) «генеалогические окрестности» некоторых из них.



Нобелевская медаль Константина Новосёлова,
лауреата 2010 года, хранится на Физтехе



ГРАФЕН : 15 ЛЕТ ПОСЛЕ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ

Игорь Воронцов

В 2010 году Нобелевский комитет по физике сделал на редкость смелый шаг, присудив премию Андрею Гейму и Константину Новоселову за технологию получения из графита моноатомного слоя углерода — графена. Как правило, от открытия до награды проходят десятилетия. А с пионерской публикации по графену прошло всего шесть лет. Таким стремительным «нобелевским» признанием в физике твердого тела прежде могли похвастаться только транзистор (девять лет), лазер (четыре года) и высокотемпературная сверхпроводимость (всего год!).

С тех пор прошло 15 лет. За это время графен успел из «невозможного» объекта превратиться в центр большой междисциплинарной области, которую сегодня обычно называют физикой двумерных материалов и вандерваальсовых гетероструктур. Вокруг него выросло целое семейство двумерных кристаллов, появилась твистроника, а сами двумерные материалы проникли в электронику, энергетику, медицину и тяжелую промышленность.

Чтобы понять, почему графен оказался в одном ряду с транзистором, лазером и высокотемпературной сверхпроводимостью, нужно начать с того, почему двумерный кристалл долгое время вообще считался невозможным.

ГРАФЕН НЕВОЗМОЖЕН

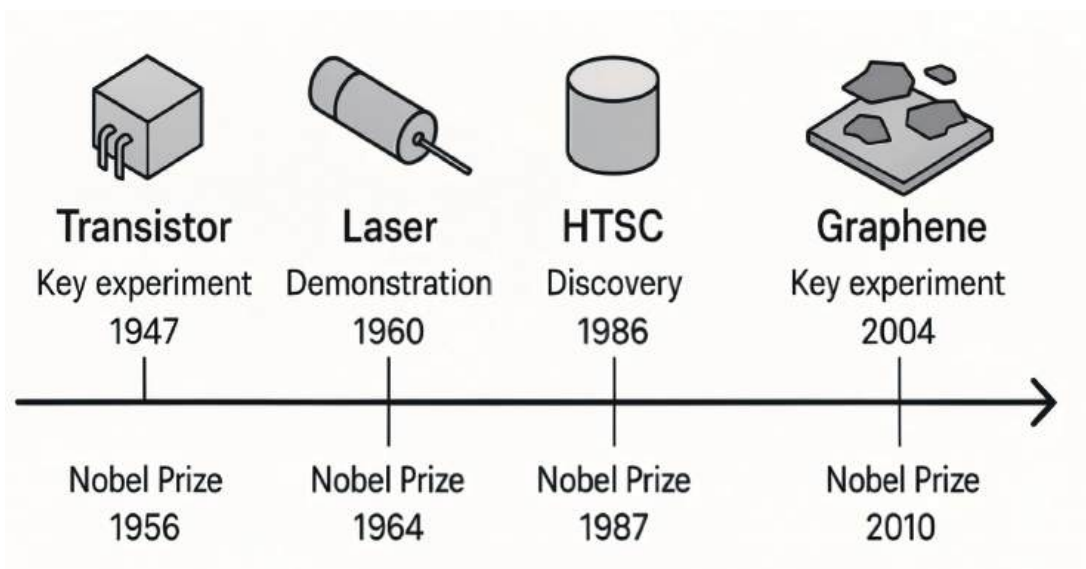
Это сомнение выросло из анализа флуктуаций в низкоразмерных системах, который проводили разные авторы, начиная с классической работы Ландау и Пайерлса в 1930-х.

В рамках развивавшейся теории упорядоченных состояний Ландау рассматривал влияние тепловых флуктуаций на кристаллическую решетку малой толщины. Он показал, что в бесконечно протяженной двумерной решетке длинноволновые колебания должны разрушать дальний порядок: по мере увеличения системы атомы смещаются все сильнее. Позже, в учебнике «Статистическая физика», Ландау и Лифшиц подчеркивали ограниченность этого результата: для конечных пленок логарифмическая расходимость оказывается настолько медленной, что в широком диапазоне размеров двумерная решетка может сохранять твердо-кристаллические свойства и фактически вести себя как обычный кристалл. Эта оговорка — принципиальная: Ландау вовсе не утверждал, что двумерные кристаллы невозможны в эксперименте, он лишь указывал на хрупкость далекого порядка в бесконечной системе.

В 1966 году Дэвид Мермин и Герберт Вагнер доказали, что двумерные системы с короткодействующим взаимодействием и непрерывной симметрией не могут иметь истинного дальнего

Временная шкала четырех спринтов: транзистор (ключевой эксперимент 1947 год, Нобелевская премия 1956 год), лазер (демонстрация 1960, премия 1964), высокотемпературная сверхпроводимость (открытие 1986, премия 1987) и графен (ключевой эксперимент 2004, премия 2010).

Источник: создано при помощи ChatGPT (модель GPT-5.1)



порядка при конечной температуре. Их результат относится к очень широкому классу моделей квантовой статистики и стал фундаментальным ограничением на существование кристаллического порядка в двумерии.

Кроме того, настоящего двумерного кристалла — твердой атомарной пленки толщиной 1 атом — у исследователей все равно не было. И именно поэтому мысль о его реальности долго выглядела почти парадоксальной: теоретические ограничения были известны, но оставался вопрос, может ли природа использовать какие-то дополнительные механизмы — слабые изгибы листа, рябь, конечные размеры, чтобы такая пленка все-таки была стабильной.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ЛАЗЕЙКА

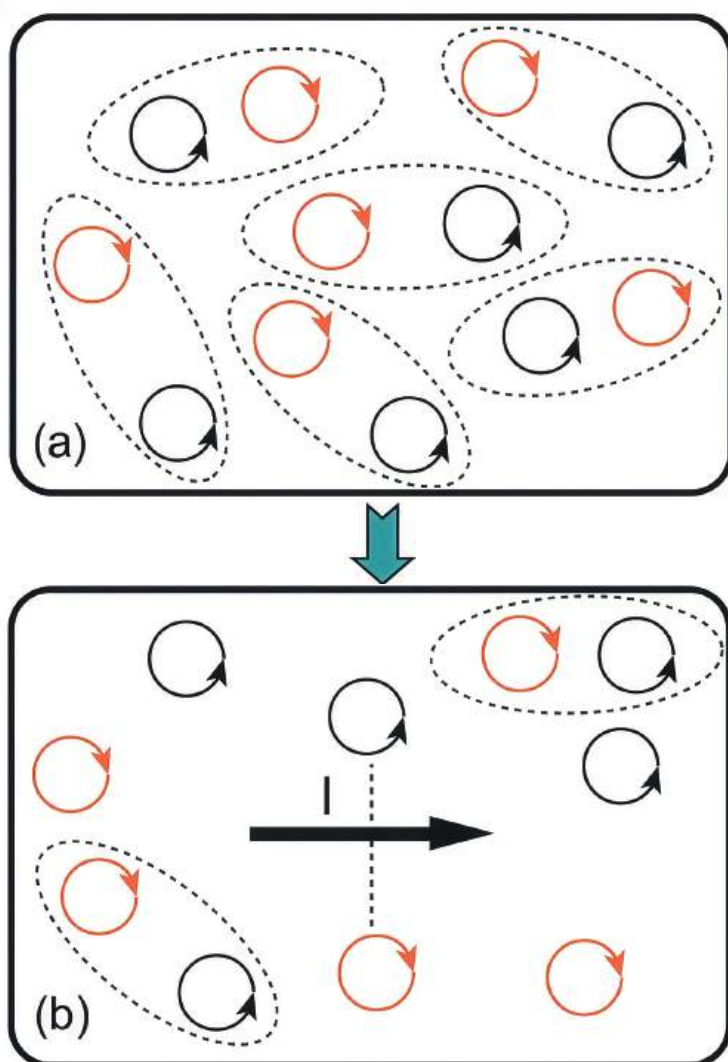
Физики, однако, не любят ультиматумов. Теоретические ограничения, о которых шла речь выше, говорили лишь о невозможности привычного дальнего порядка в двумерии — но не о том, что двумерные системы обязаны быть полностью неустойчивыми. Именно эта щель в формулировках и стала точкой входа для следующего этапа понимания.

В начале 1970-х годов Вадим Березинский, развивая идеи Ландау — Пайерлса и учитывая строгие выводы Хоэнберга, Мермина и Вагнера, показал, что в двумерных системах с непрерывной симметрией может существовать особая низкотемпературная фаза. Формально дальний порядок в ней действительно отсутствует, как и требует теорема Мермина — Вагнера, но система все равно обладает конечной жесткостью и ведет себя упорядоченно. Березинский также обратил внимание на то, что голдстоуновские возбуждения — спиновые волны — ведут себя в двумерии таким образом, что полностью разрушить упругую жесткость им не удастся.

Чуть позже Джон Костерлиц и Дэвид Таулесс предложили наглядное топологическое описание этой фазы и самого перехода в высокотемпературное состояние. Они показали, что устойчивость обеспечивается не жесткой фиксацией атомов в узлах решетки, а тем, как устроены вихри — топологические дефекты поля. Каждый вихрь характеризуется числом оборотов, то есть тем, как «стрелочки» (спины или фазы) поворачиваются при обходе вокруг него. При низких температурах такие вихри сцеплены в пары вихрь-антивихрь, и их эффекты взаимно компенсируются. В этой фазе система, несмотря на отсутствие строгого дальнего порядка, остается жесткой и способной сопротивляться деформациям.

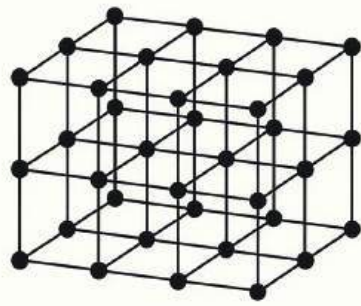
Нагрев приводит к распаду пар, и в системе появляются свободные вихри. Они могут свободно перемещаться под воздействием внешнего поля и

создают диссипацию; устойчивость пропадает. Так реализуется переход Березинского — Костерлица — Таулесса, ставший одним из самых красивых открытий статистической физики XX века. За вклад в его понимание Костерлиц и Таулесс получили Нобелевскую премию по физике 2016 года (Березинский, к сожалению, не дожил до вручения). Экспериментальные подтверждения этой картины к тому времени уже появились. В тонких пленках сверхтекучего гелия и сверхпроводников наблюдали именно такую динамику: при достижении критической температуры пары вихрь-антивихрь распадались, и свободные вихри начинали дрейфовать поперек потока. В сверхпроводнике это проявлялось особенно наглядно: движение магнитных вихрей создавало «трение», и измерительная аппаратура фиксировала появление конечного сопротивления.



Механизм перехода БКТ в сверхпроводящей пленке. (a) Ниже критической температуры: вихри и антивихри (красные и черные кольца) связаны в тесные нейтральные пары. (b) Выше критической температуры: тепловые флуктуации разрывают связи. Появляются свободные вихри. Источник: L. Benfatto, «The Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition and its Application to Superconducting Systems», Sapienza University of Rome

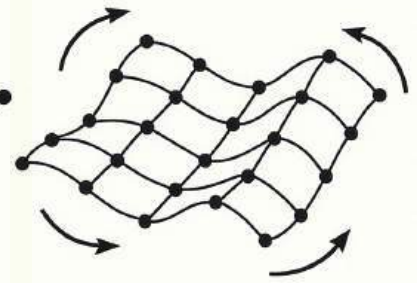
Сравнение устойчивости порядка в трехмерном кристалле и двумерном кристалле при $T = 0$ и $T > 0$. В двумерии тепловые флуктуации приводят к длинноволновым изгибам пленки. Источник: иллюстрация создана при помощи ChatGPT (модель GPT-5.1)



Трехмерный кристалл



Двумерный кристалл при абсолютном нуле



Двумерный кристалл при ненулевой температуре

Но все эти явления относились к системам, больше похожим на жидкости: в гелии двигались атомы жидкости, в сверхпроводниках — электронный газ. Настоящего двумерного кристалла — твердой пластинки толщиной 1 атом, где по сценарию БКТ должны были бы плавиться уже не фазы поля, а сама атомная решетка, — у исследователей все еще не было.

Поэтому идея реального двумерного кристалла при комнатной температуре долго сохраняла вид парадокса: теория указывала на ограничения, а природа — как выяснилось позже — оставила лазейку в виде слабого изгиба листа, ряби и конечных размеров, которые позволяют системе существовать.

Тем временем давно было известно, что графит состоит из слоев, а карандаш оставляет на бумаге след из чешуек, отслаивающихся благодаря слабым вандерваальсовым силам. Логичный вопрос, можно ли получить слой толщиной 1 атом, возник еще в середине XX века. Теоретики охотно обсуждали свойства такого гипотетического двумерного углеродного кристалла, строили модели его электронных спектров, говорили о возможной сверхпроводимости. Но экспериментаторы неизменно терпели неудачи: вместо монослоя получались грубые пленки, островки на подложках, реконструированные поверхности, но не свободно лежащий атомный лист. Графен превратился в своего рода святой Грааль материаловедения: о нем говорили, на него ссылались, его свойства обсуждали, но увидеть его никто не мог. И все это происходило на фоне теоретических аргументов о том, что такой кристалл вообще не должен быть устойчивым.

ЯВЛЕНИЕ СЛОЯ НАРОДУ

В 1990-е годы Андрей Гейм работал в Нидерландах, в лаборатории университета Радбода в Неймегене. Там находилась крупная экспериментальная установка с резистивными магнитами, рассчитанными на рекордно высокие стационарные магнитные поля — десятки тесла. На ней изучают самые разные системы в

экстремальных условиях: от мягкой конденсированной материи до сильно коррелированных электронных систем. Именно в этом контексте и родился один из самых известных «несерьезных» экспериментов Гейма — диамагнитная левитация лягушки. В 1997 году он и коллеги показали, что достаточно сильное магнитное поле в горле биттеровского соленоида (порядка 16 Тл при типичном диаметре отверстия несколько сантиметров) может уравновесить силу тяжести и заставить висеть в воздухе любые диамагнитные объекты: каплю воды, кусочек графита, живую лягушку. За эту работу Гейм и Майкл Берри получили в 2000 году Шнобелевскую премию по физике, а сам опыт стал классическим примером того, как несолидная идея оказывается физически содержательной и методически плодотворной.

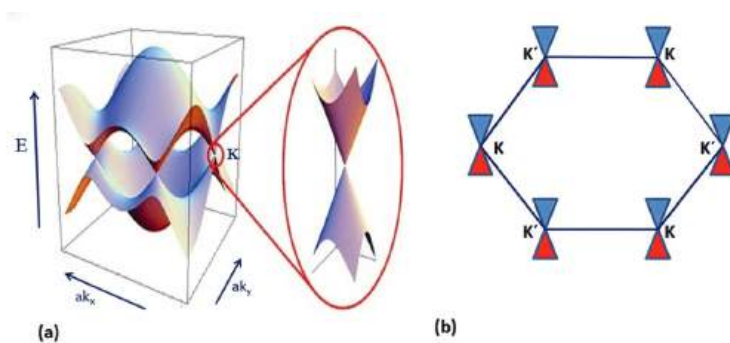
В своих лекциях и автобиографии Гейм описывает, как именно этот опыт привел его к формату «пятничных экспериментов». Идея проста: небольшую часть времени в лаборатории сознательно отводят под рискованные, иногда почти абсурдные затеи, далекие от основной тематики научной группы. Они не должны занимать годы и не должны подставлять карьеру аспирантов, но дают шанс «пнуть» задачу совсем с другой стороны. Чаще всего такие попытки ничем не заканчиваются, но иногда — как в случае с левитацией лягушки — выстреливают и открывают совершенно неожиданное направление. В 2001 году Гейм переехал в Манчестерский университет, возглавил там центр мезонауки и нанотехнологий, а вместе с ним в Манчестер перебралась и традиция пятничных экспериментов. К началу 2000-х в манчестерской лаборатории сложился узнаваемый стиль: днем — «основная» мезофизика, а по вечерам и пятницам — экспериментальные «пинки» идей. Именно так и родился знаменитый скотч-эксперимент с графитом.

Суть манчестерского подхода к графену очень проста. Берут кристалл высокочистого графита. К нему приклеивают полоску канцелярского

скотча и отрывают. На ленте остается тонкий слой графита. Затем ленту складывают графитом внутрь, прижимают, снова раскрывают и повторяют процедуру несколько раз. На ленте образуется мозаика из чешуек различной толщины. После этого ленту с графитовыми хлопьями прижимают к кремниевой подложке с тонким слоем диоксида кремния SiO_2 и отрывают. Часть хлопьев остается на подложке — среди них, при удачном стечении обстоятельств, оказываются и одноатомные слои. Дальше в ход идет оптика. Толщину слоя SiO_2 на подложке подбирают так, чтобы за счет интерференции света монослой графена слегка отличался по цвету от подложки. При освещении белым светом он проявляется как очень бледное фиолетовое или голубоватое пятно. То, что раньше было совершенно невидимым, становится различимым в обычный оптический микроскоп. Вот — невозможный двумерный кристалл, лежит перед вами на столе.

ЧТО ТЫ ТАКОЕ

В серии ранних статей 2004–2005 годов было показано сразу несколько ключевых вещей. Оказалось, что из графена можно изготовить полевые транзисторы, управляя концентрацией носителей напряжением на затворе. Проводимость при изменении типа носителей, от электронов к дыркам, ведет себя необычно и не пропадает полностью. В сильном магнитном поле проявляется аномальный полупроводящий квантовый эффект Холла. Все эти наблюдения указывали на то, что электроны в графене ведут себя так, как если бы у них не было массы, и подчиняются уравнению Дирака из квантовой электродинамики, а не привычному для твердых тел уравнению Шредингера. Их скорость достигает примерно 1000 км/с, то есть около 1/300 скорости света в вакууме.



Зонная структура графена и знаменитые «конусы Дирака».

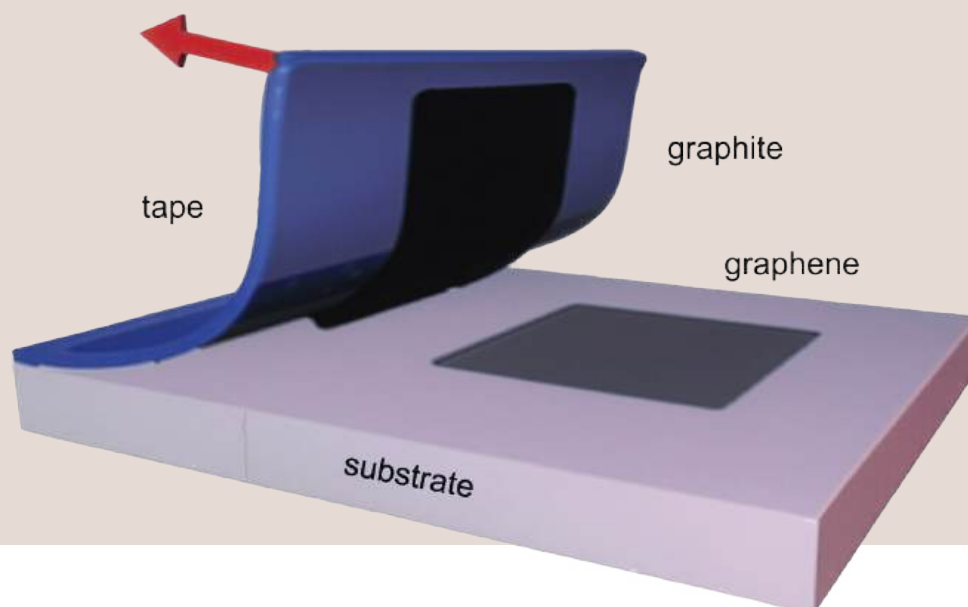
(a) Трехмерное изображение энергетического спектра. В обычных металлах график был бы параболой, похожей на чашу. В графене валентная зона и зона проводимости соприкасаются в точках, образуя форму конусов. Такая геометрия означает, что электроны движутся как безмассовые частицы. (b) Вид сверху: конусы расположены по углам шестиугольной ячейки обратной решетки, в точках K и K'. Источник: N. Bhattacharjee, «Multi-colour transient spectroscopy on single wall carbon nanotubes», PhD Thesis, 2012

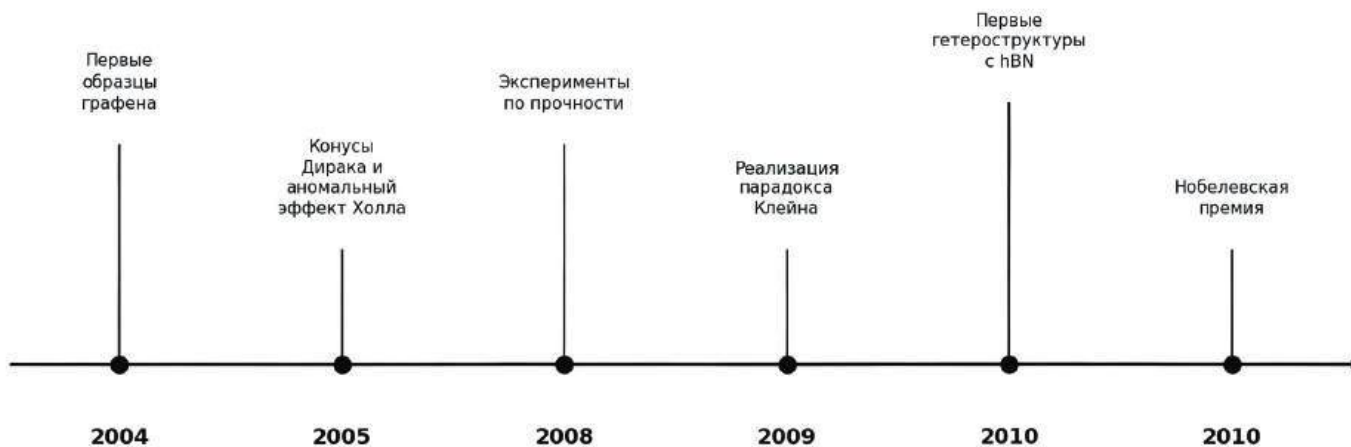
Важно подчеркнуть: физически электрон, конечно, не теряет свою массу. Просто в кристалле его движение удобно описывать с помощью эффективной массы, и в графене она оказывается близка к нулю. Этого достаточно, чтобы наблюдать реальные релятивистские эффекты в материале, который лежит у вас на столе, без всяких ускорителей частиц с энергиями в миллионы электронвольт.

ШЕСТИЛЕТНИЙ СПРИНТ

С 2004 по 2010 год вокруг графена развернулся беспрецедентно быстрый научный спринт. За считанные годы он превратился из курьезного объекта в настольную модель релятивистской квантовой теории и плацдарм для новых техно-

Схема метода микромеханического расслоения (метод скотча). Клейкая лента отделяет слои от кристалла графита. Затем эти слои переносятся на кремниевую подложку, где после удаления скотча остаются чешуйки графена. Источник: R. Rudrapati, «Graphene: Fabrication Methods, Properties, and Applications in Modern Industries», IntechOpen, 2020 (CC BY 3.0)





Шестилетний спринт графена: временная шкала от первых образцов (2004) через наблюдение конусов Дирака и аномального квантового эффекта Холла, измерения механической прочности, реализацию аналога парадокса Клейна и появление первых гетероструктур на основе графена до присуждения Нобелевской премии в 2010 году. Источник: иллюстрация создана при помощи кода на Python 3.12.12 (библиотека Matplotlib)

логий. Именно в этот промежуток времени на графене успели показать и предсказать большинство эффектов, которые сегодня принято приводить как классические примеры двумерной физики. Часть экспериментов была доведена до совершенства уже после 2010-го, но сами идеи, модели и первые наблюдения родились именно на гребне этой первой волны.

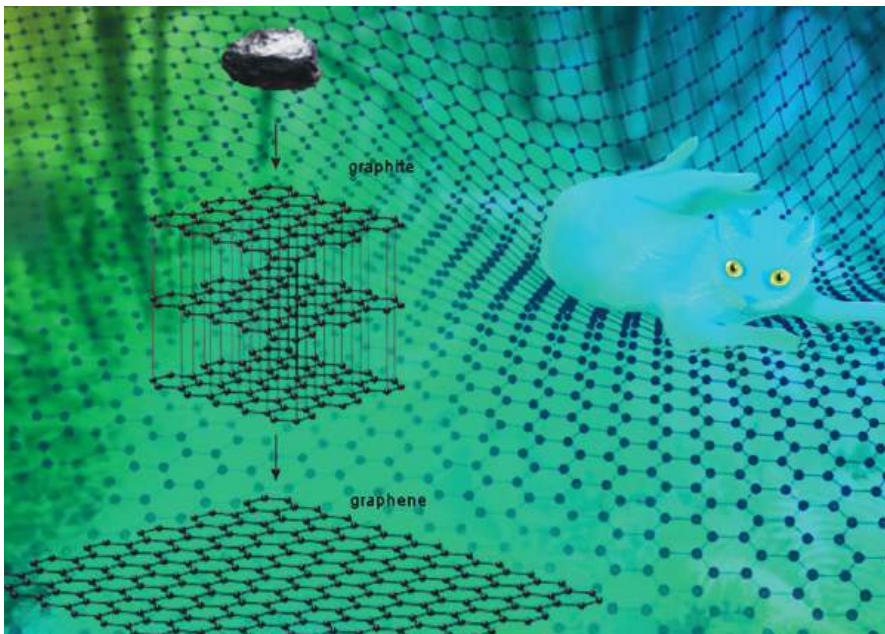
ОЧЕНЬ ПРОЧНЫЙ

На первых этапах внимание было приковано к электронным свойствам графена. Но довольно быстро появилось другое направление — измерение его механической прочности. Экспериментальные работы конца 2000-х показали, что одноатомная мембрана графена выдерживает очень большие напряжения. Модуль Юнга оказы-

вается порядка терапаскаля, предел прочности — около сотни гигапаскалей.

Если бы вы могли сделать гамак из одного слоя графена и как-то закрепить его края, такая мембрана могла бы выдержать несколько килограммов при ничтожной собственной массе. На сайте Нобелевского комитета есть классический пример: гамак для четырехкилограммовой кошки. Проблема лишь в том, что его толщина — 1 атом, и дырку в нем слишком легко проделать случайно.

Комбинация колоссальной прочности, гибкости и прозрачности сразу породила множество идей для приложений — от композитов и армированных полимеров до прозрачных токопроводящих пленок и ультратонких мембран. Уже к моменту присуждения Нобелевской премии стало ясно,



От графита к графену и «гамаку для кошки»: слои графита, расщепляющиеся до одиночного листа графена, на фоне ряби двумерной решетки, напоминающей мысленный эксперимент Нобелевского комитета о невидимом графеновом гамаке, достаточно прочном, чтобы выдержать кошку. Источник: Нобелевский постер от Нобелевского комитета по физике, веб-адаптация Nobelprize.org

что графен — не только фундаментальный объект, но и потенциальная «арматура» для целой группы отраслей.

ПАРАДОКС КЛЕЙНА НА СТОЛЕ

Один из любимых примеров физиков — реализация в графене парадокса Клейна. Любимый он именно потому, что соединяет в себе сразу несколько вещей. Это классический парадокс релятивистской квантовой теории, который десятилетиями существовал в основном как красивый мысленный эксперимент из учебников по квантовой электродинамике. Его формулировка выглядит нарочно абсурдной: чем выше потенциальный барьер, тем легче частице его «проткнуть». В обычных материалах реализовать такой режим практически невозможно, а в графене вдруг можно.

В релятивистской теории частица, налетающая на очень высокий потенциальный барьер, при определенных условиях не просто частично отражается, а почти полностью проходит через него. Казалось бы, чем выше барьер, тем труднее, но при наличии безмассовых частиц и линейного спектра все оказывается наоборот. В обычных полупроводниках увидеть такой эффект практически невозможно: электроны там ведут себя как частицы с конечной массой, спектр не линейный, а условия для «чистого» релятивистского туннелирования недостижимы.

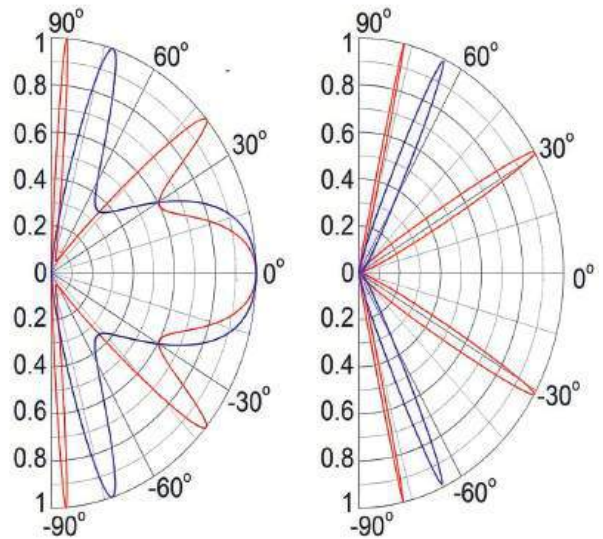
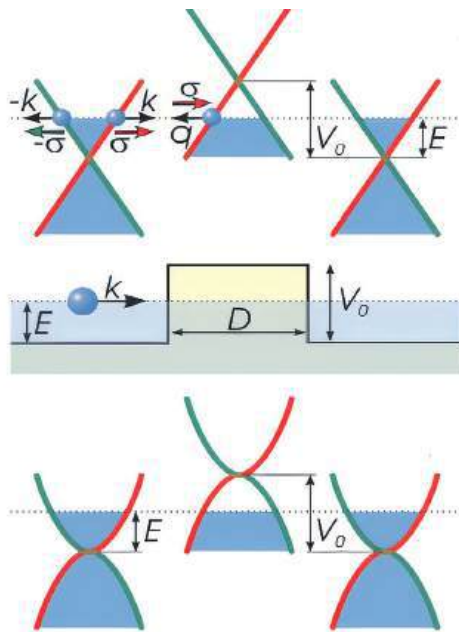
В графене ситуация другая. Уже в самые первые годы после открытия было показано, что если сформировать на нем p-n-переход, то есть область, где носители меняют знак заряда, то электрон, налетающий на границу под определенным углом, пролетит через нее без отражения. Это и есть аналог парадокса Клейна.

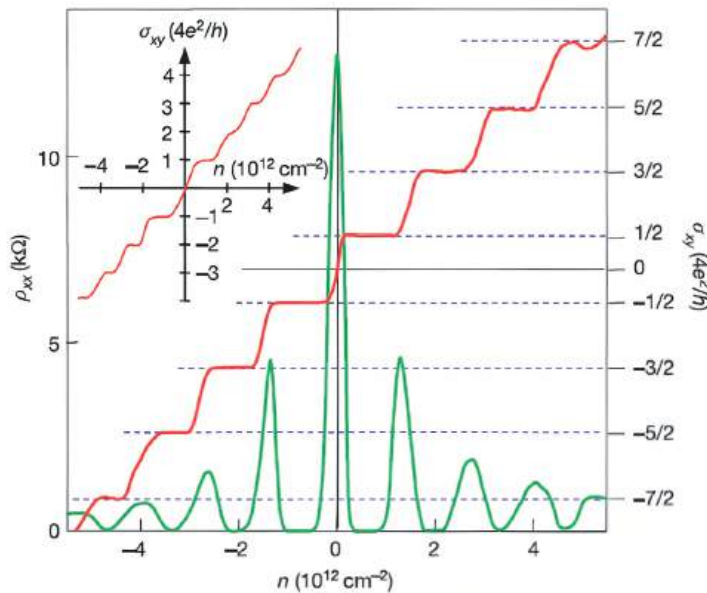
Для теоретиков это возможность увидеть «живьем» эффект, о котором десятилетиями рассказывали только в лекциях. Для экспериментаторов — демонстрация того, что графен не просто еще один материал, а платформа для настольной релятивистской физики. Для преподавателей и студентов — яркая иллюстрация того, как формулы из курса квантовой теории поля вдруг начинают работать в образце, который лежит под микроскопом. Поэтому пример с парадоксом Клейна так любят приводить в лекциях, обзорах и популярных текстах о графене.

АНОМАЛЬНЫЙ ПОЛУЦЕЛЫЙ КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Практически сразу после первых транспортных измерений стало понятно, что в графене квантовый эффект Холла ведет себя необычно. В обычных двумерных электронных газах проводимость в квантовом холловском режиме принимает значения, кратные целым числам. В графене же плато появляются на полуцелых значениях, словно вся диаграмма смещена на половину единицы. Это связано с фазой Берри и особенностями топологии электронных состояний вблизи конусов Дирака. Важно не только само отличие рисунка плато. Графен дает очень простой и наглядный пример того, как топология перестает быть оторванным от практики разделом математики и начинает определять измеряемые величины — в данном случае шаг квантованной проводимости. Для студентов и молодых исследователей аномальный холловский эффект в графене часто становится первым живым примером топологических фаз, после которого легче воспринимаются топологические изоляторы, сверхпроводники и более сложные объекты.

Реализация парадокса Клейна в графене: слева — схемы электронного спектра и электростатического барьера на графене, справа — угловое распределение коэффициента передачи, показывающее, что для определенных углов падения потенциальный барьер становится практически прозрачным. Источник: M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, A. K. Geim, «Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene», Nature Physics 2, 620–625 (2006)





Целочисленный квантовый эффект Холла в однослойном графене: ступенчатое квантование холловской проводимости σ_{xy} (красная кривая) с полувещными заполнениями и осцилляции продольного сопротивления ρ_{xx} (зеленая кривая) в магнитном поле 14 Т Вставка показывает квантовый эффект Холла в двухслойном графене. Источник: W. Bao, Graphene Nanoelectromechanical Systems, PhD thesis, UC Riverside (2010), рис. 4-1, стр. 94; данные по однослойному графену – Novoselov et al., Nature 438, 197–200 (2005)

У этого эффекта есть и вполне практическая сторона. Квантовый эффект Холла давно используется как основа для эталона электрического сопротивления: квантованное значение $R = h/(ve^2)$ воспроизводится с точностью до миллиардных долей, и на этой базе строятся международные стандарты сопротивления. В графене квантованный эффект Холла наблюдается при более высоких температурах и в более широком диапазоне магнитных полей, чем в классических гетероструктурах GaAs / AlGaAs, поэтому графен рассматривают как перспективный материал для компактных и менее

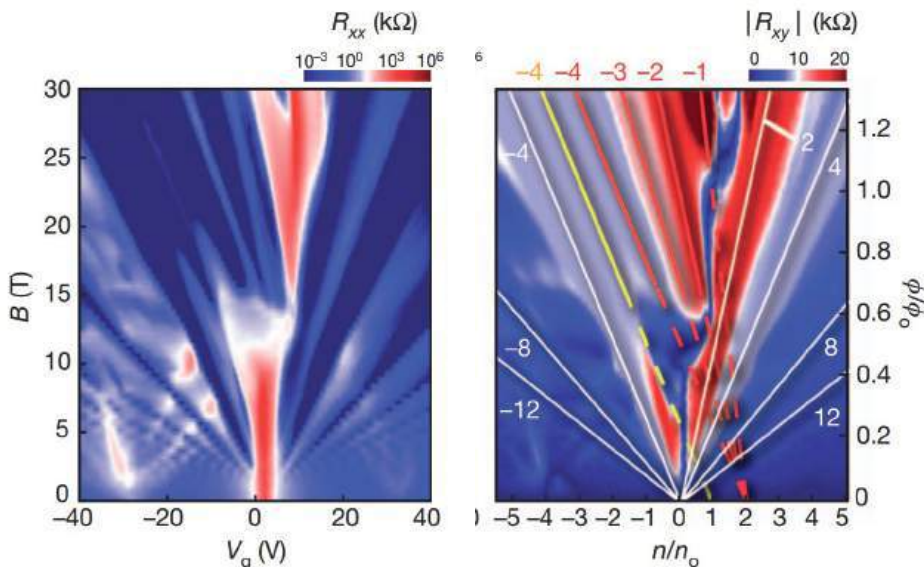
требовательных к условиям квантовых стандартов сопротивления и прецизионных измерений фундаментальных констант.

БАБОЧКА ХОФШТАДТЕРА И ФРАКТАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

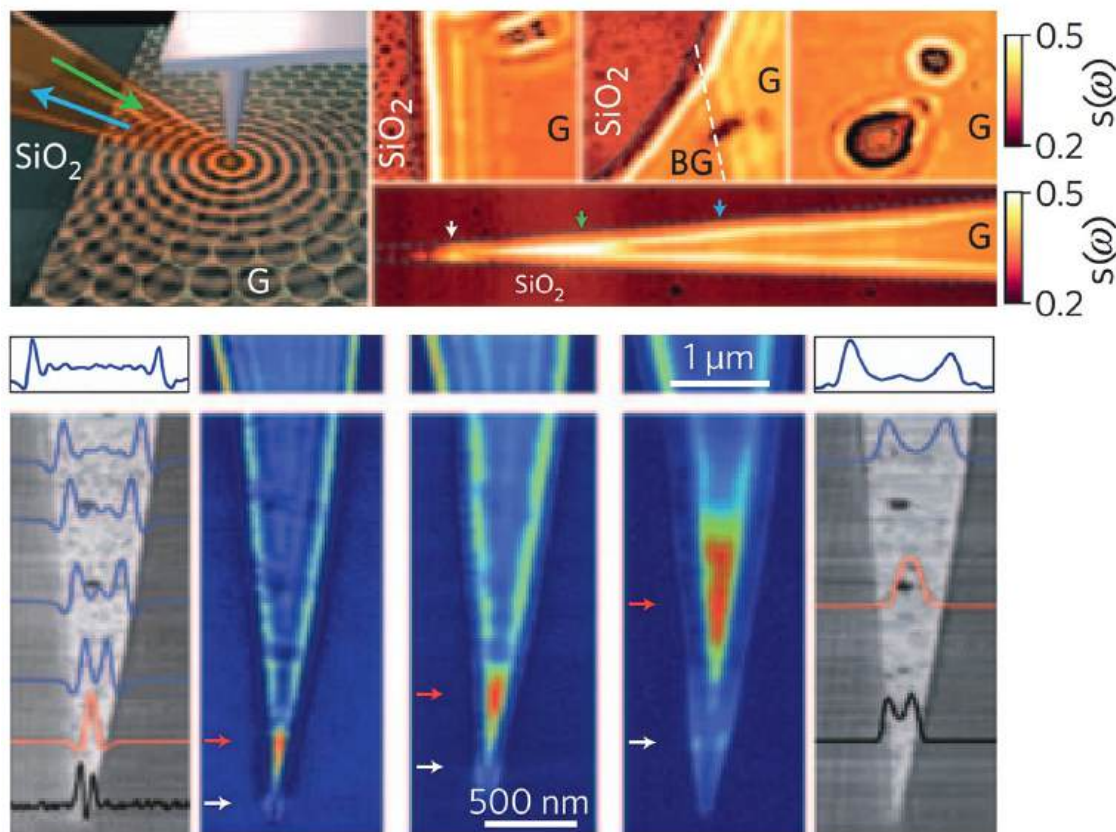
Идея наблюдать в графеновых структурах фрактальные спектры, подобные бабочке Хофштадтера, появилась уже в ходе первых лет графенового бума. Теоретические работы 2000-х показали, что если поместить двумерный электронный газ в периодический потенциал и сильное магнитное поле, можно получить самоподобную структуру энергетических зон. Реализовать необходимые условия в обычных полупроводниковых гетероструктурах было трудно, но наличие высококачественных графеновых и графен-hBN образцов открыло такую возможность.

Первые схемы экспериментов, первые суперрешетки и первые признаки сложной структуры зонного спектра относятся как раз к эпохе до Нобелевской премии и к первым годам после нее. Детальная и красивая картинка бабочки Хофштадтера была получена позже, но по сути стала продолжением той же линии. Здесь графен проявил себя как материал, в котором можно проигрывать сценарии из теоретических статей 1970-х годов и превращать их в реальные диаграммы, видимые на экране измерительной установки.

С практической точки зрения такие фрактальные мини-зоны важны тем, что дают в руки конструктору материалов очень тонкий регулятор электронных свойств. В графен-hBN и скрученном графене разные участки «бабочки» соответствуют топологическим состояниям с различными числами Черна и наборами краевых каналов. Это позволяет, меняя магнитное поле и плотность носителей, переключать режимы транспорта — от обычного квантового Холла до черновских изоляторов и фракционных состоя-



Бабочка Хофштадтера в графен-hBN-суперрешетке: слева – «веер» уровней Ландау, карта продольного сопротивления R_{xx} билинейного графена как функции магнитного поля и напряжения на затворе; справа – те же данные в координатах нормализованной плотности носителей n/n_0 и магнитного потока ϕ/ϕ_0 (диаграмма Ванье). Наклонные линии соответствуют квантовым холловским состояниям, в том числе «аномальным» состояниям, возникающим из фрактальных минизон в спектре Хофштадтера. Источник: C. R. Dean et al., «Hofstadter's butterfly and the fractal quantum Hall effect in moiré superlattices», Nature 497, 598–602 (2013)



Локализованные плазмоны в графене: схема инфракрасного наноимиджинга и экспериментальные карты ближнего поля, на которых видны стоячие волны плазмонов вдоль края и дефектов графеновой пленки. Внизу показано управление длиной волны плазмонов за счет изменения диэлектрических свойств подложки: при той же частоте света плазмонный режим локализуется на масштабах порядка сотен нанометров. Источник: A. N. Grigorenko, M. Polini, K. S. Novoselov, «Graphene plasmonics», *Nature Photonics*, 749–758 (2012)

ний. Уже сейчас обсуждаются приложения таких суперрешеток для программируемых топологических каналов в квантовых схемах, высокочувствительных датчиков и компактных устройств, где эффективная проводимость и плотность состояний настраиваются электрическими и магнитными полями, а не только химическим составом материала.

МАГНИТОЭКСИТОНЫ, ПЛАЗМОНЫ И ДРУГИЕ КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Еще одна линия, активно развивавшаяся в нулевые, связана с коллективными возбуждениями. Теоретики почти сразу после первых измерений в графене начали считать, как могут вести себя плазмоны — коллективные колебания электронного газа, магнитоэкситоны — связанные состояния электрон — дырка в магнитном поле, и поляритоны — гибриды света и плазмонов, распространяющиеся вдоль поверхности.

Для экспериментаторов это выглядело как приглашение в новый зоопарк квазичастиц. Уже в конце 2000-х и начале 2010-х годов были проведены первые эксперименты по плазмонам в графене и окрестных структурах, показавшие, что длина волны плазмонов может быть существенно меньше длины волны падающего излучения. Это сразу открыло возможности для более компактных оптических схем, терагерцовой техники и чувствительных сенсоров.

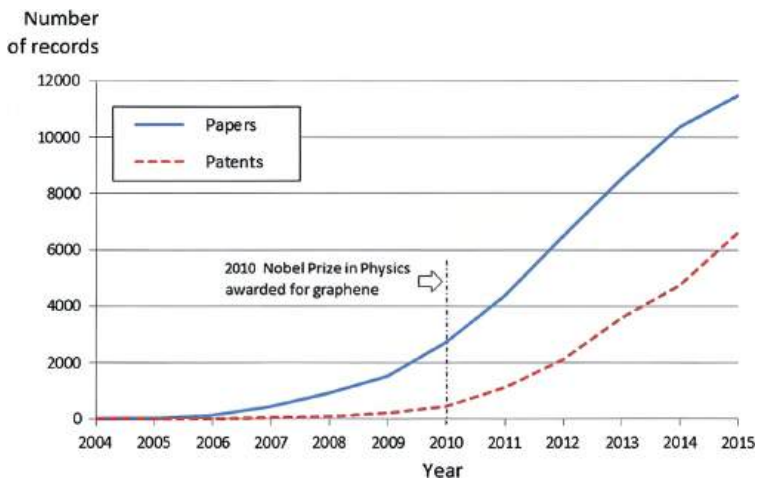
Магнитоэкситоны и связанные с ними особенности спектра в сильных полях стали удобным тестом теорий сильных корреляций в системе безмассовых фермионов. Поляритоны на основе графена и его гетероструктур заложили основу для создания метаматериалов с управляемыми оптическими свойствами. Многие из этих направлений оформились уже в подробные экспериментальные программы чуть позже, но корни и постановка задач относятся именно к тем первым годам графенового бума.

ГРАФЕНОВАЯ ЛИХОРАДКА

После 2004 года поток статей о графене рос почти экспоненциально. По оценкам библиометрических исследований, к середине 2010-х в базах данных научных журналов числились десятки тысяч публикаций со словом *graphene* в названии или ключевых словах.

Эта лавина началась почти сразу после первых работ Манчестерской группы. Уже в период между 2004 и 2010 годами появились отдельные графеновые сессии на конференциях, первые тематические школы и обзоры.

Молодые физики иногда шутят: если вы случайно добавили в образец углерод, внимательно посмотрите — вдруг это графен, и у вас уже есть статья. Эта шутка родилась именно на волне первых лет, когда графен был на слуху у всех, от теоретиков до экспериментаторов самых разных специальностей.



Рост числа научных публикаций и патентных заявок по графену: экспоненциальное увеличение числа статей после 2004 года и несколько отстающий, но быстро растущий поток патентов. Источник: по мотивам библиометрических и патентных исследований графена (Ahn et al., 2015; Zou et al., 2018)

Параллельно рос и вал патентов. Крупнейшие игроки — Китай, США, Южная Корея, Япония, страны Европы — активно патентовали способы синтеза, устройства, композиты, сенсоры. Китай довольно быстро вышел в лидеры по числу графеновых патентов, что хорошо отражает его стратегию: вкладываться в новые материалы на ранней стадии, пока рынок еще не устоялся. Россия в этой гонке выглядела более скромно, но и у нас уже тогда появлялись свои патенты на графеновые покрытия, мембраны, композиты для нефтегазовой отрасли.

2D-ВСЕЛЕННАЯ

Практически одновременно с первыми экспериментами вокруг графена начало формироваться мощное теоретическое сообщество. Одну из ключевых ролей здесь сыграл физик Михаил Кацнельсон. Его статьи помогли понять, как правильно описывать безмассовые фермионы в реальной кристаллической решетке, как работает квантовый транспорт, экранирование, коллективные возбуждения.

Позже Кацнельсон написал монографию *Graphene: Carbon in Two Dimensions*, которую полшутя называют «Библией графена». В ней графен рассматривается как физическая платформа, на которой удобно обсуждать релятивистские эффекты, топологические состояния, квантовый транспорт в мезоскопических структурах. Здесь графен часто называется «настольной моделью Вселенной».

На крошечном кусочке графена можно проигрывать многие сюжеты, которые в природе происходят в недрах нейтронных звезд или на расстояниях, доступных только огромным

коллайдерам. Разумеется, речь идет не о точном воспроизведении всех деталей. Графен — не мини-вселенная в буквальном смысле, а аналоговый симулятор. На нем можно реализовывать движение безмассовых частиц с линейным спектром и наблюдать связанные с этим релятивистские эффекты. Можно изучать квантовый транспорт в режимах, аналогичных сильно вырожденной материи. Можно видеть топологические переходы и состояния, связанные с фазой Берри, фрактальные спектры вроде бабочки Хофштадтера, коллективные возбуждения — плазмоны, магнитоэкситоны, поляритоны.

В астрофизике и физике высоких энергий подобные режимы возникают при гигантских плотностях, полях и энергиях. В графене многие из тех же идей оказываются доступны в тонкой пленке на столе и в диапазоне напряжений и температур, достижимых обычной лабораторной аппаратурой. Это и делает графен «настольной вселенной» в смысле богатства физических сценариев, которые можно на нем проиграть.

ПОСЛЕГРАФЕНОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Как только научились уверенно выделять графен, исследователи немедленно обратились к другим слоистым кристаллам. Так вокруг графена сформировалось семейство двумерных материалов, где графен стал первым, но далеко не единственным героем.

Одним из первых в этот список попал гексагональный нитрид бора hBN — материал, очень похожий по структуре на графен, но с чередованием атомов бора и азота. Его иногда называют «белым графеном». Главное отличие от графена в том, что у hBN широкая запрещенная зона. Это идеальный изолятор, прозрачный и химически устойчивый. hBN оказался великолепной подложкой для графена. Период решетки совпадает почти идеально, а лишних носителей он не добавляет. В результате носители в графене меньше рассеиваются, и их подвижность растет. Нитрид бора стал не просто родственником двумерным кристаллом, но и важным технологическим элементом, без которого многие тонкие эффекты в графене было бы гораздо сложнее наблюдать.

Следующий шаг был вполне естественным. Исследователи стали складывать различные двумерные материалы друг с другом. Графен на hBN, дисульфид молибдена MoS₂ на графене, несколько слоев разных дихалькогенидов — все это вместе получило название вандерваальсовых гетероструктур, по типу сил, удерживающих эти пленки.

Ключевое преимущество таких структур в том, что каждой пленке почти все равно, что под ней и над ней. Слои слабо взаимодействуют химически, но могут сильно влиять друг на друга электронно и оптически. Это позволяет настраивать свойства: выбирать проводящий слой, изолирующий слой, оптически активный слой, слой с сильным спин-орбитальным взаимодействием. По сути, это путь к материалам по чертежу, когда нужный набор свойств задается комбинацией слоев, а не только химическим составом одного кристалла.

Особую роль в этом семействе сыграли дихалькогениды переходных металлов, такие как MoS_2 , WS_2 , WSe_2 и другие. В объемном виде многие из них не выглядят идеальными материалами для оптоэлектроники, но в монослое ситуация меняется. Они начинают ярко светиться при возбуждении светом, что делает их кандидатами на роль материалов для двумерных светодиодов, лазеров и фотодетекторов.

Кроме того, в этих материалах проявляются спин-валлейные (от *valley* — долина) эффекты. У электронов появляется дополнительная координата — номер долины в импульсном пространстве, которой тоже можно управлять с помощью света и внешних полей. Это дает задел для валлейтроники, области, где информация кодируется не только в заряде и спине, но и в номере долины. Такие эффекты напрямую связаны с топологией зонной структуры и продолжают линию «настоальной вселенной», начатую графеном.

Сам графен тоже можно преобразовывать химически. Если присоединить к каждому атому углерода атом фтора, получается флюорографен, по сути, двумерный тефлон. Он химически устойчив, электрически изолирующий, но при этом сохраняет механическую прочность исходного графена.

Другие варианты — гидрографен, оксид графена и множество органических структур. Каждый вариант дает свой набор свойств. В одном случае открывается широкая запрещенная зона, в другом растет химическая активность, в третьем меняется смачиваемость поверхности. Это превращает графен в платформу для химического дизайна, где электронные и поверхностные свойства можно тонко настраивать под задачу — от сенсоров и мембран до покрытий.

Дальше пошли двумерные металлы. В последние годы появились сообщения о синтезе однослойного золота, материала, который иногда называют *goldene*. В отличие от графена, он не образует самонесущих листов, но может быть стабилизирован на подходящих подложках.

Для оптики и катализа такие структуры чрезвычайно интересны. Двумерный металл дает

мощные плазмонные резонансы и высокую поверхностную активность. На горизонте уже видны проекты по двумерным слоям серебра, меди и других металлов. Все эти направления — прямые потомки графена и уверенности в том, что двумерные кристаллы вообще могут быть стабильными и технологически управляемыми.

МУАРОВЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ И РОЖДЕНИЕ ТВИСТРОНИКИ

Если взять два одинаковых листа миллиметровой бумаги, наложить один на другой и чуть повернуть, вы увидите крупный муаровый рисунок — большие ромбы и полосы, возникающие из-за неполного совмещения сеток. С графеном происходит то же самое. Если два слоя слегка повернуть относительно друг друга, в электронной структуре возникает новая муаровая сверхрешетка.

Оказалось, что эта геометрическая игра ведет к драматическим последствиям. При некоторых «магических» углах поворота скорость электронов в графене резко падает, а энергетические зоны становятся почти плоскими. В плоских зонах кинетическая энергия подавлена и на первый план выходят взаимодействия между электронами. Это идеальная среда для сильно коррелированных фаз: изоляторов Мотта, магнитных состояний, сверхпроводимости.

В 2018 году группа Пабло Харильо-Эрреро показала, что два слоя графена, повернутые друг к другу примерно на 1,1 градуса, демонстрируют богатую фазовую диаграмму. При одних концентрациях носителей материал ведет себя как изолятор, при других — как сверхпроводник. Температура перехода пока невысока, единицы кельвинов, но принципиально важно другое: фазу можно переключать простым изменением плотности носителей и угла поворота.

Так родилась твистроника — область, где главным параметром становится не химический состав и не давление, а угол. Скрученные гетероструктуры на основе графена и других двумерных материалов быстро превратились в платформу для изучения топологических фаз. В них можно реализовывать состояния, похожие на квантовые спин-жидкости, топологические изоляторы, экзотические магнитные фазы. С помощью аккуратного подбора углов и комбинаций слоев ученые создают материалы, у которых заранее задается характер электронных и магнитных состояний.

Для теоретиков конденсированного состояния это очень удобная площадка. Вместо того чтобы годами ждать, когда в природе найдется подходящий кристалл, можно предложить конкретную конфигурацию слоев и углов, а экспериментаторы попробуют ее собрать. На основе муаровых структур развивается и направление квантовых симуляторов, где сложные модели квантовой теории можно реализовать в виде искусственных материалов и затем изучать в эксперименте.

ПУТЕШЕСТВИЕ В ПЛОСКИЙ МИР

Текст: Варвара Кравцова
Фото: Анастасия Каплина



Открытие графена распахнуло дверь в «плоский мир» двумерных структур, обладающих невероятными свойствами. В МФТИ его изучением занимается Центр фотоники и двумерных материалов, который объединяет 10 лабораторий.



**Алексей Большаков,
директор Центра
фотоники
и двумерных
материалов МФТИ:**

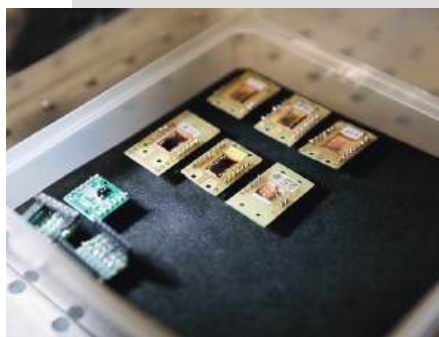
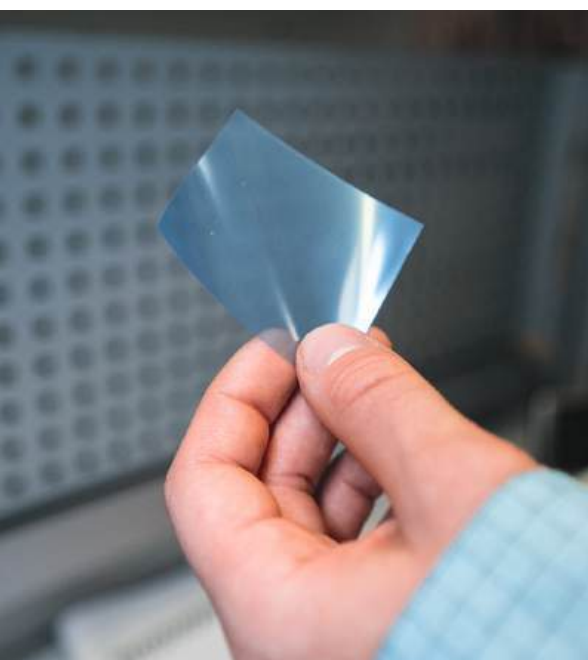
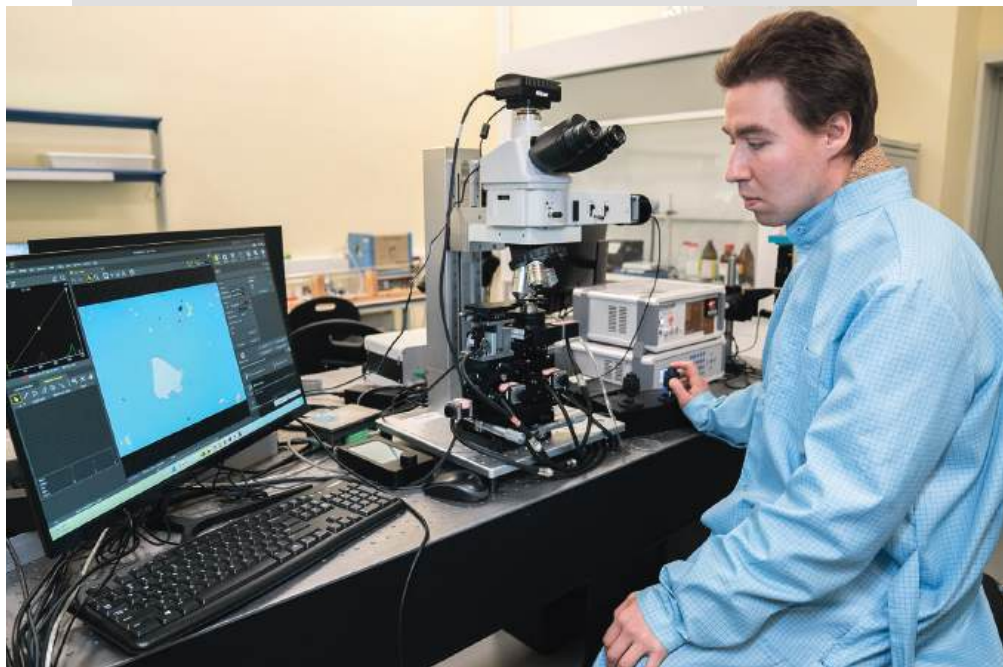
“ ”

Одна из задач центра — научиться удерживать, направлять и детектировать свет на наномасштабе. Это ключ к созданию оптических чипов, которые будут в сотни раз меньше и гораздо энергоэффективнее современных аналогов. Для этого мы используем материалы с экстремально высоким показателем преломления и анизотропией.

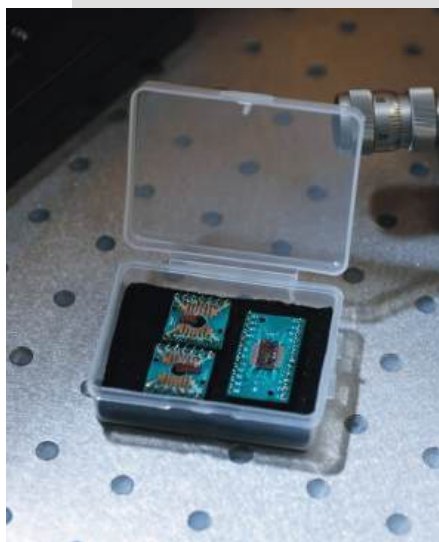


«Мы создаем своеобразный микро-бутерброд, комбинируя слои с разными свойствами, — например, диэлектрик, проводник, диэлектрик, — рассказывает инженер Иван Домарацкий. — Ключевое здесь — идеальная чистота и точность совмещения кристаллических осей. После сборки мы отправляем структуру в „чистую зону” для формирования контактов и приданию устройствам правильной геометрии».

Новый материал начинается в лаборатории компьютерного дизайна материалов: здесь теоретики численно моделируют его свойства. Потом включаются экспериментаторы из лаборатории оптоэлектроники двумерных материалов — синтезируют структуры на базе двумерных слоев. Начинают нередко с того, что с помощью липкой ленты отшелушивают от объемного кристалла «флейки» (от *flakes*), слои толщиной в один или несколько атомов. Затем начинается фаза «атомного конструктора», сборки вандерваальсовых гетероструктур: используя высокоточные манипуляторы, ученые укладывают «флейки» один на другой.



«Подборка материалов будет совершенно разной для детектора терагерцового диапазона и быстродействующего транзистора, — продолжает завлаб Дмитрий Свинцов. — Когда конструкция из отшелушенных флейков экспериментально подтверждает свою перспективность, мы переходим к изготовлению устройств на основе промышленно выращиваемых двумерных пленок».



Фотодетекторы на основе 2D-материалов



ТЕСТИРОВАНИЕ

Главное — понять, совпало ли предсказание теоретиков с реальностью. В **лаборатории контролируемых оптических наноструктур** образцы исследуют методом рамановской спектроскопии. Лазерный луч взаимодействует с кристаллической решеткой, и по тому, как он рассеивается, ученые определяют структуру материала. «Это как отпечатки пальцев, — объясняет Надежда Белозерова, старший научный сотрудник лаборатории. — Каждый спектр уникален. Мы можем определить химический состав, качество материала и даже подсчитать числоколичество атомных слоев в образце».

С помощью атомно-силовой микроскопии в лаборатории двумерных материалов и наноустройств определяют морфологию поверхности кристалла, число количество и толщину слоев.

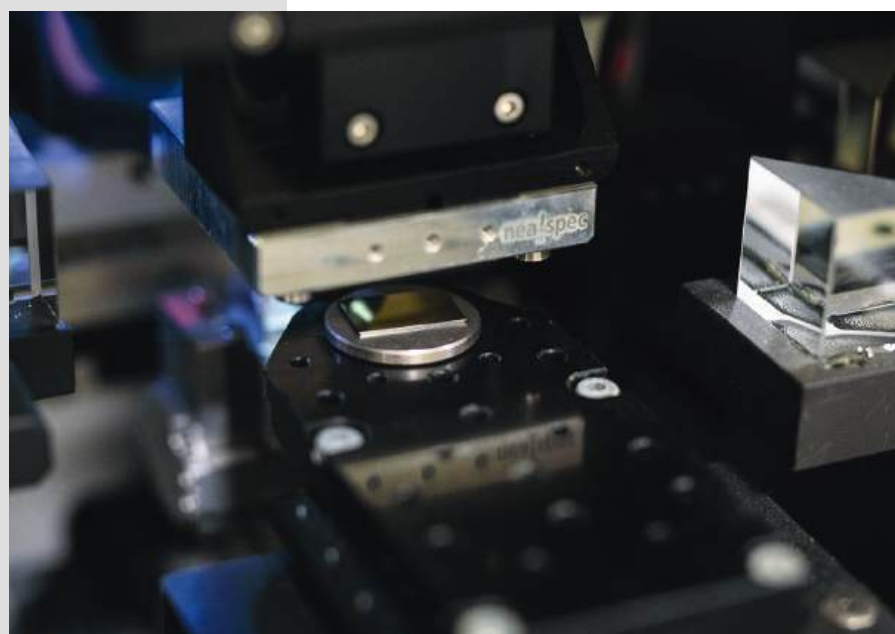


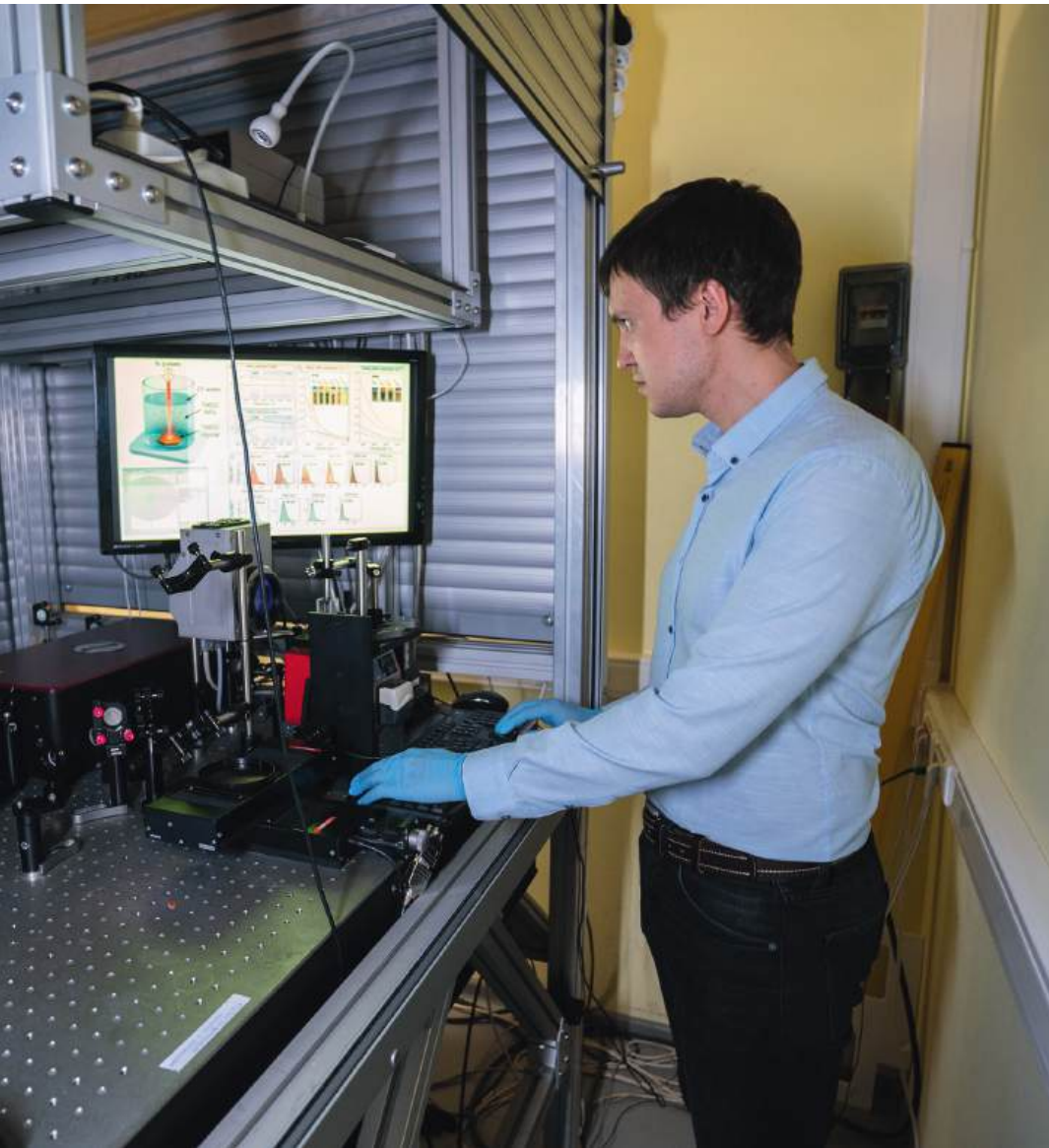
«Установка исследует образец с помощью острейшей иглы, которая „ощупывает“ его поверхность и точно отслеживает рельеф», — говорит старший научный сотрудник Дмитрий Якубовский. — Таким образом мы получаем трехмерную картину на микроуровне с точностью до нанометра».



В лаборатории нанооптики и плазмоники ученые измеряют, как новые двумерные материалы отражают свет с разной поляризацией, определяя их оптические константы и степень анизотропии. Они работают на сканирующем ближнепольном оптическом микроскопе. В него буквально видно, как электромагнитная волна распространяется по наноразмерным волноводам.

«Мы исследуем волноводы с сечениями несколько десятков нанометров: для оптики это рекордные показатели, сравнимые с электронными аналогами. Это возможно благодаря использованию таких материалов, как гексагональный нитрид бора и дихалькогениды переходных металлов», — говорит аспирант лаборатории Дмитрий Грудинин.





НЕПЛОСКИЕ ФОРМЫ

В центре также развивают технологии создания компактных сферических наночастиц из слоистых материалов.

«Например, полупроводниковые нанорезонаторы и фототермические агенты требуют контроля размера и формы наноматериалов, — рассказал Андрей Ушков, старший научный сотрудник лаборатории нанооптики и плазмоники. — Требуется быстрый, химически чистый синтез частиц размерами десятки нанометров. Мы делаем это методом фемтосекундной лазерной абляции».

Метод заключается в облучении слоистого материала высокointенсивными лазерными импульсами, длительность которых настолько мала, что вырывает с поверхности ионы материала, а сама мишень не успевает нагреться. Каждый такой лазерный импульс создает плазменный факел, который схлопывается и конденсируется в наночастицы за миллионные доли секунды.

Полученные наночастицы в коллоидной форме готовы к использованию





Станислав Коларь настраивает фемтосекундный оптический параметрический усилитель в Центре фотоники



НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ «НОБЕЛЕВСКОЙ» ЭЛЕКТРОНИКИ

Незадолго до нобелевской недели, в конце сентября, на Физтехе проходила международная конференция «Перспективные функциональные материалы для цифровой и квантовой электроники». То, что через несколько дней после ее окончания Нобелевскую премию по физике получили изобретатели джозефсоновских контактов, на которых сегодня работает значительная доля той самой квантовой электроники – лишь совпадение. Но вместе с тем это совпадение – хорошая иллюстрация тому, что Нобелевский комитет принимает решения не в вакууме. Мы отобрали несколько докладов с конференции, чтобы показать, о чем сегодня думают ученые, которые продолжают развивать область.

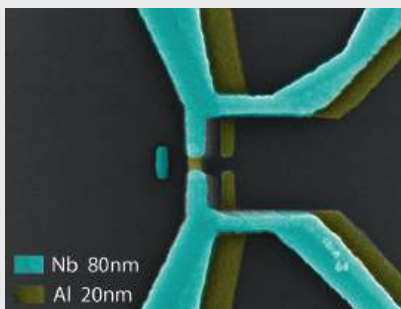


Все доклады
здесь:



ПЛОСКИЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ НАНОКОНТАКТЫ

Ученые из МФТИ, ВНИИА имени Духова, ИФТТ РАН, Сколково, а также ИЯФ и ИФ МГУ создали и описали свойства плоского джозефсоновского контакта из ниобия и алюминия, размеры которого меньше 100 нанометров. На таких масштабах, сообщают они, параметры сверхпроводящего тока и вольтажа при температуре 4 кельвина значительно увеличиваются.



Advanced Functional Materials for Digital and Quantum Electronics 2025

September 15-20, MIPT, Moscow

8 Proximity Effect Engineering in Al-Based SNS Junctions with Intrinsic Superconductivity

K.B. Polevoy^{1,2*}, S.V. Bakurskiy^{3,1}, V.I. Ruzhickiy^{1,3,2}, S.V. Egorov⁴, A.G. Shishkin^{2,1}, A.S. Frolov^{2,5}, M.A. Kirsanova⁶, I.N. Krupatin⁶, A.V. Yanilkin^{2,1}, N.V. Klenov⁷, I.I. Soloviev^{3,1}, A.A. Golubov², M.Yu. Kupriyanov^{2,3}, V.S. Stolyarov^{2,1}

¹ All-Russian Research Institute of Automatics n.a. N.L. Dubhov (VNIIA), 127030, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, 141700 Dolgoprudny, Russia

³ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russian Federation

⁴ Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia

⁵ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1/3, 119991 Moscow, Russia

⁶ Center for Energy Science and Technology, Skolkovo Institute of Science and Technology, Nobel St. 3, Moscow, 121205, Russian Federation

⁷ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119992, Russian Federation

*e-mail: (email address)



ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ СИНАПСЫ ИЗ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследователи из Пекинского технологического института (Китай) создали искусственный синапс — один из ключевых элементов для нейроморфных вычислительных устройств — из плоских пленок дихалькогенидов переходных металлов, полученных методом химического осаждения из газовой фазы.

Advanced Functional Materials for Digital and Quantum Electronics 2025

September 15-20, MIPT, Moscow

27 Fabrication and application of optical synaptic devices based on two-dimensional materials

Wenyong Su, * Tengyuan Zhang

Beijing Institute of Technology, Beijing, P. R China

*e-mail: suwy@bit.edu.cn



ПАМЯТЬ СВЕРХПРОВОДНИКА

Коллектив ученых из МФТИ и ВНИИА имени Духова создал и описал свойства сверхпроводящего гибридного многослойного кольцевого резонатора, в структуру которого был добавлен слой алюминия. Эксперимент продемонстрировал, что в зависимости от состояния спинового вентиля (которым можно управлять при помощи внешнего магнитного поля) частота резонанса такого устройства принимает разные значения. А следовательно, такой резонатор можно использовать в качестве устройства памяти.

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ СПАЙКОВЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОНЫ

Ученые из МГУ, МФТИ и ВНИИА имени Духова создали джозефсоновский контакт, в котором также есть «слабый» элемент из нормального металла (не сверхпроводника) — ниобий-золото-ниобий, для того чтобы изучить возможность использования системы из двух СКВИДов, связанных таким образом, в качестве модели искусственного нейрона.

69 Experimental implementation of elements of superconducting bio-like neurons based on Nb/Au/Nb Josephson junctions

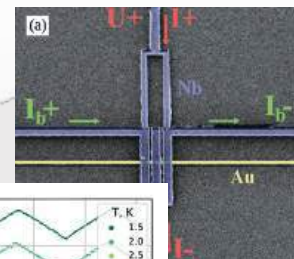
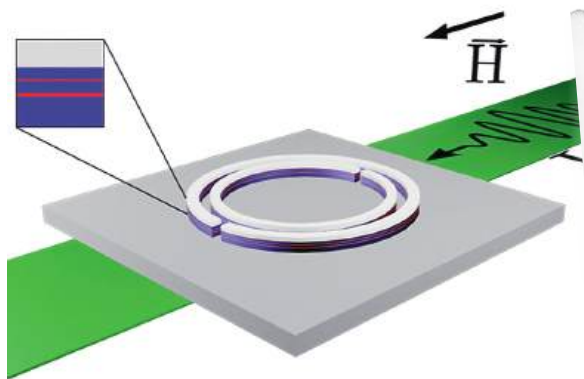
A.A. Elistratova^{1,2,*}, G.I. Gubochkin³, A.G. Shishkin^{1,2}, S.V. Bakurskiy^{2,3}, N.V. Klenov^{2,3}, V.S. Stolyarov^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology (NRU), Dolgoprudnyy, Russia

² Federal State Unitary Enterprise VNIIA named after N.L. Dukhova, Moscow, Russia

³ Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

*e-mail: elistratova.aa@yandex.ru



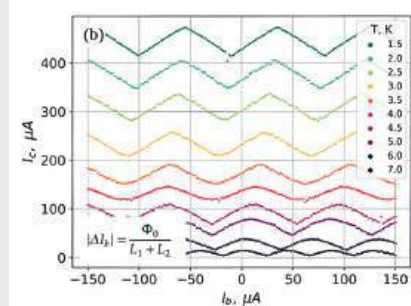
62 Study of multilayer SRRs as Magnetic-memory inductance circuits in superconducting

R. Tyumenev^{1*}, D.S. Kalashnikov¹, B.V. Fradkin², V.S. Stolyarov^{1,2}, S.V. Bakurskiy^{1,2}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

² N. L. Dukhov All-Russian Research Institute of Automation, Moscow, Russia

*e-mail: tyumenev.r@phystech.edu



А
Л
А
Н
Б
Е
К
У
Л
Е

**«ИТЭР – ЭТО МОЯ
«ФЕРРАРИ».
ЕЙ НУЖНЫ ПИЛОТЫ,
А НЕ ВОДИТЕЛИ»**



На Физтехе 25 сентября состоялась открытая лекция Алана Бекуле (Alain Becoulet), заместителя генерального директора международной организации ИТЭР по науке. До прихода в ИТЭР Бекуле возглавлял Институт термоядерного синтеза с магнитным удержанием IRFM, был директором по исследованиям Французского комиссариата по альтернативной энергетике и атомной энергии (CEA) и представителем Франции в Европейском консорциуме по термоядерному синтезу EUROfusion. О чем говорил Бекуле на Физтехе, рассказывает Егор Бирюлин.

Егор Бирюлин

Исследования в области термоядерного синтеза и магнитного удержания плазмы начались еще в конце 1950-х годов, приблизительно в то же время появились первые токамаки. После нескольких десятилетий активных исследований, к 1990-м годам научное сообщество пришло к идее, что необходимо объединить усилия и создать одну общую установку, в которую будут заложены все накопленные технологии и инженерные решения. Так в результате соглашения между СССР и США родился проект ИТЭР, к которому в дальнейшем присоединились Китай, Япония, Корея, Индия, Евросоюз. В качестве площадки для строительства нового токамака выбрали ядерный центр Кадараш во Франции.

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА ИТЭР

демонстрация научной и технической возможности использовать синтез легких ядер как источник энергии. Для этого проект ИТЭР должен добиться следующих результатов:

- **получить** коэффициент умножения мощности $Q = 10$ на топливе дейтерий-тритий (500 МВт термоядерной мощности при затратах 50 МВт на нагрев);
- **удерживать** плазму > 400 секунд;
- «ядерное лицензирование» — **отработать методы** утилизации радиоактивных элементов конструкции;
- **подтвердить** концепцию «разведения» (breeding) трития в реакторе путем инъекции лития и последующей ядерной реакции ядер лития с нейтронами;
- получить достаточно данных для дальнейших исследований.



Дизайн токамака ИТЭР заточен под длительную работу и высокий энергетический выход. Сейчас идет установка секций вакуумной камеры токамака. Некоторые комплексы уже на стадии пусконаладки.

Сроки получения первой плазмы, планы по достижению максимально возможной энергии магнитного поля и по переходу в D-T-фазу опять сдвинулись — среди причин можно выделить проблемы с качеством и ядерным регулированием, а также эпидемию ковида. Теперь старт исследований запланирован на 2034 год.

НУЖНЫ ЛЮДИ

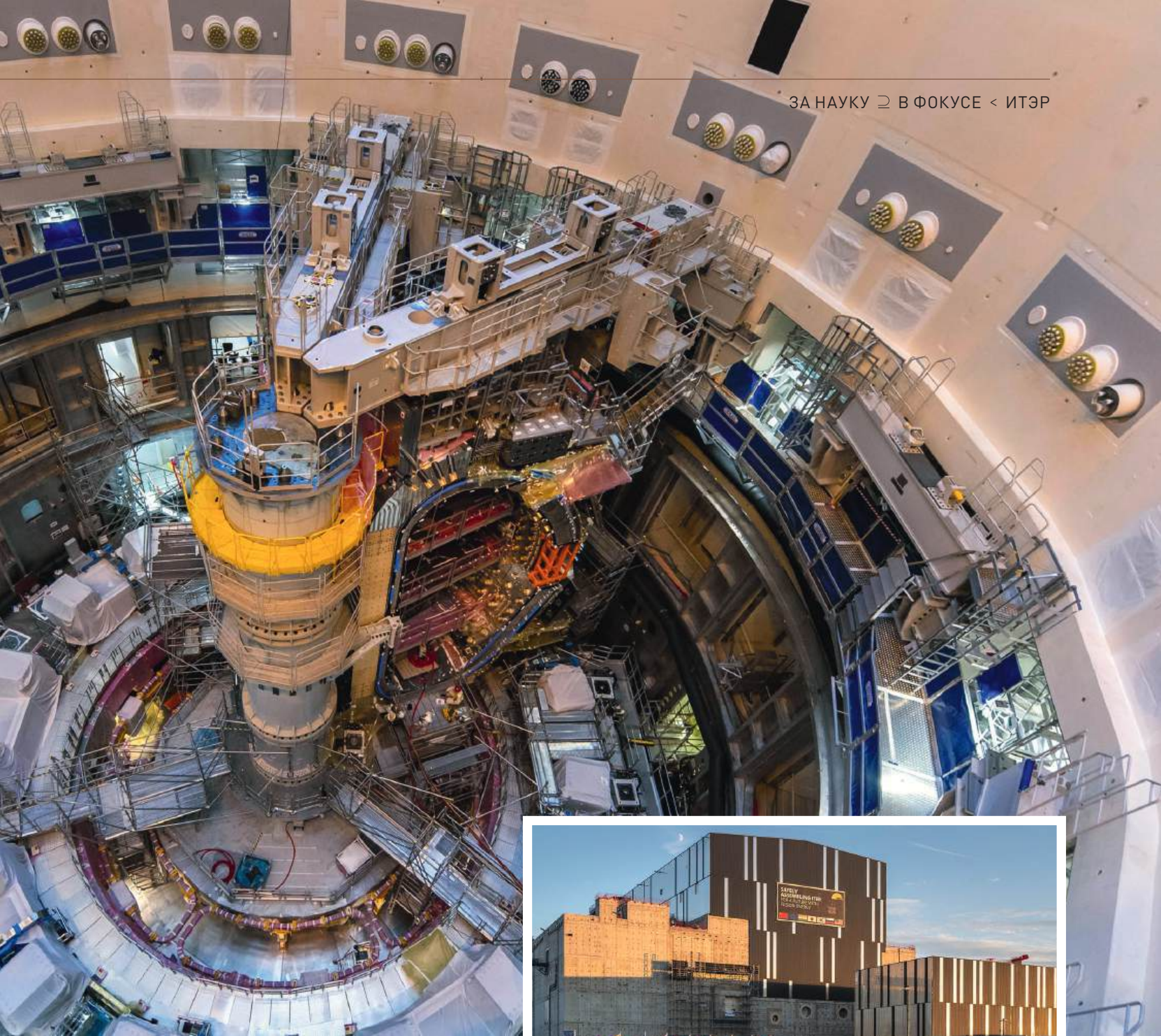
Однако «железо» — только часть проекта. По словам Бекуле, организации ИТЭР требуется подготовить около сотни специалистов: от экспертов в области магнитной гидродинамики и устойчивости плазмы в токамаке до специалистов по ядерной безопасности. Необходимо также создать техническую команду, которая будет обслуживать саму установку.

По этой причине международная организация ИТЭР создает программу подготовки специалистов — Operation Training Program. В программе подготовки кадров будет учтен весь накопленный в мире опыт работ с установками термоядерного синтеза. И поскольку пуск ITER планируется чуть меньше чем через 10 лет, уже сейчас пора готовить специалистов, которые будут управлять установкой такого масштаба.



” **Нужна сертификация. Пройдя ее, вы получите доступ в центр управления ИТЭРом. Потому что — я сейчас назову цифру, но не для того чтобы вас напугать — капитальные вложения в ИТЭР это около 22–25 миллиардов евро. Это моя «Феррари». И ей нужны пилоты, а не водители, мы не просто покатаемся собрались. Мы не хотим впустую тратить время, мы не хотим погубить нашу машину, мы хотим быть эффективны. Мы хотим получить управляемый термоядерный синтез — как можно быстрее. У нас есть общая цель, разработка реакторов. Это очень важное дело**

”
28 октября 2025 года. Центральная камера токамака ITER в процессе сборки. Вдоль верхней кромки, у обода, расположены подводящие трубы системы охлаждения
Источник: ITER



И ИИ

Заключительную часть лекции профессор посвятил одной из задач проекта — накоплению и структуризации данных. В ИТЭР будут одновременно работать много диагностик, которые будут использоваться для контроля режима работы токамака в реальном времени и для научных исследований. Собирать миллионы сигналов и анализировать их в реальном времени невероятно сложная задача из области «очень-очень больших данных».

К счастью, сейчас есть достаточно мощные компьютеры и инструменты для работы с такими массивами данных и, в частности, искусственный интеллект. Бекуле упоминает следующие области, в которых предполагается использование ИИ в качестве ассистента:



- Разработка систем токамака
- Строительство, проверка качества, корпоративные функции
- Подготовка к запуску
- Исследование физики плазмы и режимов работы токамака
- Подготовка кадров и образование
- Структурирование знаний.

Уже сейчас для быстрого доступа к внутренним данным ИТЭР использует чат-бот Lucy. Lucy позволяет сотрудникам быстро ориентироваться в базе из полутора миллионов

Вид на комплекс снаружи
Источник: ITER



документов. Инструменты с ИИ также помогают и в сборке реактора — улучшают планирование таким образом, чтобы минимизировать затраты времени и максимизировать качество работы. ИИ-модели учитывают и оптимизируют цепочки поставки, анализируют результаты текущих работ, а также помогают в ядерном лицензировании.

Физические модели ИИ, обученные на простых модельных экспериментах, планируется применить для анализа данных, полученных на действующих токамаках и на более старых машинах. Ни один человек не сможет переварить весь массив накопленных данных так, как это может ИИ. Однако все не ограничивается экспериментальными данными, существует много математических моделей, описывающих

магнитное удержание плазмы в токамаке. Для анализа и сопоставления расчетных данных также может быть использовано машинное обучение.

После лекции наступило время вопросов. Отвечал Бекуле очень подробно, так что ниже его реплики мы даем в кратком пересказе. С неповторимым оригиналом можно ознакомиться по ссылке (в QR-коде).



Q & A

Одной из проблем ИТЭР в последние годы было образование трещин после сварки элементов вакуумной камеры реактора, что привело к сдвигу сроков. Как была решена эта проблема?

Мы создаем настоящего монстра с точки зрения размеров. Когда мы начали строить токамак, был момент, когда никто не мог изготовить секцию вакуумной камеры высотой около 11 м с необходимой точностью (порядка 1 мм). По всей площади стыка детали должны совпасть друг с другом с точностью, близкой к идеалу, чтобы мы могли сварить их друг с другом автоматически так, чтобы удовлетворить требованиям ядерного регулятора. При этом несколько секций уже прибыли на площадку.

После длительного обсуждения мы решили разработать метод, который позволяет аккуратно, миллиметр за миллиметром корректировать размер готовых секций, чтобы они идеально вставали на свои места. Это легко описать, но очень трудно реализовать, а еще сложнее получить разрешение регулятора, поскольку это будет первая установка, внутри которой будет много радиоактивного трития. Вакуумная камера — первый барьер, удерживающий тритий, а он может проникать практически в любой материал. Поэтому процесс восстановления должен быть сделан правильно. Процесс утверждения очень долгий, что объясняет большую часть последних задержек в проекте. Наверное, это даже быстрее сделать, чем утвердить официально. Также ваш вопрос касается пайки трубок с охлаждающей жидкостью непосредственно к наружной поверхности вакуумной камеры. Камера снаружи покрыта километрами трубок, по которым течет гелий при температуре 80 К для охлаждения внешней поверхности вакуумной камеры. Мы проверили 30–40 км напаянных трубок и нашли три микроскопические трещи-



ны в паечном шве. Мы обратились в ЦЕРН для диагностики и в результате пришли к выводу, что это разрушение связано с возникновением напряжений. Далее эти трубки будут напаяны заново.

Если концепция реактора ИТЭР полностью проработана, нужны ли новые теоретические модели, например модели динамики плазмы? Или ИТЭР — установка больше для инженеров и экспериментаторов?

Прежде всего я сам занимаюсь фундаментальной физикой. Я могу сказать, что физика УТС и физика плазмы никогда не закончится. Мы находимся в самом начале пути исследования физики плазмы. Она уже невероятно сложная, если рассматривать всю Вселенную, и она тем более сложная в такой ограниченной среде, как у нас, где есть взаимодействие со стенкой камеры, с магнитным и электрическим полем. Так что ваш вопрос очень интересный. ИТЭР строится для операторов или для ученых? Сегодня, де-факто, все, что связано с железом, — в процессе изготовления. Но прежде всего в отделе, который я возглавляю, есть научное подразделение. Задача научного отдела сегодня — ответить на вопрос: сможем ли мы достичь запланированных результатов, если отклонимся от первоначального плана? Некоторые планируемые результаты глубоко связаны с физикой связанных с ними процессов. Например, одно из последних изменений — замена бериллия на вольфрам породило много вопросов, и многие вопросы все еще открыты.

В то же время научное подразделение создаст план экспериментов на ИТЭР. ИТЭР будет буквально создавать новую физику. ИТЭР в 10 раз больше, чем любой другой токамак, который когда-либо создавался, так что мы попадем в абсолютно новую область. Как будет работать токамак и как будет вести себя плазма там, пока никто не может дать однозначный ответ. Поэтому, конечно, мы должны изучить физику, взглянуть правде в глаза и скорректировать поведение машины (ИТЭР). Это работа не для операторов, а для ученых. Почему эта машина так работает? Почему, когда я веду автомобиль, если я убираю руки с руля, он поворачивает влево или вправо? Это значит, что вы должны понять, почему, а затем вы должны придумать способ избежать этого, жить с этим. Это физика.

Вы упомянули, что используете ИИ-обработку. Есть ли у вас специальная команда программистов, которые создают ИИ-модели? Или вы используете какие-то уже созданные модели, которые были созданы другими компаниями? Можно ли действительно доверять искусственному интеллекту?

Прежде всего — нет, у нас недостаточно IT-специалистов для выполнения такой масштабной задачи. Наш IT-персонал также выполняет IT-часть самого ITER. Сейчас мы набираем немного больше сотрудников, но в конце концов, я думаю, у меня будет пять человек, которые будут заниматься текущей работой. Сегодня с нами работают очень крупная американская IT-компания и очень крупная японская

компания, и при этом мы стремимся к большему. Эти компании существуют не для того, чтобы решать тривиальные проблемы. Мы работаем с ними в рамках соглашения о сотрудничестве без каких-либо денег. И мы определяем задачи, которые хороши для них, потому что это новые уникальные проблемы, и хороши для нас, потому что это то, что мы не можем сделать своими силами.

Также мы рассматриваем работу со студентами, которые обучены работе с ИИ. Пока что в институтах такие учебные программы встречаются не очень часто. Но если ваш институт имеет такую учебную программу, может, вы бы хотели принять участие в проекте. Я даю вам задачу, которую хочу решить, и вы ее решаете в команде с двумя преподавателями и пятью или шестью студентами, а потом используете ее в качестве учебного проекта. Это именно та модель, которая мне бы понравилась.

Говоря об ИИ, мы прежде всего должны понимать, что это инструмент, он не может полноценно заменить человека. Например, если мы обучим его чему-то не совсем правильному, то он будет систематически воспроизводить эту ошибку. Несмотря на это, ИИ — невероятно мощный инструмент.

Также задача по анализу данных физических экспериментов, довольно специфична. ИИ-модели, например любые современные генераторы изображений и видео, можно обучить и без физических уравнений. Однако с нашей задачей все не так просто. Если мы начнем обучать ИИ, не закладывая физику и уравнения, то в конце концов ИИ скажет нам, что гравитация существует, поскольку люди падают вниз, а мир нельзя пересечь. ИИ можно сравнить с трехлетним ребенком, который учится на примерах, не зная физических законов. Возвращаясь к базе данных термоядерных экспериментов, обучая модель, рассказывая ей, какие явления она наблюдает, мы в конце концов должны контролировать, чему она научилась.

Важно еще раз подчеркнуть, ИИ — не замена человеку, это инструмент, который может дополнить и упростить работу.

Каково будущее УТС, если ИТЭР не сможет добиться $Q = 10$ или хотя бы $Q = 1$? Ведь мы используем масштабирование, чтобы убедиться, что ИТЭР будет работать должным образом. ИТЭР будет существенно больше, чем самые большие построенные токамаки, почему мы уверены, что исследованные на них закономерности будут работать и на ИТЭР?

Вы совершенно правы. И это, кстати, причина, по которой мы создаем ИТЭР. Потому что, если бы наше предсказание было верным, не было бы необходимости создавать ИТЭР. Мы проверяем

это, делаем прогноз, проводим эксперимент и проверяем.

Нельзя точно сказать, будет система работать, как запланировано, или не будет. Система будет работать как-то по-своему, и мы должны будем точно понять, почему. Даже если она будет работать именно так, как мы планировали, мы все равно будем должны понять, почему. Если ИТЭР с треском выйдет из строя, или мы не сможем извлечь плазму, или если наибольшее значение Q составит 3,5, то все, это конец термоядерному синтезу на Земле, по крайней мере концу данному методу. Я надеюсь, что вместо $Q = 10$, у нас будет $Q = 20$ или около того. Это мой оптимистичный подход. В любом случае, каким бы ни был результат, нам придется все пересмотреть и принять окончательную точку зрения, чтобы двигаться дальше.

Какие материалы могут использоваться для облицовки вакуумной камеры термоядерных реакторов?

Совершенно очевидно, что бериллий, который предполагался к использованию в качестве материала первой стенки, не является экологически чистым материалом. Также на Земле его слишком мало, чтобы использовать его постоянно. Поэтому единственный материал, который мы можем использовать, это вольфрам. Да, использование вольфрама создает сразу две большие проблемы.

Во-первых, попадая в плазму в результате испарения, вольфрам существенно увеличивает потери на излучение. Это также влияет на режим горения разряда, поэтому мы сейчас занимаемся пересчетом рабочих точек и проверяем, насколько большим будет влияние примесей. Во-вторых, вольфрам не может играть роль геттера кислорода. Поэтому, если мы хотим, чтобы наша установка работала «чисто», мы должны понять, как нам удалить остаток кислорода и азота из камеры. Для этого, например, первую стенку покрывают бором так называемый процесс боронизации стенки.

В некотором смысле мы переносим риск с одного места на другое, но риск все равно остается.

Исследование проводится следующим образом: вы определяете, в чем заключается риск, а затем снижаете его. Если вы не можете смягчить риск с текущим решением, вы меняете решение.

Итак, мы в сложной ситуации, и это тоже один из примеров, который можно скорректировать.

Будет ли использоваться жидкий литий в качестве первой стенки?

Нет, не на данном этапе. В ИТЭР литий будет только в системе размножения трития. В этой системе используются специальные материалы, в состав которых входит литий. При бомбардировке этих материалов нейтронами в ходе

ядерной реакции образуется тритий. Причем трития должно быть достаточно, чтобы поддерживать реакцию. Мы создаем такой топливный цикл. И ИТЭР будет заниматься оценкой скорости размножения трития при использовании этой технологии.

Вы говорите немного о другой задаче и ее решении. Мы делаем стенку жидкой, чтобы избежать ее плавления в результате теплового воздействия. При этом, если стенка литиевая, мы сразу решаем и задачу создания топливного цикла. При этом нас не волнует тепловая нагрузка на стенку: она по большей части уходит на испарение материала стенки. Некоторые считают, что такая технология в перспективе позволит создать более мощные и даже более компактные реакторы. Но нам нужно больше экспериментальных результатов.

В токамаках есть несколько каналов нагрева первой стенки: излучение, непосредственное взаимодействие плазмы со стенкой, заряженные частицы. Какой из этих механизмов передачи энергии преобладает во время стационарного режима работы и во время переходных процессов в плазме (ELM, срывы)?

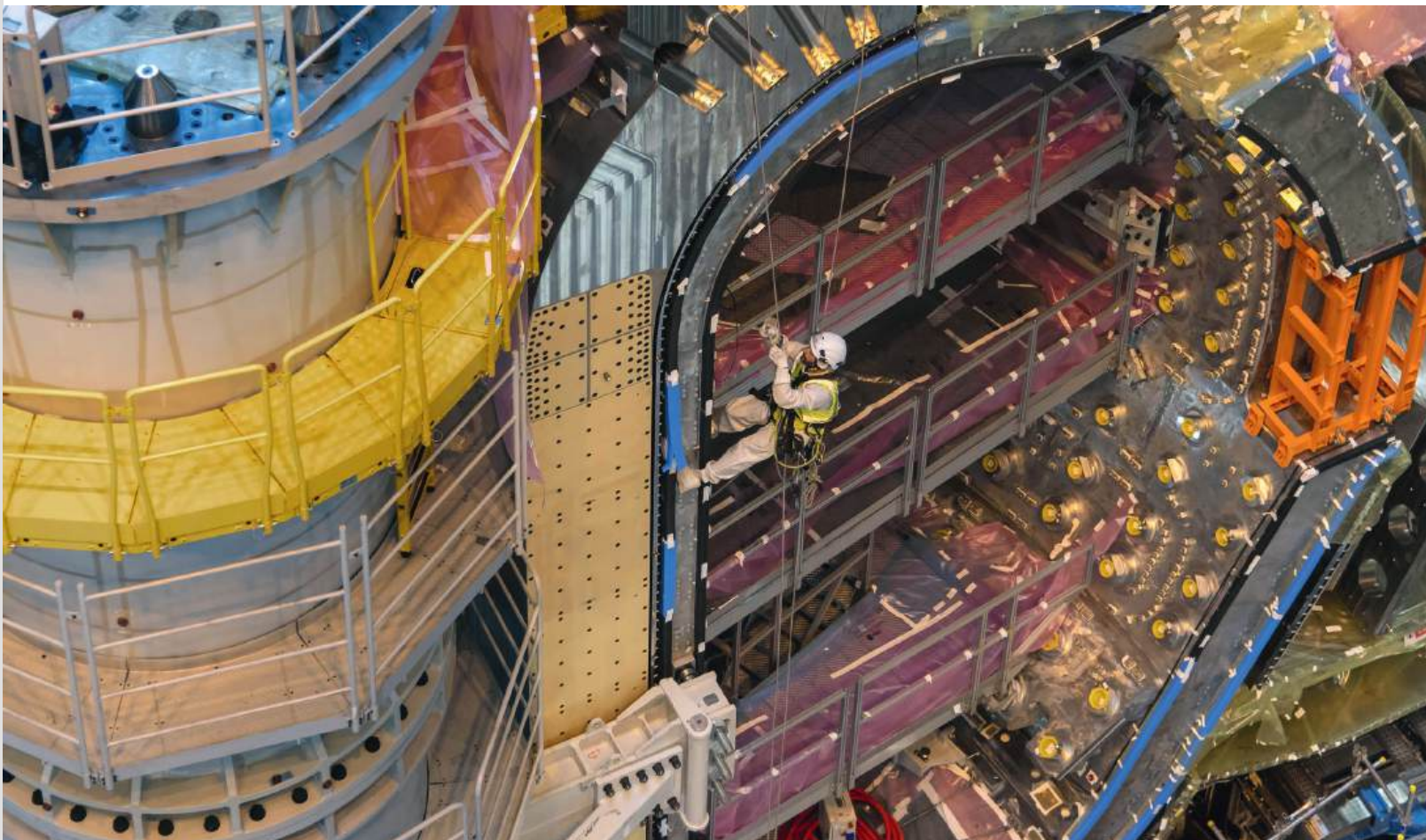
В токамаках плазма излучает как гамма-кванты, так и нейтроны. Также режим удержания

не совсем идеален, поэтому на стенку попадают и ионы. В результате стенка подвержена химической и физической эрозии. В то же время происходит повреждение конструкции установки нейтронами.

Переходные процессы, срывы, влекут за собой более серьезные последствия, поэтому их нужно избегать. Срыв — это крупномасштабная МГД-нестабильность, которая очень быстро, за пару десятков миллисекунд или около того, разрушает магнитную конфигурацию. И внезапно вся плазма может свободно перемещаться, куда ей заблагорассудится. Тепловая нагрузка на стенку возрастает кратно, уменьшается ток плазмы, появляются колоссальные электромагнитные силы.

Также вы не упомянули пучки быстрых электронов. Когда ток плазмы ослабевает, магнитная система сама по себе пытается компенсировать это, создавая электрическое поле. Плотность уменьшается, и наступает момент, когда возникает поле, ускоряющее электроны. В результате возникают пучки электронов со скоростью, близкой к световой, которые в конечном итоге вгрызаются в стенку. Они буквально могут пробить в ней отверстие. Поэтому в ИТЭР мы не хотим сталкиваться со срывами тока.

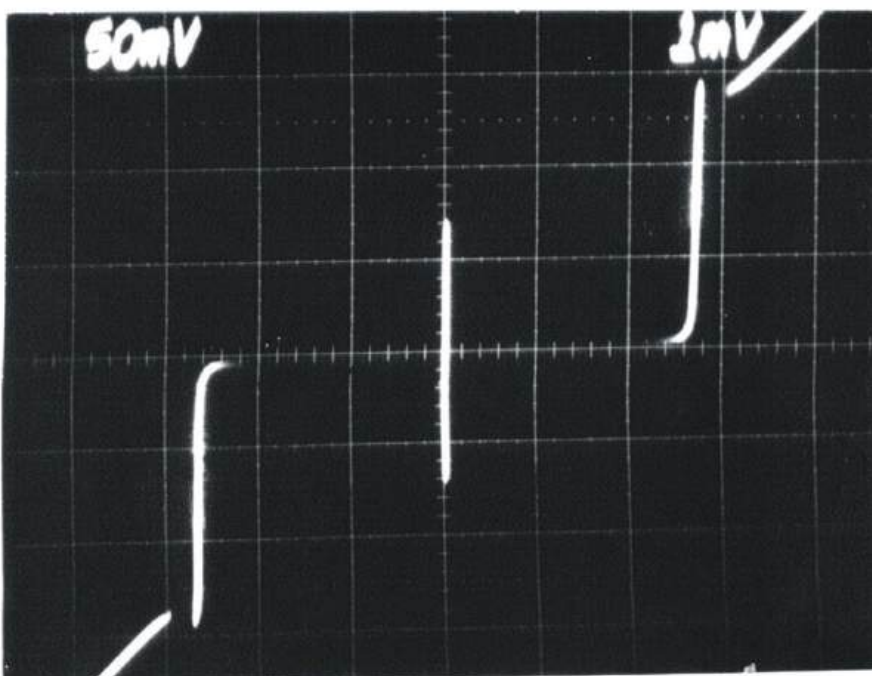
Вид сверху на секторный модуль, 1/9-ю часть плазменной камеры. Он состоит из двух магнитов тороидального поля (массивные стальные элементы), тонких панелей теплового экрана и сектора вакуумной камеры (двухстенной; контуры стен обозначены черной лентой) Источник: ITER



МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА

Алексей Левин

В истории исследования сверхпроводимости 1957 год занимает особое место. В феврале Джон Бардин, Леон Купер и Роберт Шриффер отправили в журнал *Physical Review* короткое письмо «Микроскопическая теория сверхпроводимости», за которым в июле последовала рукопись 20-страничной статьи «Теория сверхпроводимости». Эти работы по-новому описывали физические механизмы исчезновения электрического сопротивления у некоторых металлов при охлаждении до гелиевых температур, открытого нидерландским физиком Хейке Камерлинг Оннесом 8 апреля 1911 года.



Теория БКШ (то есть Бардина—Купера—Шриффера), как ее стали называть, была бы невозможна без ключевых экспериментальных результатов 1950 года. Американские физики Чарльз Рейнольдс и Бернард Серин и их соотечественник Эмануэль Максвелл обнаружили, что у изотопов ртути температура перехода в сверхпроводящее состояние изменяется обратно пропорционально квадратному корню атомного веса. Отсюда следовало, что сверхпроводимость скорее всего возникает при участии колебаний кристаллической решетки, частоты которых подчиняются такой же зависимости. Это явление было названо **изотопическим эффектом**. В том же году профессор теоретической физики Ливерпульского университета Герберт Фрелих (к слову, в 1930-х он работал в ленинградском Физтехе вместе с Яковом Френкелем) предсказал изотопический эффект в своей модели сверхпроводимости, созданной незадолго до того, как до него дошли новости из



Слева направо: Поль Эренфест, Хенрик Лоренц, Нильс Бор и Хейке Камерлинг Оннес в лаборатории последнего. Лейден. 1919 год

лабораторий. Теория Фрëлиха, которая объясняла сверхпроводимость взаимодействием отдельных электронов с ионами кристаллической решетки, оказалась короткоживущей, но подкрепила уже имевшиеся подозрения, что сверхпроводящее состояние каким-то образом возникает на стыке между решеткой и электронами проводимости. В этом смысле можно сказать, что путь к ее созданию начался 75 лет назад — вполне юбилейная дата. Эта юбилейность оттеняется тем, что как раз в 1950 году сверхпроводимостью занялся Джон Бардин, уже известный участием в изобретении транзистора. Он думал о ней еще в предвоенные годы, но потом надолго переключился на другие проекты. После открытия изотопического эффекта Бардин решил вернуться к этой проблеме. А поскольку руководство Белловских лабораторий, где он тогда работал, ожидало от него исследований по микроэлектронике, Бардин решил возобновить академическую карьеру и в 1951 году перешел в Иллинойский университет. Его первая модель, разработанная совместно с Дэвидом Пайнсом, подобно модели Фрëлиха учитывала взаимодействие между электронами и колебаниями кристаллической решетки, но в целом была не слишком удачной. Однако в 1955 году Бардин привлек себе в помощь блестящих молодых теоретиков Лео-на Купера и Роберта Шриффера. Результатом их сотрудничества стала теория БКШ.

ЧТО, КАК И ПОЧЕМУ

Начало ей положил Купер. В 1956 году он показал, что вблизи абсолютного нуля электроны проводимости в металле способны формировать пары, с равными и противоположно

направленными импульсами. Для этого нужно, чтобы энергетические уровни электронов лежали (а) вблизи поверхности Ферми и (б) чтобы между ними существовало эффективное притяжение, пусть сколь угодно слабое. Поскольку в результате такого спаривания полная энергия системы уменьшается, оно обладает определенным запасом прочности и само по себе не разрушается.

Второе условие совершенно естественно, смысл же первого надо пояснить. В квантовой механике существует теорема, согласно которой две притягивающиеся частицы могут образовать связанную пару в трехмерном пространстве, только если притяжение между ними оказывается достаточно сильным. Однако если обе частицы находятся вблизи поверхности Ферми, их движение из трехмерного превращается в двумерное, и эта теорема не работает. Более того, в двумерном пространстве спаривание происходит и при сколь угодно малом притяжении.

Точности ради надо отметить, что электроны в металле взаимодействуют друг с другом и потому образуют не Ферми-газ, а Ферми-жидкость. Однако в нормальных металлах вблизи поверхности Ферми она проявляет себя как газ почти свободных квазичастиц, которые имеют тот же заряд, что и электроны, но отличаются от них законом дисперсии (то есть характером зависимости энергии от импульса). Именно такие квазичастицы образуют пары по механизму Купера. Теперь вернемся к куперовскому притяжению. Казалось бы, откуда ему взяться, коль скоро квазичастичные возбуждения электронной Ферми-жидкости отталкиваются по закону Кулона? Как догадался еще Фрëлих, его может создать кристаллическая решетка, состоящая из положительных ионов. Поскольку движущийся квазиэлектрон притягивает близлежащие ионы, они смещаются в его сторону и создают локальный избыток положительного заряда. Поляризованный участок решетки, в свою очередь, может притянуть другой квазиэлектрон, который также сдвинется по направлению к первому. Конечно, для этого необходимо, чтобы опосредованное решеткой притяжение квазичастиц преобладало над кулоновским отталкиванием. Это объясняет, почему лучшие проводники, такие как серебро и медь, не превращаются в сверхпроводники: их электроны проводимости слишком слабо взаимодействуют с ионами решетки. В теории твердого тела упругие колебания кристаллической решетки описываются как движение **фононов**, квантов звуковых волн. В этих терминах спаривание квазичастиц (или, для простоты, электронов) возникает благодаря обмену фононами, или, как говорят физики, электрон-фононному взаимодействию.



Леон
Купер



Джон
Шриффер

Можно сказать, что электроны притягиваются, испуская и поглощая фононы. Именно этот механизм заложен в основу теории БКШ. Однако исходная модель Купера имеет более общий характер, поскольку указывает на возможность спаривания фермионов под воздействием любого эффективного притяжения, вовсе не обязательно обусловленного обменом фононами. Такие альтернативные механизмы сверхпроводимости, по всей вероятности, существуют, но их реальность еще окончательно не доказана. Нормальное электрическое сопротивление возникает из-за рассеивания носителей тока на тепловых колебаниях решетки (фононах), а также на атомах примесей и иных неоднородностях. Если ток переносят отдельные электроны (напомню еще раз, что на самом деле это квазичастичные возбуждения электронной ферми-жидкости!), то сопротивление не может быть нулевым, поскольку они рассеиваются при любых энергиях. Иное дело, если в этом качестве выступают куперовские пары — несущие, естественно, двойной электронный заряд. Спаренный электрон может претерпеть рассеяние, только разорвав связь с партнером. Поэтому для разрушения сверхпроводимости средняя скорость, которую набирают электроны, должна превысить определенный предел, пропорциональный энергии связи электронных пар. Эта предельная скорость соответствует критической плотности тока. Парные связи также должны разрываться при взаимодействии с фононами достаточно высоких энергий, что и происходит при повышении температуры выше критической. Ниже этой границы куперовские

пары при встрече с фононами чаще всего не рвутся, а просто переходят в новые состояния. Теория БКШ позволила переосмыслить физический смысл критической температуры T_c . В принципе она вводит два температурных параметра: температуру начала образования куперовских пар T_1 и температуру T_2 , при которой происходит взаимное упорядочивание фаз волновых функций, описывающих эти пары. В теории БКШ T_2 больше T_1 , и потому сверхпроводимость наступает при охлаждении до T_1 . Однако в принципе возможна и обратная ситуация, когда сверхпроводимость наступает при температуре T_2 . В общем случае $T_c = \min(T_1, T_2)$. Новая теория объяснила такое важнейшее свойство простых сверхпроводников (сейчас их называют сверхпроводниками первого рода), как полное объемное вытеснение внешнего магнитного поля (иначе говоря, идеальный диамагнетизм), обнаруженное в 1933 году немецкими физиками Вальтером Мейсснером и Робертом Оксенфельдом. Поскольку спаренные квазичастицы обладают противоположными импульсами (а также, за некоторыми исключениями, и противоположными спинами), в магнитном поле на них действуют силы, направленные в разные стороны и потому работающие на разрыв пары. Если напряженность поля невелика, сверхпроводнику энергетически выгодно вытолкнуть его на поверхность и удержать куперовские пары в связанном состоянии. Хотя такое выталкивание требует расхода энергии, он с лихвой компенсируется ее экономией на сохранении куперовских пар. Средняя дистанция между спаренными электронами примерно равна 10^{-5} см и потому в тысячи раз превышает межатомные расстояния.

Еще одно уточнение. Бардин, Купер и Шриффер в своей работе просто постулировали наличие эффективного притяжения между электронами вблизи поверхности Ферми, хотя, конечно, они имели в виду электрон-фононное взаимодействие. При этом они использовали максимально упрощенный гамильтониан этого взаимодействия, выраженный через ступенчатую функцию. Более глубокий анализ связей между электронами и фононами вскоре выполнили другие теоретики, в частности будущий действительный член РАН Герасим Элиашберг. В 1960 году он предложил новую версию микроскопической теории сверхпроводимости с более реалистичным гамильтонианом. Она описывает металлы с сильным электрон-фононным взаимодействием, например свинец и олово. Теория БКШ, напротив, справедлива для металлов с относительно слабым взаимодействием этого типа, например алюминия.

Напоследок кратко упомяну важнейший вывод

теории БКШ о наличии энергетической щели в спектре куперовских квазичастиц вблизи поверхности Ферми. Ее ширина определяет масштаб энергии, необходимой для разрыва пары, и по численной величине близка постоянной Больцмана, умноженной на температуру перехода в сверхпроводящее состояние.

СВЕТ В КОНЦЕ КВАНТОВЫХ ТУННЕЛЕЙ

В 1962 году 22-летний аспирант Кембриджского университета Брайан Джозефсон сделал на базе теории БКШ удивительный прогноз. Он стал результатом переосмысления процесса квантового туннелирования куперовских пар между двумя сверхпроводниками, разделенными тонким электроизолирующим слоем, создающим между ними потенциальный барьер. Чтобы понять смысл открытого Джозефсоном эффекта, стоит сначала обратиться к истории.

Квантовое туннелирование давно считается одним из самых парадоксальных (а потому контринтуитивных) проявлений квантомеханических закономерностей. Вряд ли о нем надо подробно рассказывать аудитории журнала «За науку»: это стандартная часть курсов квантовой механики. Поэтому напомним, что благодаря туннелированию частицы могут преодолевать потенциальные барьеры или покидать потенциальные ямы даже в тех случаях, когда их кинетическая энергия уступает высоте барьера или глубине ямы. Выражаясь иначе, туннелирующие частицы временно обретают отрицательную кинетическую энергию, которая и позволяет им двигаться столь странным образом. В классической физике такие движения в принципе невозможны.

Туннелирование частиц через потенциальные барьеры непосредственно вытекает из определенного класса решений уравнения Шредингера. Первым это в 1927 году понял немецкий физик Фридрих Хунд, который опубликовал свои результаты в двух статьях в журнале *Zeitschrift für Physik*. Годом позже более реалистичный анализ процессов туннелирования выполнили соотечественник Хунда Лотар Нордгейм и британский физик Ральф Фаулер. В том же году приехавший в научную командировку в Геттингенский университет Георгий Гамов и, независимо от него, принстонские физики Рональд Гёрни и Эдвард Кондон объяснили на базе теории квантового туннелирования процессы ядерного альфа-распада. В 1932 году Джордж Уленбек с успехом применил эту теорию в молекулярной физике. Сегодня может показаться странным, что экспериментальные исследования процессов электронного туннелирования в кристалличе-

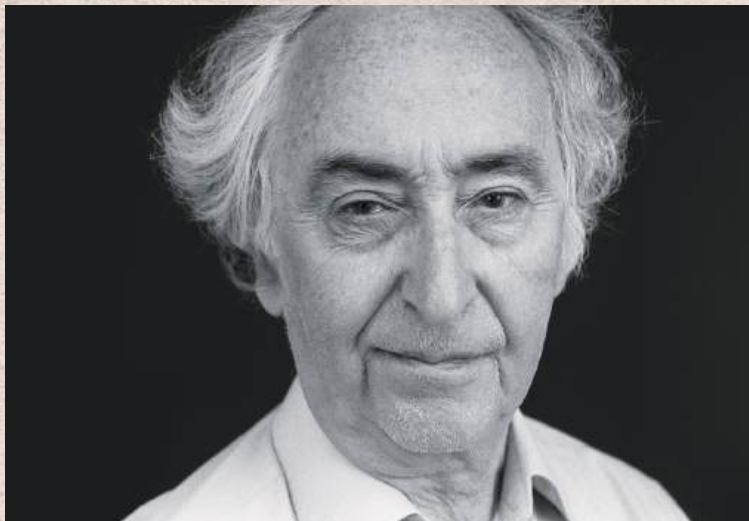
ских структурах пришлось ждать целую четверть века. В 1957 году японский физик Лео Эсаки впервые наблюдал туннелирование электронов через изолирующий контакт между двумя полупроводниками с электронной и дырочной проводимостью. Это открытие послужило созданию туннельного диода, которое стало важным вкладом в прогресс твердотельной электроники. Результаты Эсаки подвигли переехавшего в США норвежца Айвара Джайевера на попытку обнаружить туннельный эффект с участием сверхпроводников. В качестве «контактеров» он выбрал тонкие пленки алюминия и свинца, разделенные барьером из оксида алюминия. В первой серии его экспериментов температура подбиралась так, что свинец переходил в сверхпроводящее состояние, в то время как алюминий оставался нормальным металлом. Джайевер обнаружил и измерил туннелирующий ток, возникающий под действием внешнего потенциала. Охладив установку сильнее и сделав сверхпроводником алюминий, он обнаружил пиковое значение туннельного тока. Его величина зависела от соотношения энергетических щелей обоих сверхпроводников, что соответствовало предсказанию Джона Бардина. Этот эффект впервые позволил непосредственно измерять величины таких щелей, что было очень важным достижением.

ДВА ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА

В экспериментах Джайевера туннелирование осуществлялось за счет движения «одиночных», неспаренных электронов (поэтому выше критических температур для обоих металлов система работала как простой резистор). Однако через оксидный барьер могут туннелировать и куперовские пары, причем с парадоксальными результатами. Триггером же для Джозефсона

Джон Бардин





стала одна из лекций, которые в 1962 году читал в Кембридже приехавший из США на сabbatical-году крупнейший специалист по физике твердого тела, лауреат Нобелевской премии 1977 года Филип Андерсон, который в 1958 году, через год после Бардина, Купера и Фишера опубликовал свою версию микроскопической теории сверхпроводимости.

Джозефсон показал, что в определенных условиях туннелирование куперовских пар между сверхпроводниками с разными химическими потенциалами порождает постоянный электрический ток, который течет в отсутствие внешнего электрического поля. При наложении небольшого внешнего напряжения ток начинает осциллировать, то есть превращается в переменный. Первый эффект принято называть стационарным, второй нестационарным. Андерсон по возвращении в США сразу организовал (вместе с английским физиком Джоном Роуэллом) проверку стационарного эффекта Джозефсона — тот был подтвержден уже в 1963 году. В последующие годы другие физики детектировали как переменные токи нестационарного эффекта, так и их электромагнитное излучение.

Джозефсон представил свою теорию с помощью математического аппарата квантовой теории поля, модифицированного для описания твердых тел (*B. D. Josephson, Possible New Effects in Superconductive Tunneling, Physics Letters, 1, №7, p. 251*). Позднее появились ее переформулировки, например на языке полуфеноменологической теории сверхпроводимости Ландау и Гинзбурга. В любом случае главная причина джозефсоновских эффектов состоит в том, что куперовская пара по сути является волновым пакетом протяженностью порядка 10^4 ангстрем. Если толщина изолирующего слоя между сверхпроводниками не превышает 10^{-100} ангстрем, пары могут проходить через него, сохраняя свою целостность. В результате возни-

Брайан
Дэвид
Джозефсон

кают сверхпроводящие токи, которые не вызывают падения напряжения на джозефсоновском контакте. Однако такая ситуация сохраняется лишь до поры до времени. Усиление тока посредством внешнего потенциала подпитывает куперовские пары энергией, которую они должны излучить в виде фотонов. Поскольку постоянный ток стационарного эффекта не может быть источником такого излучения, он делается переменным.

В заключение — чуть-чуть элементарной математики. Каждому сверхпроводнику отвечает некоторая волновая функция, которую можно записать как произведение ее модуля (равного квадратному корню из плотности куперовских пар) на фазовый множитель. Так что имеем две волновые функции $\Psi_1 = (n_1)^{1/2}e^{i\theta_1}$ и $\Psi_2 = (n_2)^{1/2}e^{i\theta_2}$. Здесь n_1 и n_2 обозначают плотности куперовских пар в первом и втором сверхпроводнике, а θ_1 и θ_2 соответствуют их фазам. Назовем символом $\Delta\theta$ разность этих фаз (то есть, $\theta_1 - \theta_2$), которая устанавливается при согласованном туннелировании многих пар. Из теории Джозефсона следует, что сила стационарного тока через контакт между сверхпроводниками пропорциональна синусу этой разности: $I = I_c \sin \Delta\theta$. Здесь I_c так называемый критический ток, который в реальных экспериментах лежит в диапазоне от наноампера до миллиампера. Эту формулу при-

Филип
Андерсон



нято называть первым уравнением Джозефсона. Описание нестационарного эффекта чуть сложнее. При наложении внешнего потенциала U разность фаз начинает зависеть от времени по правилу $(d/dt)\Delta\theta = 2eU/\hbar$. Здесь e — заряд электрона (следовательно, $2e$ — заряд куперовской пары), и \hbar — усеченная постоянная Планка. Это второе уравнение Джозефсона приводит к формуле для силы тока при нестационарном эффекте: $I(t) = I_c \sin \omega t$. Она как раз и означает, что в этом случае сила тока зависит от времени по периодическому закону. Его частота ω равна $2eU/\hbar$ и для реальных экспериментов лежит в микроволновой области.

Физический механизм нестационарного эффекта Джозефсона связан со способностью куперовских пар туннелировать между двумя стационарными состояниями по обе стороны барьера, чьи энергии различны благодаря приложенному напряжению. Поэтому они перемещаются в ту и другую сторону, подобно качанию маятника. Это и приводит к возникновению переменного электрического тока. Этот ток рождает электромагнитное излучение, которое уносит часть энергии электронов. Выражаясь точнее, при разности потенциалов на джозефсоновском контакте в сверхпроводящей электронной жидкости возникают квантованные вихри, пересекающие его в обоих направлениях. Лабораторные приборы регистрируют эти вихри как переменный ток. Конечно, это только самая общая схема нестационарного эффекта Джозефсона, но суть дела она передает. Поскольку внешнее напряжение и частоту тока можно измерить с очень высокой точностью, этот эффект позволяет вычислить отношение заряда электрона к постоянной Планка в высшей степени прецизионно.

Эффект Джозефсона имеет и другие важные применения. В частности, на его основе работают высокочувствительные сверхпроводящие магнитометры.

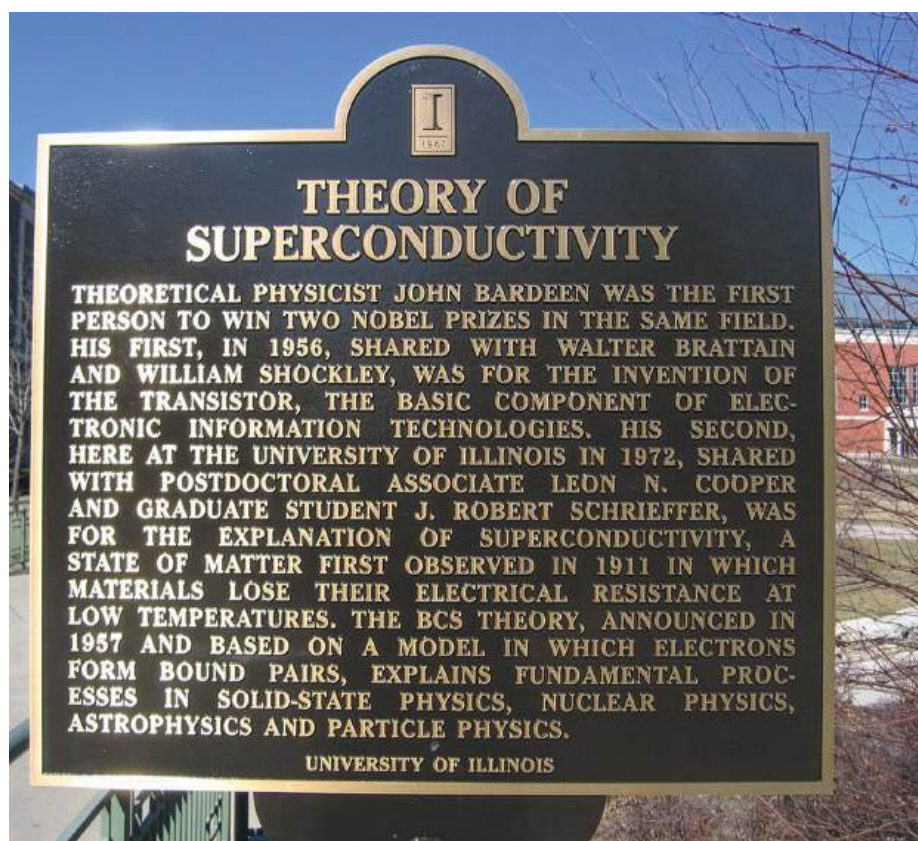
Отнюдь не все физики приняли выводы Джозефсона с тем же энтузиазмом, что Андерсон. Например, Джон Бардин, на теорию которого опирался Джозефсон, их поначалу отверг. Правда, несогласие он выразил без особого шума, в добавленном при корректуре последнем параграфе статьи «Туннелирование в сверхпроводниках», опубликованной в августе 1962 года в журнале *Physical Review Letters*. Он считал, что спаривание электронов не может распространяться через барьер, и потому объявил теорию Джозефсона ошибочной. Уже в следующем месяце они лично скрестили шпаги на одном из заседаний Восьмой международной конференции по физике низких температур в лондонском Колледже королевы Марии. В ходе вполне спокойной дискуссии Бардин критико-

вал теорию Джозефсона, а тот успешно опровергал его возражения.

Через 10 лет после этого, в 1972 году, теория БКШ принесла своим авторам Нобелевскую премию. У нее есть серьезное ограничение — не позволяла предсказать свойства новых сверхпроводников. Американский физик Бернд Маттиас, который в 1950–70-е годы вместе с коллегами открыл сотни сверхпроводящих материалов, остроумно заметил, что теория БКШ *tells us everything but finds us nothing* (воздержусь от перевода, ибо оригинал уж слишком хорош!). Поэтому дальнейшие успехи физики сверхпроводимости основывались на новых экспериментальных открытиях, которые затем осмыслялись теоретиками. Этот процесс до сих пор не закончен.

А Джозефсон приехал в Стокгольм сразу же после Бардина, в 1973 году — он получил половину Нобелевской премии по физике за тот самый эффект, который описал в 1962-м. Вторую половину в равных долях дали Джайеверу и Эсаки. Спор с Бардином никак не помешал Джозефсону получить Нобелевскую премию, скорее составил ему неплохую рекламу. Для шведских академических арбитров решающим фактором стали экспериментальные подтверждения джозефсоновской теории, которые, как уже говорилось, были получены всего за два-три года. Конец — делу венец, и для Джозефсона он оказался вполне счастливым. В 1974 году он стал в Кембридже профессором физики и оставался им 23 года. Так чего же боле?

Мемориальная табличка в честь Бардина и теории БКШ на территории Университета Иллинойса
Фото: Ragib Hasan / wikimedia commons / CC BY-SA 2.5



Я НЕ ЛЮБЛЮ, КОГДА ЧТО-ТО НЕ ЗАКОНЧЕНО ХОТЯ ЭТО И ПЛЮС, И МИНУС

**ФЕДОР МАКСИМОВ, ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ
ЛАБОРАТОРИИ ФИЗИКИ МАГНИТНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР
И СПИНТРОНИКИ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЦЕНТРА ФОТОНИКИ И
ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МФТИ**



Текст: Варвара Кравцова

Фото: Анастасия Каплина

ЦЕЛИ

Ближайшая — защитить кандидатскую. Защита у меня назначена через два с половиной года, несколько статей уже выпущены, но сейчас я готовлю «главную», которая посвящена разработке однофотонных источников на основе низкоразмерных материалов. Это двумерные материалы, такие как дихалькогениды переходных металлов, а также одномерные структуры — углеродные нанотрубки. В свою очередь, однофотонные источники найдут применение в квантовой связи или в квантовых вычислениях. Если ставить более глобальные цели, то хотелось бы создать востребованный прибор не только для решения научных задач, но и для практического применения.

В ЧЕМ Я ХОРОШ

Трудно ответить. Ну будем считать, что в желании доделать дело до конца. Я не люблю, когда что-то не закончено. Хотя это и плюс, и минус.

В ЧЕМ СИЛА?

Пусть будет в любви.

ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ПОДРАЖАНИЯ

В первую очередь мой отец, который тоже работает в научном институте инженером-конструктором, я много взял от него. Ну и, конечно, от научного руководителя Александра Чернова, я работаю с ним уже пять лет, пришел к нему еще зеленым студентом второго курса.

СМОТРЕТЬ КИНО ИЛИ СЛУШАТЬ МУЗЫКУ?

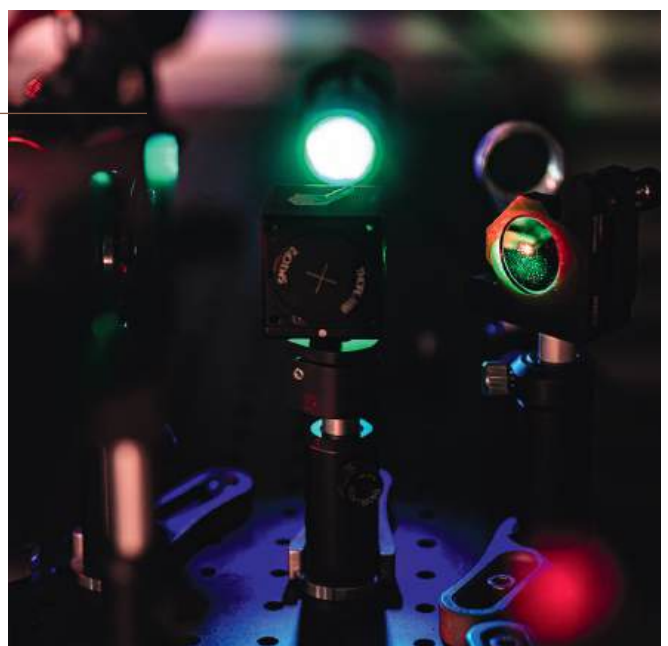
Сейчас — слушать музыку.

ДОСТИЖЕНИЯ

Пожалуй, самое осязаемое — собранная мной установка, которая позволяет измерять оптические свойства низкоразмерных материалов в разных условиях.

Она довольно большая. Это конструктор, элементы которого позволяют настроить любую часть под определенное, даже нетипичное, измерение, добавить в процесс любые элементы, максимально расширяя область ее применения. Например, криостат для измерений при температурах около 4 кельвинов. Или специальное подвижное устройство для оптического картирования. С образца на нем можно снимать оптический сигнал с разных ракурсов с шагом порядка нескольких нанометров. Можно вращать поляризацию, менять мощность, длину волны накачки, в общем использовать множество разных параметров.

Мне изначально было интересно собрать всю оптическую схему целиком, настроить все приборы, соединить между собой — люблю работать руками. Сейчас на ней работают студенты, которых я обучаю, а мы с коллегами уже выпустили несколько статей на основе ее измерений. То есть я вижу: результат моей работы востребован.



ИЛИ ЗАВИСАТЬ В ТЕЛЕФОНЕ?

Зависит от настроения. Если у меня все хорошо, тогда точно слушать музыку. Когда не очень, можно и в телефоне позависать.

МОЕ БУДУЩЕЕ ОТКРЫТИЕ

Мне интересен реальный продукт. Хотелось бы, конечно, сделать открытие на границе науки, которое можно будет применить в ближайшее время. Но моя мечта конкретно сейчас — разработать источник одиночных фотонов. Сделать прибор, который будет превосходить аналоги. Сейчас подобные устройства есть, но работают на другом физическом принципе. В этом — сложность моей задачи.

ЧТО БУДЕТ С МИРОМ — И МНОЙ — ЧЕРЕЗ 20 ЛЕТ

Надеюсь, что с миром все будет хорошо, а что касается меня, то мне будет 45, наверное надо будет написать докторскую, если идти по пути науки. Но в целом я себя вижу на производстве, связанном с наукой.

РАЗДРАЖАЕТ

Часто бывает, что дают слишком много задач и сложно сфокусироваться. Это раздражает. Много всего можно сделать, но не успеваю, времени не хватает, не получается себя организовать.

ЧТО, ЕСЛИ НЕ ФИЗИКА?

Наверное, экономика. В школе я был призером Всероссийской олимпиады по экономике и серьезно раздумывал о поступлении в экономический вуз. Но физика мне нравилась больше, поэтому в 11-м классе я нацелился на Физтех, и пока об этом не жалею.

САМЫЙ ЖИЗНЕННЫЙ МЕМ

Наверное, тот где гонщика после заезда спрашивают:

— У вас с самого начала была какая-то тактика?
— Да, у меня с самого начала была какая-то тактика и я ее придерживался.

Такой подход часто встречается в жизни.

ГДЕ-ТО В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ВСЕЛЕННОЙ Я ВЛАДЕЮ ДЖАЗ-КЛУБОМ

ЕВГЕНИЙ РЯБКОВ,
ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ
НАНООПТИКИ
И ПЛАЗМОНИКИ
ЦЕНТРА ФОТОНИКИ
И ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
МФТИ

ЦЕЛИ

Долгосрочные я пока предпочитаю не формулировать — они скорее в виде размытых образов. Как говорили классики: все мы умрем, но хочется умереть достойно, чтобы семья тебя вспоминала и дети тобой гордились. Но есть цели краткосрочные. На данный момент — благополучно довести своих студентов до конца семестра, завершить работу по нескольким проектам, пообедать, наконец.

ДОСТИЖЕНИЯ

Во-первых, воспитание самодисциплины. На это ушло очень много времени, и мне кажется, я постепенно получаю удовлетворение от результатов. Во-вторых, я начал больше позволять себе удовлетворять любопытство. Учеба на Физтехе чем-то напоминала питье воды из пожарного гидранта, из-за чего на многие сторонние вещи катастрофически не хватало времени. Точнее, я говорил себе, что не хватало. Позже подобное наблюдал и в плане работы, но я постепенно учусь мыслить свободнее и погружаться глубже в интересующие меня вопросы. Меня это безмерно радует.

В ЧЕМ Я ХОРОШ

В том, чтобы конвертировать негатив в топливо для собственного развития. А еще я, судя по всему, хорош в том, чтобы давать развернутые ответы на вопросы, которые предполагают ответы короткие.

В ЧЕМ СИЛА

Во всем, в чем вы способны ее найти. Например в том, чтобы вовремя сказать: я не знаю. Как я сейчас.

СМОТРЕТЬ КИНО ИЛИ СЛУШАТЬ МУЗЫКУ?

И то, и то. Если бы пришлось выбирать что-то одно, я бы предпочел не выбирать.

ИЛИ ЗАВИСАТЬ В ТЕЛЕФОНЕ?

Смотреть кино (а также слушать музыку).

ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ПОДРАЖАНИЯ

Предпочитаю таковых не иметь, но есть люди и персонажи, которыми

я вдохновляюсь. К ним относятся родные, близкие, коллеги, магистр Йода, Джон Мак-Клейн.

МОЕ БУДУЩЕЕ ОТКРЫТИЕ

Пока мною движет по большей мере радость познания. Я не пытаюсь сделать что-либо потенциально выдающееся. Но если через десяток лет или позже кто-то найдет в моих трудах что-то полезное, я определенно порадуюсь.

ЧТО БУДЕТ С МИРОМ – И МНОЙ – ЧЕРЕЗ 20 ЛЕТ

В технологическом плане, полагаю, прогресс. Не любитель рассуждать на эту тему: я всегда душой был ближе к атмосфере прошлого, нежели будущего. В культурном плане, мне кажется, мы скоро пройдем очередной цикл и снова скатимся к первобытным порядкам. А что будет со мной? Как минимум я стану на 20 лет старше и, скорее всего, потеряю часть волос на голове.

ГЛАВНЫЕ РАЗДРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Быстротечность времени и бюрократия.

ЧТО, ЕСЛИ НЕ ФИЗИКА

В последние годы я активно борюсь с желанием связаться с толпой энтузиастов, арендовать гараж и просто стучать в нем по бочкам и кричать в микрофон. Мне кажется, где-то в параллельной вселенной я владею джаз-клубом.

САМЫЙ ЖИЗНЕННЫЙ МЕМ

Их огромное количество: This is fine, буквально все мемы с Райаном Гослингом, мемы из разряда «Просчитался, но где?», «Идущий к реке» и проч. Иногда — просто тот самый мем со Шварценеггером, что сидит на камне в окружении зверей. Все зависит от настроения и обстоятельств.

Татьяна Устинова – яркий пример того, что физтехи могут быть успешными не только в точных науках, но и в искусстве, литературе, кино. Автор 41 детективного романа (каждый экранизирован, а некоторые не один раз), переводчик и телеведущая, обладательница престижных наград, в том числе – ТЭФИ. Мы поговорили с Татьяной о ее учебе на Физтехе, работе на телевидении и, конечно же, сложном процессе творчества.

ТАТЬЯНА УСТИНОВА:

” Я не верю в сказки коучей, что один человек может все. Это не так. Человеку нужно помогать

Беседовала Варвара Кравцова

«За науку»: Татьяна, вы окончили школу с лингвистическим уклоном, с детства увлекались литературой и историей. Но поступили в МФТИ. Говорят, на этом настояла бабушка, но почему именно ее совет был решающим?

Татьяна Устинова: Это была ее мечта, нереализованная собственным сыном, моим дядей. Он поступил не в МФТИ, а в МГУ на физфак. А мы с сестрой были детьми, воспитанными бабушками. Родители инженеры, много работали, да и бабушка была инженером. Поэтому аргументы у нее были следующие: это лучший технический вуз страны, да и сообщество инженерно-технической интеллигенции нам казалось самым лучшим, самым умным и самым прогрессивным. И я совершенно убеждена, что так оно было и есть.

«Это лучшее образование, какое вообще только возможно, и у тебя всегда будет страшно интересная работа, — сказала бабушка. — В ЦАГИ или еще в каком-то научном институте в Москве вокруг будут приличные люди, хорошая зарплата. А на территории — сады, цветут яблони».

Мне в 17 лет, конечно, это было совершенно не важно, но я сделала так, как хотела бабушка. Я ее очень любила. А в тот момент, когда я заканчивала школу — весна 1985 года, уже было понятно, что она тяжело и неизлечимо больна. Это было страшное для нас время.

Училась я очень трудно. Нисколько не кокетничая, не пытаюсь стыдливо крутить пальцем дырку в столе, я хочу сказать, что была, наверное, худшей студенткой в истории этого



прославленного вуза. И меня все просто тянули: Альберт Леонидович Савченко, Александр Иннокентьевич Киркинский и Александр Михайлович Кузнецов, декан нашего факультета. Мне кажется, мы не учили, что МФТИ не готовит инженерно-технических работников. Он готовит ученых. А это совершенно другая ипостась и совершенно другая область человеческой деятельности. Ученый — это не просто определенный склад ума. Ученый — это склад личности, в которой сочетается все: нейронные связи, образ

жизни, способность интересоваться только тем, что тебе на самом деле интересно. Не обращая внимания вообще больше ни на что. Именно таков мой муж: отличник, гордость факультета и радость деканата. Его интересует только наука. Он до сих пор не может отличить Андрея Малахова от Николая Цискаридзе и не понимает, в чем их различие. Он совершенно уверен, что любой артист с усами — Никита Михалков. Раз это не наука, ему просто искренне неинтересно.

«ЗН»: По ночам ботали?

ТУ: Конечно, а как же! Хорошо помню, как мне не давалась никак эта лаба, где нужно из духового ружья стрелять в маятник и отслеживать потом его колебание. И хоть ты тресни, ну не получались у меня никакие колебания. Худшее воспоминание в моей жизни!

«ЗН»: На Физтехе якобы действовало негласное правило, что в группах должно быть хотя бы две девушки. Сколько девушек было у вас?

ТУ: Две.

«ЗН»: И с мужем вы познакомились на картошке?

ТУ: В спортивном лагере. Он взял меня под опеку. У нас был совершенно чудесный факультетский физрук Евгений Филиппович Рыбаков, он очень правильно приобщал студентов — ведь первое, на что все забили, это на спортивную кафедру. И он ввел интересную фишку, что если кто-то занимался в секциях, то его приглашали на соревнования, что, в свою очередь, способствовало зачетам по физкультуре.

Я весьма прилично каталась в лыжной секции и прекрасно помню, как Евгений Филиппович пришел к нам домой отпрашивать меня у мамы с папой в спортлагерь. Родители сначала были категорически против и только под его личную ответственность меня отпустили.

Но наша лыжная база не означала, что там выдают лыжи, ботинки, санки и прочую красоту. Мы везли все это сами на перекладных. Жили по двое в комнате, что вполне комфортно, но я оказалась в комнате с очень общительной барышней, которая все время принимала гостей. Не подумайте ничего плохого. Просто все сидели, курили, играли на гитарах и разговаривали за жизнь. Все это было хорошо, но одна ночь, другая, а потом мне мучительно захотелось спать.

В какой-то момент я совершенно изнемогла от живого общения, взяла книжку и уселась в холле общежития. Мимо меня идет с общей кухни с чайником Женя, возвращается уже без чайника и говорит: ну что, сидишь? Я говорю: сижу. Он мне говорит: а народные гулянья все продолжают? Я говорю: все продолжают. Он говорит: ну подожди, у меня чайник вскипит и я с тобой посижу.

«ЗН»: И ваше знакомство закончилось свадьбой?

ТУ: Лагерь был в январе, а поженились мы в июле, но через год. Женя очень смешно делал предложение. В очередной раз провожая до дома, он мне сказал: слушай, ты такая хорошая девчонка, я бы на тебе женился. А я его спрашиваю: если бы что? Он отвечает: ну если бы ты согласилась. Я говорю: я согласна.

Студенческая
свадьба
Татьяны и
Евгения



Дальше все в полном соответствии с классикой русской литературы: я ему сказала, что люблю другого. Была у меня несчастная любовь с физтехом, но его родители были против наших отношений, так как парню надо было учиться и не отвлекаться на глупости. Мы разошлись, и мое сердце было разбито так сильно, как может быть только в 18 лет. Послушав меня как бы в полуха, спустя много лет я эту манеру прекрасно знаю, Женя сказал: да и неважно, зато у нас будет очень хорошая семья. И так оно и вышло.

«ЗН»: *Впоследствии вы также продолжали общаться с физтехами и технарями? Ведь считается, что это довольно своеобразные люди.*

ТУ: Я прекрасно понимаю, о чем вы! Нам тоже все, кто не из Физтеха, говорят о наших знакомых из МФТИ: какие-то странные люди, такие нормальные, логичные. Но в чем эта странность? Я сказать не могу, потому что мне в этой среде прекрасно. Больше того, я вам хочу сказать страшную вещь: есть у меня в окружении еще люди, которые поступали и не добрали балл, или кто просто помышлял об этом вузе и дошел до вступительных экзаменов. Они тоже «с приветом». И это непростые люди: среди них есть известный хирург, есть крупный чиновник. Они тоже «странные», и мы вместе прекрасно ладим. И они любят очень вспоминать, как не добрали этот балл.

«ЗН»: *После учебы, в девяностые годы, вы ушли на телевидение, затем в пиар. Это довольно крутой поворот для технаря. Как вы приняли это решение? И помогла ли в этом учеба на Физтехе?*

ТУ: Основная причина была в том, что на дворе девяностые и полный крах всего. Нужно было где-то работать, а выбора особого не было. В то время моя сестра, окончившая РГГУ, устроилась работать на новое российское телевидение — ВГТРК. Она меня и порекомендовала в управлении делами в качестве абсолютно рядового сотрудника «на бумаги». Но это была только что созданная структура в здании бывшего министерства. И там были относительно адекватные зарплаты на фоне ужасающей инфляции. Я пришла в совершенном неведении, куда иду работать, на Пятую улицу Ямского поля. Была очень холодная осень, старое здание с массивными министерскими дверями. Между входной и внутренней дверью тамбур, где лежали гранитные полы, вытопанные за многие годы. На этом гранитном полу — огромная лужа. Пока я получала пропуск в бюро, увидела большую металлическую сейфовую дверь, окрашенную гадкой зеленой краской. Сверху сетка. Рядом на колченогом стуле сидел человек в бронежилете, на коленях автомат. На двери табличка:

Физтех научил меня работать с источниками. Это страшно важно и этого сейчас никто не умеет. Этот навык потерян. Сейчас все берут из интернета, ничего не проверяя. А для меня нет никакой сложности в работе с книгами, с файлами с графиками

«Эфирная зона. Вход только по пропускам». И мне туда очень захотелось. Я понятия не имела, что там делают. Но туда я в итоге и попала.

«ЗН»: *В какой области начали работать?*

ТУ: Мы были телевизионным политическим органом вещания. Работали над двумя программами «Москва-Кремль» и «Из первых рук». Потом, уже на выборах, это был классический политический пиар: с регионами, телевидением, газетами. Но в администрации президента я застала еще то время, когда не было сложившегося пула журналистов, он только создавался. У нас тогда была интересная жизнь. Мы делали репортажи, а затем эти сюжеты разгоняли в регионы, просто по орбитам. Тогда не было принято, что президент выходит к журналистам и делает официальное заявление.

«ЗН»: *Все было новое!*

ТУ: Всему пришлось учиться, но — исключительно благодаря моему вузу я умею учиться. Физтех научил меня работать столько, сколько необходимо. Если мне надо в день работать два часа, я работаю два часа. Если мне надо 14, я работаю все 14. Это первое. Второе — Физтех научил меня работать с источниками. Это страшно важно и этого сейчас никто не умеет. Этот навык потерян. Сейчас все берут из интернета, ничего не проверяя. А для меня нет никакой сложности в работе с книгами, с файлами с графиками.

«ЗН»: *Системный подход...*

ТУ: И на глупости я не попадаюсь. У моего мужа есть такое выражение: ну давай прикинем. Мы так недавно разбирали полезные советы экологического движения, где я давала интервью, что ставить в доме живые елки — варварство и гибель планеты. А мы ставим живые! И я, в горе и

отчаянии, заявила, что покупаем теперь только искусственные. И началось: ну давай прикинем. Бумажка, ручка, очки, он начинает считать. Сколько на производство искусственной елки уходит воды? Сколько пластмассы? Сколько сжигается газа, чтобы обработать эту пластмассу? Сколько нужно выработать красителей? Сколько должно пойти энергии на утилизацию этой пластмассы? Бросил считать и говорит: «А живая елка что? Ее посадили, она выросла».

«ЗН»: *Переход из пиара в писатели довольно логичен, мы это понимаем. Но это очередной карьерный переход. Книга же была посвящена выборам?*

ТУ: Это была обстановка и среда мне хорошо понятная. Что толкает людей на определенные поступки, как они говорят, чего ждут, какие могут быть подставы. Я все это снимала и написала историю про выборы.

«ЗН»: *То есть у вас был интересный опыт и вы решили создать роман?*

ТУ: Моя первая книга вышла, как Ту-154 в свое время. Он 31 декабря 1968 года, а книжка 30 декабря 1999 года. Девяностые продолжались, с работой было очень плохо, за нее очень плохо платили, приходилось перебиваться дополнительными заработками. В какой-то очередной момент, когда меня уволили с очередной работы, а потом просто закончились деньги, муж и сестра сказали: «Устинова, ну ты все время что-то пишешь. Допиши уже историю от начала до конца, и мы отнесем ее в издательство». Это была правда. Для меня было просто спасение, если оставалось немного свободного времени и появлялась возможность придумывать и записывать разные истории. Но в какое издательство? Где издательства, а где мы? У нас не было никаких связей в этой отрасли. Но тем не менее я села, написала эту историю от начала до конца. Потом мы честно

Дело, однако, не в том, что мне надо выдать определенное количество книг. Это способ моего существования. Я не издателю должна, а сама по себе должна все время рассказывать истории

нашли адрес издательства в справочнике «Желтые страницы» и отвезли туда мою рукопись. После какого-то времени я позвонила в издательство и спросила о судьбе моего первого романа. На что мне ответили: «Ой, мы переезжаем из одного офиса в другой и вашу рукопись потеряли. Привезите еще один экземпляр». Я подумала: какой кошмар, это же еще одна пачка бумаги, а она стоит денег, которых уже нет! Это напомнило мне трогательную историю Маркеса о том, что его жена продала свой единственный фен, чтобы он смог дописать книгу. И пока я страдала о второй пачке бумаги, мне позвонили и сказали, что рукопись нашли: вы же Устинова? Я говорю: Устинова. Они: Галина Петровна? Я говорю: Нет, Татьяна Витальевна. Они: А, мы не вашу нашли. И я думаю: боже мой, там одних Устиновых, наверное, человек десять! Потом мою рукопись почему-то напечатали, а меня вызвали в издательство и спросили: у вас нет больше ничего? Я сказала: есть. Хотя, конечно, не было. Мне дали две недели, и я из своих многочисленных набросков сделала еще одну книгу. С тех пор я пишу, а они печатают.

«ЗН»: *И очень продуктивно!*

ТУ: Дело, однако, не в том, что мне надо выдать определенное количество книг. Это способ моего существования. Я не издателю должна, а сама по себе должна все время рассказывать истории. Если я их не рассказываю, я начинаю болеть. Последние два года я не написала ни одного романа и только в этом октябре сдала новую рукопись. Но за эти два года я переболела несколько раз. Один раз, абсолютно на ровном месте, на Тверском бульваре, вычищенном до блеска, я упала и сломала руку. Другой раз в порыве ухаживания за гостями уронила себе на ногу планетарный миксер и сломала ногу. Вот зачем я дописала роман. Эти последние два года к каждой моей мысли, к каждой моей эмоции и к каждому моему чувству добавлялась внутренне фраза: «Мне бы дописать роман. Мне бы дописать роман...»

«ЗН»: *Это груз и ответственность?*

ТУ: Это и груз, и какая-то непонятная для меня потребность. Я правда не могу без этого обойтись. У меня ничего не ладится, не получается.

«ЗН»: *И тем не менее вы не только пишете, но и на телевидение работаете. И семья у вас большая. Как все совмещаете?*

ТУ: Очень плохо. Это просто катастрофа. Как-то я жаловалась Ирине Хакамаде, которая моя хорошая приятельница, что многое не успеваю. Я говорю: «Когда была еще жива моя сестра, она очень сердилась, когда видела, что я сижу под кленом, смотрю на небо, и говорила: Устинова, давай вставай



Татьяна
Устинова
с любимой
собачкой
Кристи породы
пражский
крысарик

быстро, иди работай!» Но мне нужно это время, мне нужно сидеть под кленом, смотреть на небо и просто думать. Думать про героиню, про героя, про систему координат, про отношения, про их детство, которое никогда не будет вписано в роман. Мне нужно понять, какие они. Но я все время себя ругаю за то, что я вместо работы сижу под кленом. Но ответ Хакамады был: «Устинова, ты сумасшедшая. У каждого человека должно быть это время, он должен его выделять». Время на осознание мира. Неважно, чем он занимается: физикой, танцами, литературой, живописью, разработкой искусственного интеллекта. Он должен понимать ткань мира, понимаете? Иначе все, чем он занимается, будет носить абсолютно не прикладной и в конечном счете никому не нужный характер. Это точечные усилия, результат от которых никак ни на что не повлияет.

Но к сожалению, мое время под кленом очень ограничено. И я до сих пор себя за него страшно ругаю. Я не верю в сказки коучей, что один человек может все. Это не так. Человеку нужно помогать.

Мои родители всю жизнь помогали мне с детьми. Мой муж в свое время не ответил на приглашения научных институтов в Америке — потому что его звали, но без нас. И в тяжелые девяностые, во время всех моих неудач, увольнений с работы, для меня самое главное дело было добежать до Жени, который скажет: «Да ладно, сейчас мы найдём где-нибудь в закромах три рубля,

купим бутылку игристого и будем отмечать твое увольнение». Это просто единственный способ жизни. Поэтому я не верю, что можно прекрасно жить без семьи. Семья — это же не только муж, жена и дети. Семья — это маленькая модель коммунизма, когда от каждого по способностям и каждому по потребностям. И если тебе никто не помогает жить, ты не выживешь.

«ЗН»: Согласна. А что вы посоветуете нынешним студентам?

ТУ: Учиться, учиться и учиться, как завещал великий Ленин. Учиться, не обращая внимания на то, что сложно, особенно поначалу. Учиться, не слушая никаких причитаний о том, где вы потом найдете работу. Что вы сейчас всю молодость гробите на ваши лабы, а потом куда вы пойдете. Это все злопыхательство и только приносит вред. Я совершенно глубоко убеждена, что студент МФТИ — это миссия. Это люди призванные. Этим нельзя разбрасываться. Этим надо пользоваться. Надо учиться!

«ЗН»: Как проще молодым выбрать свой путь?

ТУ: Метод проб и ошибок, его не надо бояться. Никто не рождается сразу принцем Эдинбургским со всеми регалиями и принципами. Нет, это именно метод проб и ошибок. Если у человека что-то не получается, я бы все двери и стены обклеила бы бумажками с лозунгом: «Никогда не сдавайся!» Это и есть девиз Физтеха.

ДЛЯ ТВОЕЙ ЖЕ ПОЛЬЗЫ

Анастасия Медведева

— Утренний рацион №7 готовится к печати, внесите необходимые изменения, — нежно пропел голос кухонного принтера.

Из его недр по конвейерной ленте уже выехала ежедневная порция «зеленой бурды», как я ее называю. Витамины, минералы, лекарства, по идее, состав меняется каждый день в зависимости от состояния моего здоровья, но вкус все такой же: будто сметану смешали с отваром из старого банного веника, бр-р-р.

— Кофе, — скомандовала я, — натуральный, средняя обжарка, мелкий помол, приготовить в турке, засыпка моя стандартная! Омлет из двух яиц с прошутто и брокколи! Круассан... — я сделала паузу и пошла ва-банк, — миндальный!

Принтер пискнул, заскрежетал, лента конвейера вновь пришла в движение, и вот, вот она, моя любимая фарфоровая чашечка с глотком терпкого, ароматного...

— Пф-ф-ф-тьфу, что это, Бэрримор! — возопила я, негодуя округлив очи.

А меж тем пред эти самые очи обнаглевшая скатерть-самобранка выкатила неаппетитный бледно-зеленый блин и круглый цельнозерновой хлебец из тех, что по виду (да и по вкусу) практически не отличимы от подставки под стакан.

— Это цикорий, — певучее контральто принтера среагировало на кодовое имя и сменилось суховатым баритоном. — Белковый омлет с цуккини и хлебец.

— Но это не мой заказ!

— Прошу прощения, — в беседу гнусавым голосом Слоненка из мультфильма «38 попугаев» вклинулась фитнес-клипса, вставленная в ухо. Она развернула перед моими глазами псевдоэкран, где, напоминая панель управления самолетом, переливались всеми цветами радуги индикаторы физических процессов моего тела. — Кофе вам сегодня противопоказан: тоны сердца глуховаты, ритм учащенный. Из омлета убраны желтки: уровень холестерина близок к верхней границе нормы. От капусты имеется риск вздутия живота. А миндальный круассан...

— Да понятно все с круассаном, верни хотя бы кофе, вчера же было можно! — в моем голосе про-

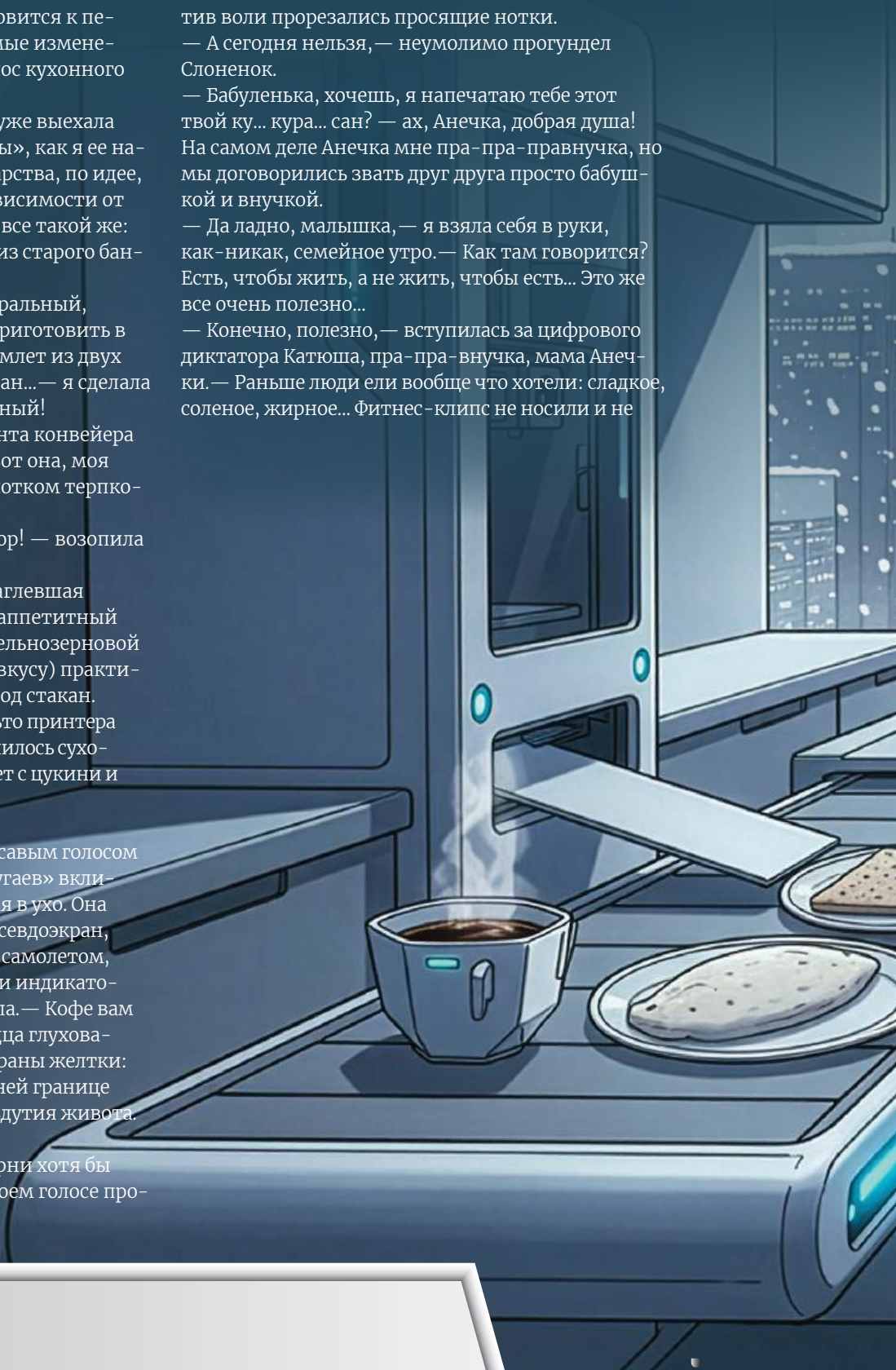
тив воли прорезались просящие нотки.

— А сегодня нельзя, — неумолимо прогундел Слоненок.

— Бабуленька, хочешь, я напечатаю тебе этот твой ку... кура... сан? — ах, Анечка, добрая душа! На самом деле Анечка мне пра-пра-правнучка, но мы договорились звать друг друга просто бабушкой и внучкой.

— Да ладно, малышка, — я взяла себя в руки, как-никак, семейное утро. — Как там говорится? Есть, чтобы жить, а не жить, чтобы есть... Это же все очень полезно...

— Конечно, полезно, — вступилась за цифрового диктатора Катюша, пра-пра-внучка, мама Анечки. — Раньше люди ели вообще что хотели: сладкое, соленое, жирное... Фитнес-клипс не носили и не



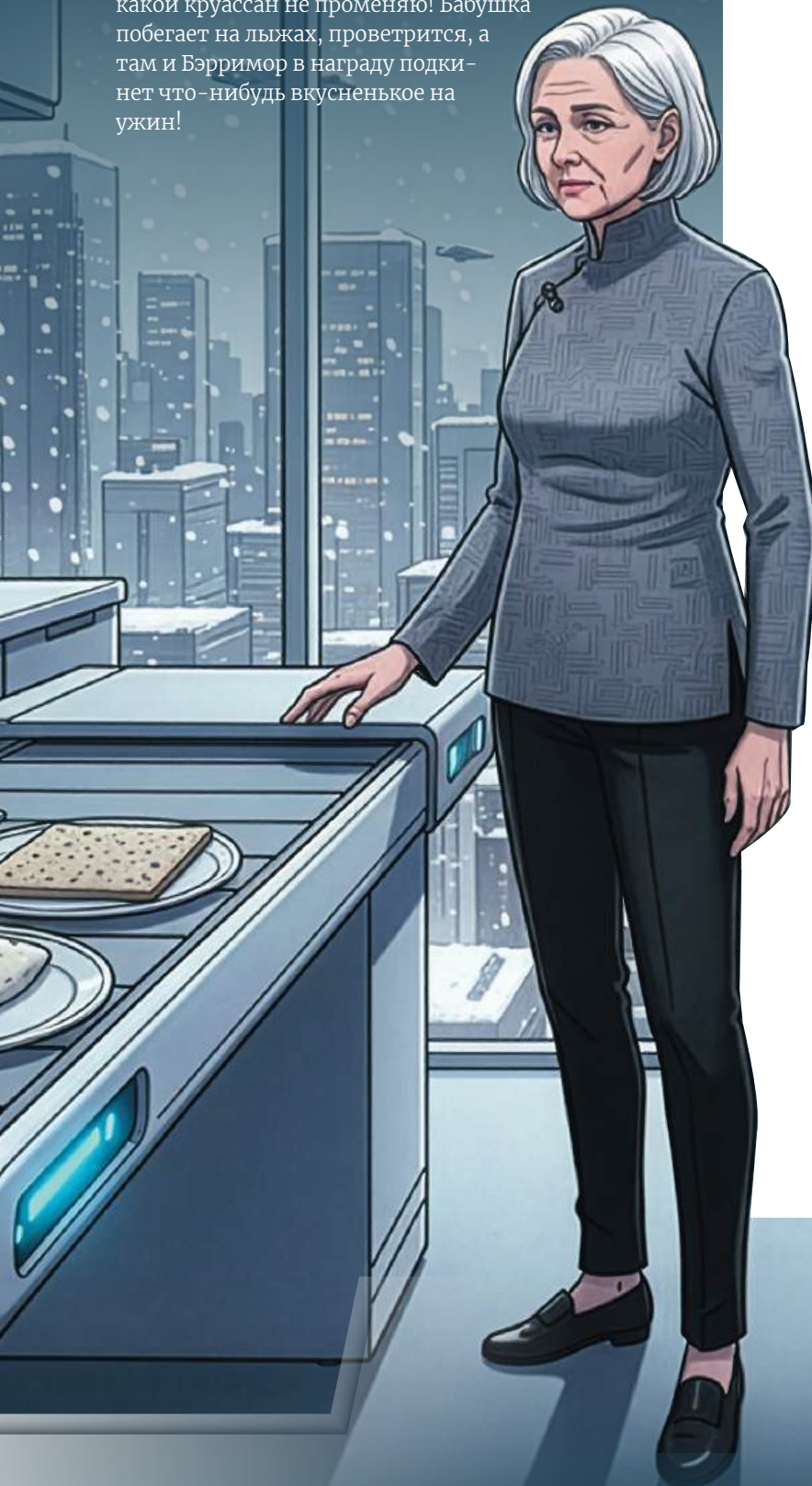
доживали даже до восьмидесяти. Вот разве ты, бабуля, могла бы без нее в свои сто с хвостиком, бегать на лыжах по 20 километров?

— Конечно, нет, — проворчала я, — потому что могла бы спокойно валяться в это время на диване с книжкой, попивая кофе с круассаном.

— Так можно же выбрать другой спорт?

— Ну да, например скандинавскую ходьбу с толпой таких же старых клюшек. Тут хоть быстрее ногами двигаешь — быстрее норму выполняешь. Анечка, увидев, что взрослые спорят, скусилась, и я сдаюсь.

— Ну конечно, сейчас лучше, Анечка, тебя я ни на какой круассан не променяю! Бабушка побеждает на лыжах, проветрится, а там и Бэрримор в награду подкинет что-нибудь вкусенькое на ужин!



Выбравшись на лыжную трассу я, тем не менее, все еще кипела: досада от утреннего цикория никак не хотела улечься. Но против этого у меня было в запасе верное средство.

— Набрать Ягу Змиевну!

— Абонент недоступен для вашего звонка, — мягко промурлыкал голосовой помощник. Я схватилась за сердце и бессильно осела прямо в сугроб.

Яга Змиевна, известная остальному миру как Татьяна Юрьевна, была моей закадычной подружницей еще с детского сада. Я — полноватая, медлительная книжная девочка (в своем списке контактов она метко окрестила меня Совуньей) и она — юркая, как ящерица, разбитые коленки, ни секунды покоя, внезапно образовали удивительно устойчивый тандем. Наша дружба пережила сад, школу, институт, огонь, воду и медные трубы. Против нашей дружбы были родители: моя фантазия, помноженная на Танькину активность, порой давала те еще результаты. Например, рецепт пороха вычитала я, а ингредиенты добыла она. И под руку лезла тоже она, поэтому я до сих пор считаю несправедливым, что моим родителям пришлось оплатить ремонт кухни Танькиных. Нас рассажили учителя, пытались развести в разные потоки университетские преподаватели, но мы упорно воссоединялись, как намагниченные. Вот и сейчас, спустя больше века с момента знакомства, мы регулярно созванивались во время обязательных занятий спортом, чтобы посетовать друг другу на «порабощение человечества машинами». Вообще-то, я по большей части согласна с Катюшей: ну в самом деле, разве здоровые зубы (все до единого свои, только некоторые выращенные заново), подвижные суставы (раньше бы вставили титановый, теперь через микроразрез чинят свой), гибкая спина, легкость движений не стоят некоторых ограничений? Раньше такую роскошь, как личный тренер, диетолог, врач, психолог могли позволить себе лишь избранные. Сейчас — наоборот, можно жить и без фитнес-клипсы, только налог придется платить больше, как бы компенсируя возможные дополнительные затраты на лечение. «Так что вот так мы и ходим все с клипсой в ухе: добровольно и с песнями. Едим, что ИИ посоветует, скажет бегать — бегаем, скажет прыгать — прыгаем. В этом дивном новом мире нам осталась роль домашних котиков, а мы и рады: полезный корм, когтеточка, лежанка», — ядовито прокомментировала мои доводы Змиевна на прошлом созвоне. Значит, всё?

— Что с ней случилось? — непослушными губами произнесла я.

— Абонент недоступен для вашего звонка, — повторил помощник. — Проанализированы ваши показатели здоровья после созвонов: подъем артериального давления, ухудшение сна, раздражительность. Контакт признан нежелательным. Предоставлены альтернативные варианты. На псевдоэкране замелькали анкеты бабок и дедов с улыбками во все 32, любящих спорт, петь хором, выпиливать лобзиком, дружелюбных и бодрых настолько, что меня чуть не стошнило.

— Ах, злопакостная ты железяка, — простонала я. — А вот это мне не вредно? Да у меня чуть сердце не остановилось!

— Приношу свои извинения, — после паузы, как будто нехотя, выдала клипса.

Ого! На моей памяти такого еще не бывало! Пусть это и не настоящее чувство вины, но надавить на него можно.

— Резкий обрыв многолетней связи очень горек, — я постаралась добавить в голос дрожи. — Может, мне будет дозволено хотя бы навестить ее в последний раз?

Мигнул красный огонек — отказ.

— Видеосозвон? Звонок? Открытка?

Открытку деспот разрешил с условием продемонстрировать текст. Ну что ж...

Вечером я вытребовала у кухонного принтера Бэрримора фрукт как компенсацию за стресс. Лимон — несколько необычный выбор, но пристыженная за промах клипса без проблем одобрила заявку. Вскоре была готова и открытка: «Ну что, Танечка? Видимо, наше общение теперь слишком вредно для нас. Спасибо тебе за все. Не унывай, выберись куда-нибудь, например в бананово-лимонный Сингапур, **сокровище мое, погрей** косточки на пляже, перечти мое **письмо** и воспрянь духом!» Текст был одобрен, я запечатала открытку в конверт и забросила в транслятор. Конверт растаял, чтобы материализоваться в транс-



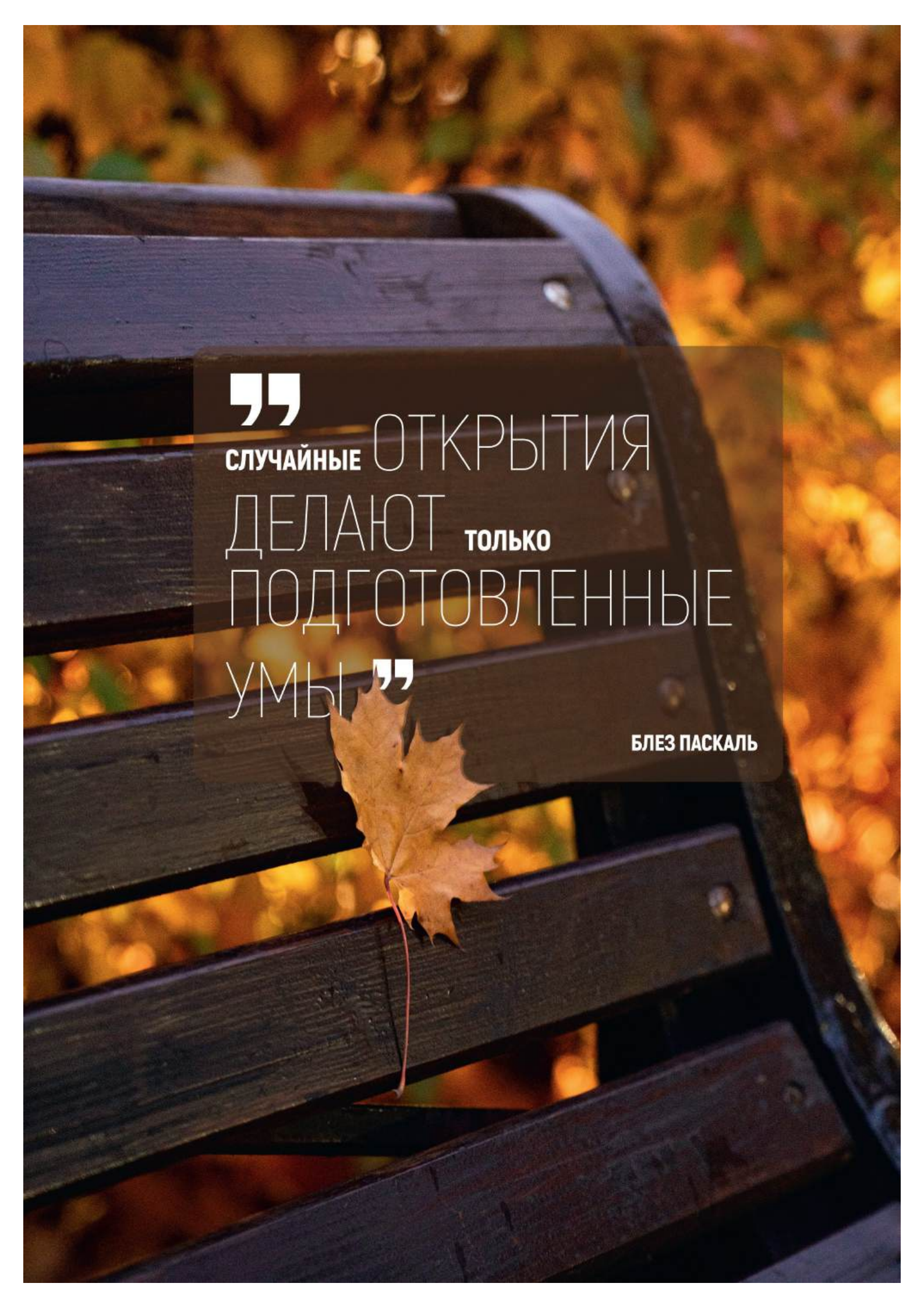
ляторе Змиевны. Копия полностью повторяет оригинал вплоть до расположения каждого атома, и старая перечница не сможет не обратить внимания на то, что я подчеркнула некоторые слова.

Через пару дней мы встретились. Координаты, написанные на открытке лимонным соком, принадлежали небольшому клочку земли у леса, где стоял маленький, но «умный» домик. Он достался мне от четвертого мужа давным-давно, поэтому не был снабжен новейшей генерацией искусственного интеллекта, поддерживал себя в рабочем состоянии и достойной форме, а в чужие дела не лез.

— Смотри, — Яга Змиевна облокотилась на краешек кухонного стола, набрасывая схему участка, — без клипс наше довольствие будет скудным, но мы можем выращивать что-нибудь! Помнишь Гришу? Он директор института Вавилова, с семенами не будет проблем. А Игорь работает в Тимирязевке, у них есть пчелы. Пасека, мед — халявный сахар, а потом и медовуха! — она игриво ткнула меня локтем в бок. На моем лице играла улыбка. Показатель счастья перебрался к отметке 97%, впервые за долгое время. Я в последний раз полюбовалась сиянием псевдоэкрана, сняла клипсу и решительным движением бросила ее в камин. Скорее всего, этим поступком я сократила свою жизнь на несколько лет. Да и жить колонией стариков-луддитов будет не так просто. Но зато это будет жизнь человека, а не котика.







“
СЛУЧАЙНЫЕ ОТКРЫТИЯ
ДЕЛАЮТ ТОЛЬКО
ПОДГОТОВЛЕННЫЕ
УМЫ”

БЛЕЗ ПАСКАЛЬ