

А.М. Сунгурский

СТО ШАГОВ В НЕИЗВЕСТНОЕ

Россия и мир: 100 историй
научных открытий



А.М. Сунгурский

Сто шагов в неизвестное

<https://litres.ru/74585613>

SelfPub; 2026

Аннотация

Книга посвящена ста научным достижениям: от сверхпроводимости, квантовых точек и доказательства гипотезы Пуанкаре до изучения древней ДНК, редактирования генов и машинного обучения. В неё вошли исследования графена и новых химических элементов, поиски нейтрино, изучение Марса, происхождения человека и одомашнивания животных.

Основной период — после 1991 года. Рассматриваются работы российских научных организаций, международных коллективов с российским участием и уроженцев России и СССР, работающих за рубежом. Четыре более ранних советских достижения включены с пояснением времени их получения и последующего нобелевского признания. Главы расположены по годам; научные понятия объясняются доступным языком.

Содержание

Предисловие. Сто способов увидеть неизвестное	5
1. 1950. Когда множество электронов ведёт себя как целое	10
2. 1957. Магнитное поле входит в сверхпроводник вихрями	14
3. 1963. Слои, которые научились удерживать свет	18
4. 1981. Цвет, заданный размером	22
5. 1993. Остров, где мамонты задержались	26
6. 1994. Почему привычный путь к доказательству может не привести к цели	29
7. 1995. Граница, которая допускает ошибку	34
8. 1996. Когда два языка математики говорят об одном	38
9. 1996. Озеро под четырьмя километрами льда	42
10. 1996. Сколько сведений проходит через квантовый шум	46
11. 1997. Умножение, в котором важен порядок	51
12. 1997. Кто разрешает иммунитету поднять тревогу	55
13. 1998. Как ссылки научились взвешивать страницы	59
14. 1998. Словарь между частицами и	63

гравитацией

15. 1999. Красная метка внутри живой клетки	67
16. 1999. Воздух четырёх ледниковых эпох	70
17. 1999. Пять новых клеток таблицы	74
Менделеева	
18. 2000. Квантовая информация на повторяющемся узоре	78
19. 2001. Алгебра, которая умеет менять переменные	82
20. 2001. Порог, на котором исчезает характерный масштаб	86
21. 2001. Собрать геном по дорогам графа	91
22. 2001. Квантовая связь с остановками для памяти	95
23. 2001. Электрический след одного фотона	99
24. 2002. Как посчитать то, чего не видит приближение	103
25. 2002. Нейтрон над зеркалом	107
26. 2002. Увидеть марсианский водород под пылью	111
27. 2002. Как узнать форму пространства	115
Конец ознакомительного фрагмента.	116

А.М. Сунгурский

Сто шагов в неизвестное

Предисловие. Сто способов увидеть неизвестное

Крошечный кристалл в стекле меняет цвет, когда меняется его размер. Состав остаётся прежним, а привычное правило «это вещество такого цвета» перестаёт работать. Объяснение этому даёт квантовая физика. В начале 1980-х Алексей Екимов исследовал это явление в Ленинграде. Через четыре десятилетия он получил за открытие квантовых точек Нобелевскую премию — уже после распада страны, в которой были сделаны его первые опыты.

У такого открытия несколько дат и адресов. Есть место опыта, год статьи, годы дальнейшей работы и день награждения. Если оставить только последний, советский результат превратится на бумаге в достижение современной России. Если оставить только место рождения учёного, исчезнет лаборатория, в которой он работал. В книге названы и время открытия, и место работы, и дата награды — у каждого из этих сведений своя роль.

В ней сто историй о том, что удалось узнать, доказать, из-

мерить или научиться делать. Основной период начинается после возникновения Российской Федерации. Четыре советские работы открывают хронологию: их нобелевское признание пришло позднее. Затем рядом идут результаты российских организаций, международные исследования с установленным российским участием и зарубежные работы уроженцев России и других республик СССР.

Даты и участники

Главы расположены от старых к новым по году первого существенного публичного результата — статьи или препринта с ключевым выводом. Для истории гетероструктур отдельно оговорено исключение: отправной точкой служит приоритет заявки 1963 года. Даты опыта, журнального выпуска, подтверждения и награды названы отдельно. Порядок внутри одного года не устанавливает первенство с точностью до дня.

Одна история иногда охватывает несколько этапов. Первое сообщение о сверхтяжёлом ядре, воспроизведение опыта и официальное признание открытия могут быть разделены годами. Начальная дата обозначает начало рассказанной линии, а последующие результаты названы со своими датами. Препринт и его журнальная версия — два этапа одной работы, а не два независимых подтверждения.

Каждая история отнесена к одной из четырёх рубрик, на-

званной в шапке главы и указателях: «Результаты в России», «Международные исследования с российским участием», «Уроженцы России и СССР в мировой науке» и «Советские открытия и позднее признание». Международная рубрика включает и проекты с ведущей российской ролью, и большие коллаборации с участием отдельных российских групп. Различие видно по названным приборам, организациям и задачам; число иностранных соавторов само по себе не измеряет вклад.

Место рождения — биографический факт. Уроженец Ташкента, Киева или Харькова не становится российским исследователем только потому, что родился в СССР. Поэтому зарубежные работы уроженцев России и СССР выделены в отдельную рубрику. В остальных случаях основанием служит участие организации в самой работе. Можно гордиться вкладом человека или лаборатории, точно называя их соавторов.

С чего начать

Последовательное чтение покажет, как одновременно менялись разные науки. Но у каждой главы есть собственный вопрос, поэтому допустим и другой маршрут. Для первого знакомства подойдут [квантовые точки](#), [последние мамонты острова Врангеля](#), [озеро под антарктическим льдом](#), [доказательство Перельмана](#) и [углерод толщиной в один атом](#).

От цвета и древних костей можно перейти к геометрии пространства и управлению электронами.

Специальная подготовка не нужна. Иногда потребуется задержаться на мысли: квантовое состояние или математическая бесконечность сложнее привычного предмета. Объяснения и примеры дают опору для этого усилия. В конце находятся словарь, тематический и именной указатели, а рядом с каждой историей — переход к её источникам.

Мысленный пример помогает разобрать задачу, но не изображает событие из жизни учёного. В книге нет вымышленных разговоров и реконструированных мыслей. Исторические детали опираются на научные публикации, авторские материалы и документы исследовательских организаций.

Что обещает эта сотня

Это авторская подборка результатов разного масштаба. Среди них есть открытия и доказательства, новые методы и важные ограничения: иногда точный опыт показывает, где ожидаемый эффект отсутствует. Сам запуск установки, известная фамилия или награда ещё не создают отдельного достижения.

В разных науках ответ проверяют по-разному. Теореме нужны точные условия; опыту — контроль прибора и фона; древней кости — датировка и проверка загрязнения; лечению — сравнение групп, наблюдение за пользой и нежела-

тельными явлениями. Найденный на Марсе водород не равен увиденной реке, а улучшение состояния одного пациента ещё не доказывает эффективность лечения для всех. Эти границы входят в содержание открытия.

Материал проверялся по состоянию на 5 октября 2026 года. У недавних результатов отдельно обозначены статус публикации и доступные последующие проверки. Наука продолжится после этой даты: одни объяснения укрепятся, другие изменятся. Наша задача — понять, какой шаг уже сделан и почему следующий пока остаётся шагом в неизвестное.

1. 1950. Когда множество электронов ведёт себя как целое

1950 — публикация теории; 2003 — Нобелевская премия Виталию Гинзбургу. Рубрика: Советские открытия и позднее признание. Москва, СССР. Виталий Гинзбург и Лев Ландау.

Электрический провод нагревается из-за сопротивления. Движущиеся электроны рассеиваются на колебаниях кристаллической решётки и на примесях; энергия, полученная от электрического поля, переходит в тепло. С этим знаком каждый, кто видел раскалённую спираль нагревателя. Но при достаточно низкой температуре некоторые вещества переходят в состояние, в котором постоянный ток может течь без электрического сопротивления. Сверхпроводимость заставила физиков пересмотреть представления о коллективном поведении электронов.

Перед исследователями стояли два разных вопроса. Что на микроскопическом уровне заставляет вещество вести себя необычно? И как описать поведение целого образца: распределение тока, магнитного поля, границы между обычной и сверхпроводящей областями? Иногда второй вопрос удаётся решить раньше, чем становится полностью понятен первый.

В 1950 году Виталий Гинзбург и Лев Ландау предложили теорию, которая описывала сверхпроводящее состояние через небольшое число общих величин. Такой подход называют феноменологическим: он опирается на наблюдаемые закономерности и общие принципы, не пытаясь сразу проследить судьбу каждой частицы. Слово может звучать как признание неполноты, но в физике правильно выбранное сокращённое описание часто оказывается чрезвычайно сильным.

Для прогноза погоды тоже не требуется вычислять траекторию каждой молекулы воздуха. Температура, давление и скорость потока позволяют описывать большие области. Так поступили и в теории сверхпроводимости: искали несколько величин, которые описывают существенное коллективное поведение, оставляя в стороне ненужные для этой задачи подробности.

Центральным понятием теории стал параметр порядка — величина, которая в обычном состоянии равна нулю, а в сверхпроводящем отлична от нуля. Она может меняться от точки к точке внутри образца. У неё есть модуль — абсолютное значение — и фаза, которую можно представить как положение стрелки на циферблате. Поэтому одного числа, как на термометре, для её описания недостаточно. Стрелки в разных точках связаны между собой: их положение нельзя менять независимо, не изменяя состояние всего образца. Так теория описывает согласованное квантовое поведение на масштабах, гораздо больших отдельного атома.

Авторы записали, как энергия системы зависит от этого параметра, от его изменения от точки к точке и от магнитного поля. Устойчивое состояние ищут, сопоставляя энергетическую цену разных конфигураций. Такой способ рассуждения знаком и по более простым задачам: система предпочитает положения, которые при данных условиях энергетически выгоднее. Сложность заключалась в том, какие именно слагаемые должны входить в описание и что из них следует.

Здесь полезно остановиться на магнитном поле. Сверхпроводимость не сводится к особенно хорошей проводимости. Важна и реакция вещества на поле, включая его вытеснение из объёма при определённых условиях. Отсутствие потерь при постоянном токе и характерные магнитные свойства сверхпроводника — связанные, но не взаимозаменяемые признаки. Хорошая теория должна объяснять их совместно.

Теория связывала две характерные длины. Первая показывает, на какую глубину вытесняемое магнитное поле всё же заходит в сверхпроводник у поверхности, прежде чем угаснуть. Вторая — на каком расстоянии может заметно измениться параметр порядка, например восстановиться после нарушения сверхпроводящего состояния. Их соотношение позволяет различить сверхпроводники первого и второго рода. Что означает это различие для поведения магнитного поля, станет видно в следующей истории.

Микроскопическое объяснение обычной сверхпроводимости

мости было развито позднее. Оно не сделало подход Гинзбурга и Ландау бесполезным. Напротив, связь между микроскопической и феноменологической картинами позволила уточнить область применимости и физический смысл величин. Исследователь получил выбор языка в зависимости от вопроса: иногда нужны детали взаимодействия электронов, иногда — поведение вихрей, границ и целого устройства.

В 2003 году Гинзбург получил Нобелевскую премию по физике вместе с Алексеем Абрикосовым и Энтони Леггеттом за работы по теории сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей. До награды теория уже десятилетиями служила рабочим инструментом.

Следующая история показывает, что можно сделать с хорошо выбранным языком. Если уравнения описывают коллективное состояние достаточно точно, в них удаётся обнаружить поведение, которое ещё трудно представить наглядно. Из соотношения двух длин и энергетической цены границы вырастает картина магнитных вихрей — и объяснение того, почему некоторые сверхпроводники выдерживают сильные поля.

[Источники к главе 1](#)

2. 1957. Магнитное поле входит в сверхпроводник вихрями

1957 — ключевая публикация; 2003 — Нобелевская премия. Рубрика: Советские открытия и позднее признание. Институт физических проблем, Москва, СССР. Алексей Абрикосов.

Если сверхпроводник вытесняет магнитное поле, возникает естественный вопрос: что произойдёт, когда поле станет слишком сильным? Самый прямой ответ — сверхпроводимость исчезнет. Для части материалов именно такая простая картина оказывается недостаточной. Они могут сохранять сверхпроводящее состояние и одновременно пропускать магнитный поток через свой объём особым образом.

Теория Гинзбурга и Ландау дала язык, на котором можно было исследовать этот кажущийся парадокс. Алексей Абрикосов применил её к так называемым сверхпроводникам второго рода. В 1957 году была опубликована работа, объяснившая их смешанное состояние и возникновение регулярных структур магнитных вихрей.

Чтобы оценить необычность результата, представим две возможности: поле полностью исключено из образца или свободно занимает его объём после разрушения сверхпроводимости. Абрикосов показал, как между этими крайностями

появляется устойчивый режим. Магнитный поток проникает в образец тонкими нитями — вихрями, вокруг которых текут сверхпроводящие токи. В середине вихря сверхпроводящий порядок сильно подавлен, а между вихрями сохраняется.

Квантованный вихрь — особое пространственное распределение сверхпроводящего состояния, токов и магнитного поля. Вспомним фазу как стрелку на циферблате. Если обойти вокруг вихря и вернуться в исходную точку, стрелка должна вернуться к тому же положению: её поворот за весь обход составляет целое число оборотов. С этим связано квантование магнитного потока. В обычном одиночном вихре Абрикосова одному обороту соответствует одна элементарная порция потока. Это свойство согласованного состояния вещества, а не отдельного электрона.

Почему поле входит отдельными нитями, а не разрушает сверхпроводимость сразу во всём образце? В теории Гинзбурга и Ландау ответ связан с двумя длинами из предыдущей главы: глубиной проникновения поля и расстоянием, на котором восстанавливается параметр порядка. Их отношение определяет энергетическую цену границы между обычной и сверхпроводящей областями. Если отношение больше $1/\sqrt{2}$, то есть примерно 0,71, эта энергия отрицательна: образование границ может уменьшать общую энергию. Это случай сверхпроводника второго рода. В определённом диапазоне полей ему выгодно смешанное состояние — тон-

кие вихревые сердцевинки внутри сверхпроводящего вещества. Однако это не означает бесконечного дробления: размеры сердцевин, токи и взаимодействие вихрей тоже входят в энергетический расчёт. Вихри способны образовывать упорядоченную решётку. Точный рисунок зависит от условий и свойств материала; наиболее привычная идеальная картина — треугольное расположение.

У сверхпроводников второго рода различают два характерных критических поля. При превышении нижнего начинается проникновение вихрей. Между нижним и верхним полями существует смешанное состояние. Выше верхнего сверхпроводимость разрушается. У многих сверхпроводников второго рода верхнее критическое поле очень велико: ток можно проводить без сопротивления и в сильном магнитном поле, если не превышены остальные ограничения. Это делает такие материалы особенно полезными для создания магнитов.

Однако наличие вихрей добавляет инженерную трудность. Под действием тока они могут двигаться, а движение приводит к потерям энергии. В реальных материалах удерживать вихри на месте способны дефекты и специально созданные неоднородности. То, что в одном исследовании выглядит помехой чистой идеальной структуре, в другом становится полезной частью устройства.

Это хороший пример того, почему фраза «сопротивление равно нулю» не заменяет полного описания сверхпроводя-

щего кабеля. Имеют значение температура, поле, плотность тока, движение вихрей и механическое состояние материала. Научная теория помогает понять, какое из этих ограничений становится решающим, прежде чем конструктор начнёт изменять состав или форму проводника.

Сильные сверхпроводящие магниты нужны, в частности, для магнитно-резонансной томографии и ускорителей частиц. Их существование опирается на большие коллективные усилия физиков, материаловедов и инженеров. Теория Абрикосова объяснила важнейшее физическое состояние, которым эта техника пользуется. Она не была единственным источником знаний, благодаря которым появились современные магниты, но без такого понимания их поведение оставалось бы значительно менее прозрачным.

В 2003 году Абрикосов был удостоен Нобелевской премии по физике; к тому времени он работал в Аргоннской национальной лаборатории США. Ключевая теория была создана им в Москве в советский период.

В сильном магните мало сохранить сверхпроводимость — нужно ещё удержать вихри от движения. От поведения невидимых глазу вихрей зависит, какой ток выдержит реальный проводник без потерь.

[Источники к главе 2](#)

3. 1963. Слои, которые научились удерживать свет

1963 — приоритет заявки; 1963–1970 — ключевые работы; 2000 — Нобелевская премия. Рубрика: Советские открытия и позднее признание. Ленинград, СССР. Жорес Алфёров, Рудольф Казаринов и коллектив Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе (ФТИ); параллельные исследования Герберта Крёмера и других зарубежных групп.

Электричество можно превратить в свет довольно неэкономным способом: сильно нагреть проводник. В таком случае он отдаёт энергию в широком диапазоне, и значительная её часть приходится на излучение, которое глаз не видит. Полупроводниковая оптоэлектроника использует другие процессы, позволяющие гораздо точнее управлять тем, где возникает свет и какими будут его свойства.

Но одного подходящего вещества мало. Электроны и другие носители заряда движутся, рассеиваются, покидают полезную область. Свет также может уйти туда, где его энергия потеряется. Чтобы создать эффективный прибор, нужно управлять носителями заряда и излучением в очень маленьком объёме.

В 1960-х годах Жорес Алфёров с коллегами развивал полупроводниковые гетероструктуры — сочетания тонких

слоёв разных полупроводников. Алфёров и Рудольф Казаринов подали заявку на изобретение — лазер с двойной гетероструктурой. Официально признанная дата их приоритета — 30 марта 1963 года. Независимо аналогичный принцип сформулировал Герберт Крёмер. На пути от идеи до работающего устройства были необходимы новые материалы и методы получения достаточно совершенных границ между ними.

Слово «гетеро» означает различие. Однако в приборе соединяют материалы не просто ради разнообразия. У полупроводников различаются энергетические условия, в которых могут находиться электроны. Правильно подобранная граница ведёт себя как барьер или переход для носителей заряда. Несколько таких границ позволяют создать область, где носителям выгодно оставаться.

В двойной гетероструктуре активный слой помещают между материалами с подходящими свойствами. В нём концентрируются электроны и дырки — положительно заряженные возбуждения, возникающие при отсутствии электронов в определённых состояниях. Их рекомбинация может сопровождаться испусканием света. Одновременно различие оптических свойств слоёв помогает удерживать свет в нужной области, создавая волновод.

Удержание носителей можно представить как ложбину между двумя склонами: шарикам, оказавшимся на дне, нужна дополнительная энергия, чтобы выбраться. Электроны

и дырки, конечно, не шарики; их поведение определяется квантовыми состояниями и полями. Аналогия передаёт одну задачу инженера — удержат носители в активном слое, чтобы повысить вероятность встречи, при которой может возникнуть фотон.

Лазеру нужно усиление излучения. Проходящий фотон способен вызвать такой переход возбуждённой системы, при котором появляется согласованный с ним фотон. Если усиление компенсирует потери и выполнены условия работы резонатора, возникает лазерный режим. Поэтому удержание и носителей заряда, и света даёт принципиальное преимущество: энергия меньше расходуется вне активной области.

Важнейшие результаты конца 1960-х и начала 1970-х годов сделали возможными полупроводниковые лазеры, работающие непрерывно при комнатной температуре. Здесь особенно видно различие между демонстрацией физического принципа и развитием прибора. Короткий импульс в специальном режиме уже доказывает, что лазерная генерация возможна, но непрерывная работа требует одновременно справиться с потерями, нагревом и качеством материала.

Гетероструктуры стали основой не одного изделия, а целого способа конструирования электронных и оптических устройств. Они используются в источниках света, фотоприёмниках и высокочастотной электронике. Когда по оптическому волокну передают информацию, за привычным словом «связь» скрывается необходимость быстро, устойчиво и

управляемо превращать электрический сигнал в световой и обратно.

Нобелевскую премию по физике 2000 года Алфёров разделил с Крёмером и Джеком Килби. Награждение объединяло разные работы, заложившие основу информационных технологий; вклад Алфёрова и Крёмера относился к полупроводниковым гетероструктурам. Килби был отмечен за вклад в создание интегральной схемы. Эти достижения связаны общей технологической эпохой, но не являются одним и тем же изобретением.

Ключевые работы Алфёрова относятся к СССР, а премия — к периоду Российской Федерации. Эта разница не уменьшает преемственности научной школы. Она позволяет увидеть, сколько времени отделяет создание физического метода от его повседневного применения. Для пользователя световой сигнал просто приходит вовремя; внутри прибора тонкие слои продолжают выполнять работу, ради которой их когда-то научились соединять.

[Источники к главе 3](#)

4. 1981. Цвет, заданный размером

1981 — ключевая публикация; 2023 — Нобелевская премия. Рубрика: Советские открытия и позднее признание. Ленинград, СССР. Алексей Екимов и коллеги; последующее международное развитие исследований.

Если разрезать лист красной бумаги пополам, половинки останутся красными. Мы привыкли считать цвет свойством вещества: уменьшение куска меняет его количество, но не сам материал. На очень малых масштабах эта привычка подводит. Частицы одного и того же полупроводника могут по-разному взаимодействовать со светом именно потому, что отличаются размером.

Алексей Екимов исследовал это явление в Государственном оптическом институте имени С. И. Вавилова в Ленинграде. В начале 1980-х годов его работа с нанокристаллами в стекле показала, что размер частиц связан с изменением их оптических свойств. В 1981 году Екимов и А. А. Онущенко опубликовали результат в «Письмах в ЖЭТФ». До Нобелевской премии по химии, которую Екимов разделил с Луисом Брюсом и Мунги Бавенди, оставалось больше сорока лет.

Слово «нанокристалл» обозначает кристаллическую частицу, размеры которой измеряются нанометрами. Один нанометр — миллиардная доля метра. Однако малость сама по себе ещё не объясняет явление. Важно, что размеры ча-

стицы становятся сопоставимы с характерными масштабами движения носителей заряда в веществе. Пространственные ограничения начинают заметно влиять на разрешённые энергетические состояния.

Представим натянутую струну. Её длина участвует в определении того, какие колебания возможны. Укороченная струна при прочих равных звучит иначе, хотя материал не поменялся. Электрон в нанокристалле не является крошечной механической струной, и буквально переносить эту картинку нельзя. Сходство состоит в роли границ: допустимые состояния зависят от размеров области, в которой существует волновой процесс.

В полупроводнике свет может перевести электрон в более высокое энергетическое состояние, оставляя после себя так называемую дырку — отсутствие электрона, которое в коллективном движении ведёт себя как положительный носитель заряда. Электрон и дырка могут образовать связанную пару, экситон. Когда такая система пространственно ограничена, энергии её состояний изменяются. Поэтому меняются и энергии фотонов, которые частица способна поглощать или испускать.

Полупроводниковые нанокристаллы, в которых такое ограничение существенно, называют квантовыми точками. У многих из них уменьшение размера увеличивает энергию оптического перехода, а большей энергии фотона соответствует более короткая длина волны. В видимой части спек-

тра это сдвиг в сторону синего: частицы одного состава могут светиться разными цветами в зависимости от размера. Нельзя по одному диаметру предсказать цвет любого наноматериала: имеют значение состав, форма, поверхность и окружающая среда. Но размер стал самостоятельным инструментом настройки, которым в обычном куске вещества мы не распоряжаемся таким образом.

Научная история квантовых точек складывалась в нескольких лабораториях. Екимов работал с частицами в стекле. Брюс исследовал квантовые размерные эффекты в частицах, находящихся в растворе. Бавенди и его коллеги в 1993 году предложили способ получать нанокристаллы высокого качества с хорошо контролируемыми размерами. Это разные вклады в общее направление. Наблюдение необычного явления и воспроизводимое изготовление подходящего материала решают разные задачи, и практическая технология нуждается в обоих.

Важность однородности нетрудно понять без химической лаборатории. Если нужен определённый оттенок зелёного, а частицы в смеси сильно различаются по размеру, они будут испускать свет разных длин волн. Вместо узкой полосы нужного цвета получится более широкий спектр. Производственный метод должен обеспечивать не только наличие полезных частиц, но и повторяемость их характеристик. Между «такое возможно» и «это можно надёжно изготовить» лежит самостоятельная исследовательская работа.

Сегодня квантовые точки применяют, в частности, в устройствах отображения и исследуют как оптические метки для биологии. В одном из вариантов телевизионных панелей квантовые точки преобразуют часть синего света подсветки в красный и зелёный. При этом светятся они под действием падающего света; заставить сами точки излучать при прохождении электрического тока — другая техническая задача. И полезное свечение биологической метки само по себе не гарантирует её безопасности для человека — состав и судьба частиц в организме требуют отдельной проверки.

Эта глава возвращает нас к границе, проходящей через всю книгу. Открытие Екимова относится к советскому периоду. Его нобелевское признание состоялось в 2023 году, когда учёный давно работал за пределами России. Ни поздняя дата награды, ни смена страны работы не меняют места и времени исходного результата. Зато они показывают длинную жизнь научной идеи: из опытов с нанокристаллами в стекле выросло международное направление, а размер частицы превратился в способ управлять свойствами вещества.

[Источники к главе 4](#)

5. 1993. Остров, где мамонты задержались

1993. Рубрика: Результаты в России. Остров Врангеля; Санкт-Петербург и Москва. Сергей Вартамян, Вадим Гарутт, Андрей Шер.

В 1993 году Сергей Вартамян, Вадим Гарутт и Андрей Шер сообщили: мамонты острова Врангеля пережили своих материковых сородичей на тысячи лет. Ключом стали радиоуглеродные датировки останков, в том числе зубов мамонтов.

Часть останков оказалась значительно моложе привычной границы конца ледникового времени. Мамонты жили на острове примерно четыре тысячи лет назад. Мир уже знал земледелие, города и письменность, а в Арктике ещё сохранялись животные, которых мы мысленно помещаем в гораздо более далёкое прошлое.

Эти две картины не противоречат друг другу. Земледельческое общество в одной части планеты ничего не говорит о составе фауны на другом конце света. Открытие заставило раздвинуть границы воображения, но сделано оно было вполне проверяемым способом: измерением возраста конкретных остатков.

Пока организм жив, он получает углерод из окружающей

среды, в том числе радиоактивный углерод-14. После смерти это поступление прекращается, а углерод-14 продолжает распадаться с известной скоростью. Его доля относительно стабильного углерода постепенно уменьшается. Сравнивая её с оценкой исходного соотношения изотопов, можно определить, сколько времени прошло. Это не часы с циферблатом на кости: образец надо очистить, учесть загрязнение, проверить сохранность вещества и перевести радиоуглеродную шкалу в календарную. Несколько независимых находок убедительнее одной неожиданно молодой даты.

Работа принадлежала исследователям заповедника «Остров Врангеля», Зоологического института и Института эволюционной морфологии и экологии животных. Само место здесь существенно. Остров может стать убежищем, когда подходящие условия на материке исчезают, а может превратиться в ловушку: уйти дальше некуда. После отделения от материка животные оказываются в пространстве с ограниченными запасами пищи и числом возможных партнёров.

Небольшая популяция меняется иначе, чем большая. Редкие варианты генов могут случайно исчезнуть. Родственные особи чаще оставляют потомство друг с другом, и вредные наследственные варианты с большей вероятностью встречаются в двух копиях. Но отсюда ещё не следует, что каждая маленькая популяция обречена немедленно погибнуть. Численность, доступная пища, болезни и случайные события действуют одновременно.

Спустя три десятилетия этот вопрос стало возможно изучать по древним геномам. Международная работа 2024 года, в которой участвовали и российские специалисты, проследила генетическую историю мамонтов до и после изоляции острова. После сильного сокращения численность восстановилась до некоторого устойчивого уровня; генетические последствия сокращения сохранялись. Картина не поддерживала простую историю о непрерывном наследственном ухудшении, которое само по себе неизбежно привело к вымиранию.

Здесь важно различать две неизвестности. Генетика может описать длительное состояние популяции, но не всегда способна назвать событие, погубившее её последних представителей. А самая молодая найденная кость даёт позднюю подтверждённую дату присутствия, но не свидетельство смерти последнего животного. Новые находки способны передвинуть границу.

Датировки 1993 года заставили искать объяснение столь разным срокам исчезновения мамонтов. Общая картина вымирания должна учитывать и условия, в которых островная популяция смогла сохраняться ещё тысячи лет.

[Источники к главе 5](#)

6. 1994. Почему привычный путь к доказательству может не привести к цели

1994 — первая конференционная публикация; 1997 — журнальная версия. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Александр Разборов, Математический институт имени В. А. Стеклова РАН (МИАН) и Институт перспективных исследований в Принстоне; Стивен Рудич, Университет Карнеги — Меллона, США.

Проверить готовое решение часто легче, чем найти его. Если нам предъявили расписание, можно последовательно убедиться, что два занятия не назначены в одну аудиторию на одно время. Построить подходящее расписание с множеством ограничений бывает гораздо труднее. Это бытовой вход в один из центральных вопросов теоретической информатики: насколько различаются поиск и проверка?

Математики выражают вопрос через классы задач P и NP . Для задач из P существует алгоритм, время работы которого ограничено некоторой степенью размера входных данных. Для задач из NP положительный ответ имеет свидетельство, проверяемое за такое время. Когда о таких алгоритмах говорят «быстро», это условное сокращение. Даже степень может быть слишком высокой для практики, но различие меж-

ду степенным и экспоненциальным ростом принципиально при увеличении задачи. Вопрос P и NP состоит в том, можно ли любую задачу с быстро проверяемым свидетельством положительного ответа также быстро решить.

Можно было бы попытаться доказать трудность задачи, рассматривая вычисление как схему из простых логических элементов. Каждый элемент выполняет небольшую операцию, а вся сеть преобразует входные биты в ответ. Быстрый алгоритм можно представить семейством схем, размер которых растёт не быстрее некоторой фиксированной степени размера входа. Если для какой-либо задачи из NP доказать, что таких схем недостаточно, то и быстрого алгоритма для неё не существует. Это был бы способ доказать различие P и NP , установив строгую нижнюю границу вычислительной сложности. Нижняя граница означает, что меньше ресурсов не хватит, каким бы изобретательным ни был конструктор в рамках модели.

Но как доказать, что большая схема действительно неизбежна, а не просто более короткую пока не нашли? Александр Разборов и Стивен Рудич исследовали возможности самих методов доказательства. В работе *Natural Proofs* они выделили общие свойства методов, уже давших результаты для ограниченных видов схем. При определённом криптографическом предположении оказалось, что методы с этой совокупностью свойств не способны установить нужные сильные нижние границы для общих схем.

«Естественное доказательство» здесь — специальный термин. Он не означает всякое понятное рассуждение и не делит математику на естественную и противоестественную. Среди существенных требований — возможность эффективно распознавать используемое свойство функции и его распространённость среди большого множества функций. При этом скорость проверки свойства измеряют относительно размера полной таблицы ответов функции, а не длины одного её входа. Для функции от n входных битов таблица содержит 2^n в степени n ответов. Поэтому проверка, быстрая относительно всей таблицы, может требовать огромного времени по сравнению с длиной входа. Теорема относится к точно определённым классам подходов, поэтому её вывод нельзя расширять на любые будущие доказательства.

Откуда в вопросе о доказательствах появилась криптография? Для защиты информации полезны объекты, которые выглядят случайными для ограниченного вычислителя, хотя построены по короткому правилу. Если у наблюдателя достаточно ресурсов, он иногда сможет обнаружить структуру; если ресурсов недостаточно, различие должно оставаться недоступным. Это и есть одна из идей вычислительной псевдослучайности.

Предположим, что найдено достаточно быстро проверяемое свойство, которое встречается у заметной доли функций, но отсутствует у функций с небольшими схемами. Подходящую псевдослучайную функцию можно быстро вычис-

лить по ключу — значит, она допускает небольшую схему и этого свойства у неё нет. У случайно выбранной функции свойство, напротив, иногда будет обнаруживаться. Так проверка свойства дала бы способ различать эти два случая. Если же существуют псевдослучайные функции со стойкостью, требуемой в теореме, такое различие недоступно даже при ресурсах этой проверки. Получается противоречие: либо криптографическое предположение неверно, либо метода доказательства с перечисленными свойствами не существует.

Это ограничение условно. Авторы не доказали, что криптографическое предположение истинно, и не решили вопрос P и NP . Они установили: при сформулированном предположении некоторый широкий путь к сильному результату перекрыт. В математике такой вывод обладает полноценным содержанием, потому что точно обозначает, какие утверждения могут одновременно быть верны.

Можно сравнить его с исследованием местности перед строительством дороги. Инженер ещё не проложил маршрут, но доказал, что дороги определённого типа не смогут пересечь препятствие при заданных условиях. Это знание предотвращает повторение одинаковой неудачи. Придётся либо отказаться от части привычных свойств метода, либо исследовать само условие, создающее препятствие.

В 2007 году работа Разборова и Рудича была отмечена премией Гёделя. Авторы показали, что препятствие мо-

жет скрываться не только в трудности самой задачи, но и в устройстве привычных способов доказательства.

Для читателя вне математики здесь остаётся полезное различие: отсутствие найденного решения не доказывает невозможность, но и многократное применение привычного метода не гарантирует, что он вообще способен привести к цели.

[Источники к главе 6](#)

7. 1995. Граница, которая допускает ошибку

1995. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. AT&T Bell Laboratories, США. Коринна Кортес и Владимир Вапник.

Пусть на диаграмме нанесены два вида объектов: точки одного вида отмечены синим, другого — красным. Если группы хорошо разделены, между ними можно провести прямую так, чтобы все синие точки оказались с одной стороны, а красные — с другой. По этой границе можно классифицировать и новый объект: достаточно посмотреть, на чьей стороне окажется его точка. Но какую прямую выбрать? Известные точки можно правильно разделить несколькими способами. Если новая точка при одном варианте границы окажется на синей стороне, а при другом — на красной, результат классификации будет зависеть от выбора прямой.

Задача обучения состоит не только в воспроизведении уже показанных меток. Нужно выбрать правило, которое будет работать на ещё неизвестных случаях. Это различие между запоминанием и обобщением лежит в основе статистической теории обучения, в развитии которой Владимир Вапник сыграл большую роль ещё в советский период вместе с Алексеем Червоненкисом.

Работа Коринны Кортес и Вапника 1995 года относится к следующему, зарубежному этапу. Они работали в AT&T Bell Laboratories в США и предложили важную форму метода опорных векторов для данных, которые нельзя идеально разделить. Вапник родился в 1936 году в Узбекской ССР, СССР.

Один принцип выбора границы — оставить вокруг неё как можно более широкий свободный зазор. В двумерном рисунке это полоса между двумя группами точек. В пространстве множества признаков геометрия становится многомерной, но идея сохраняется. Чем дальше точка от границы, тем больше её нужно сдвинуть, чтобы она оказалась на другой стороне и получила другую метку.

Ближайшие к разделению примеры особенно важны. Они определяют, насколько широко можно раздвинуть края полосы, не затронув данные. Каждый пример представлен вектором — набором числовых признаков. Отсюда название «опорные векторы»: положение границы опирается на определённые обучающие объекты. Это математическое описание их роли, а не утверждение, что остальные наблюдения всегда бесполезны.

Однако реальные данные редко оказываются послушным рисунком. Измерения шумят, признаки неполны, а метки иногда ошибочны. Если любой ценой провести границу так, чтобы она без исключений согласовалась со всеми примерами, можно получить хрупкое и чрезмерно сложное правило.

Правило, подогнанное под каждую такую особенность учебного набора, может хуже классифицировать новые объекты.

Мягкий зазор допускает, что некоторые обучающие точки окажутся внутри разделительной полосы или даже на стороне другой группы. При обучении уравнивают две цели: сделать полосу шире и уменьшить общий штраф за такие нарушения. Параметр модели определяет, насколько сильно штраф влияет на выбор границы.

Есть и другая трудность: группы могут быть вложены одна в другую, так что прямая в исходных координатах бессильна. Тогда помогает переход к более богатому набору признаков. Можно, например, учитывать не только координаты, но и их сочетания. После такого преобразования нелинейная граница исходного рисунка может соответствовать линейному разделению в новом пространстве.

Для построения границы методу нужны скалярные произведения векторов — вычисляемые по парам объектов величины, описывающие их взаимное расположение в пространстве признаков. Ядро — функция, которая при соблюдении математических условий позволяет получить эти величины, не выписывая все новые координаты. Благодаря этому можно использовать гораздо более богатый набор признаков, чем удобно хранить и обрабатывать явно. Слово «ядро» не связано здесь ни с атомным ядром, ни с центральным процессором. Нелинейный классификатор с таким приёмом развивали Бернхард Бозер, Изабель Гийон и Владимир Вапник ещё

в работе 1992 года. Кортес и Вапник в 1995 году соединили этот подход с описанным выше мягким зазором.

Метод опорных векторов не гарантирует хорошего ответа при любых данных. Имеют значение признаки, выбор ядра, параметры и проверка на новых примерах. Кроме того, высокая точность классификации сама по себе не объясняет причинные механизмы: алгоритм может находить полезные совпадения, не раскрывая устройство явления.

Кортес и Вапник соединили геометрический выбор границы с возможностью учитывать несовершенство наблюдений. Безошибочность на учебном наборе перестала быть обязательной целью.

[Источники к главе 7](#)

8. 1996. Когда два языка математики говорят об одном

1996 — доказательство представлено; 2003 — окончательная журнальная публикация. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. США и Германия. Владимир Воеводский; развитие мотивных методов совместно с международным математическим сообществом.

Числа можно складывать и умножать. Но уже попытка деления показывает различие между математическими мирами. Среди целых чисел не всякое деление возможно: разделив единицу на два, мы выходим за их пределы. Рациональные числа допускают такое деление. Система, в которой можно выполнять четыре арифметических действия, кроме деления на ноль, называется полем. Привычные дроби — один пример, но не единственный.

Когда математик исследует поле, его интересуют не только отдельные вычисления. Какие уравнения в нём разрешимы? Какие новые числа придётся добавить, чтобы получить корни? Какие преобразования сохраняют все арифметические связи? За простым названием скрывается устройство целого мира допустимых действий.

Вот небольшой пример. Если x и y — действительные числа, сумма $x^2 + y^2$ равна нулю только при $x = y = 0$. Среди

комплексных чисел появляется другое решение: $x = 1$, $y = i$, потому что $i^2 = -1$. Формула осталась прежней, но выбор поля изменил ответ. Именно поэтому математику недостаточно написать уравнение: нужно сказать, с какими числами разрешено работать.

Один способ узнать сложный объект — построить его характеристики, или инварианты. Их можно сравнить, даже когда сами объекты слишком велики для прямого описания. Например, число отверстий помогает различать поверхности, не перечисляя каждую точку. В алгебре инварианты гораздо менее наглядны, но задача похожа: извлечь из бесконечного множества отношений информацию, которую можно удержать и использовать.

Гипотеза Джона Милнора утверждала связь двух таких способов исследования полей. Один строился средствами алгебраической K-теории: из элементов поля составляли специальные символы и задавали отношения между ними. Другой использовал когомологии Галуа — язык, работающий с симметриями алгебраических расширений. Воеводский доказал требуемое соответствие для коэффициентов по модулю два. Здесь двойка играет две разные роли. Для самого поля требуется, чтобы в его арифметике $1 + 1$ не равнялось нулю; это называют характеристикой, отличной от двух. А коэффициенты, с помощью которых описывают инварианты этого поля, берут по модулю два: в таком счёте $1 + 1 = 0$. Это не противоречие, а два разных уровня описания.

Простейший пример счёта по модулю два — различение чётного и нечётного: два одинаковых остатка при сложении дают ноль, два разных — единицу. В теореме с такими коэффициентами работают гораздо более сложные объекты. Два способа их описания выглядели чужими друг другу. В одном естественны произведения алгебраических символов, в другом — действия групп и сложные цепочки связей. Проверить совпадение на нескольких примерах недостаточно. Требуется показать, что отображение между описаниями не теряет нужной информации и не добавляет лишней во всём указанном классе случаев.

Владимир Воеводский родился в Москве в 1966 году. Работа над доказательством относится к его зарубежному периоду. Препринт «Гипотеза Милнора» появился в декабре 1996 года; позднее доказательство перерабатывалось, и журнальная версия вышла в 2003-м. Доказательство стало одной из ключевых работ, за которые Воеводский получил Филдсовскую медаль в 2002 году, ещё до выхода окончательной журнальной версии.

Чтобы связать алгебраические описания, Воеводский развивал мотивные когомологии и гомотопические методы в алгебраической геометрии. Они переносят в алгебраическую геометрию приёмы топологии — науки о свойствах, сохраняющихся при непрерывных преобразованиях. Для алгебраических объектов пришлось построить собственные аналоги таких преобразований и сохраняемых характеристик. Ра-

бота выросла из большого направления, связанного, среди прочих, с Андреем Суслиным и Маркусом Ростом. Доказательство имеет автора, но язык, на котором оно стало возможным, создавался многими.

Если задача плохо поддаётся одному аппарату, доказанное соответствие позволяет сформулировать её на другом языке и воспользоваться его преимуществами. Исследователь может выбирать описание, в котором нужная связь видна яснее. Так две прежде отдельные системы математических инструментов начинают работать вместе.

[Источники к главе 8](#)

9. 1996. Озеро под четырьмя километрами льда

1996. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Станция Восток, Антарктида; Москва и британские научные центры. Андрей Капица, Игорь Зотиков, Джеффри Ридли, Гордон Робин, Мартин Зигерт.

Под станцией Восток лежит почти четыре километра антарктического льда, а подо льдом — озеро. В 1996 году Андрей Капица, Игорь Зотиков и британские коллеги описали огромный водоём, не добравшись до его воды. Для этого потребовалось согласовать более ранние сейсмические, радиолокационные и спутниковые данные. Догадки о воде под станцией возникали и прежде; теперь удалось установить масштаб, значительную глубину и пресноводный характер скрытого водоёма.

Вопрос о жидкой воде под ледяным щитом на первый взгляд кажется парадоксом. На поверхности чрезвычайно холодно, но температура внутри толщи определяется не только погодой. Лёд изолирует нижние слои, снизу поступает тепло Земли, а давление меняет условия плавления. Поэтому основание толстого ледника может находиться близко к температуре таяния, хотя воздух над ним остаётся очень холодным.

Радиолокация посылает электромагнитный сигнал сквозь лёд и регистрирует отражения от границ. Гладкая граница льда с водой даёт сильное, ровное отражение; неровное каменное ложе рассеивает сигнал иначе. Сейсмические отражения тоже позволяют различать материалы: лёд, вода и горная порода по-разному проводят упругие волны. Спутник измеряет форму поверхности ледяного щита: над озером она заметно выравнивается и становится почти плоской. Каждый метод чувствителен к своему свойству; вместе они ограничивают круг возможных объяснений.

Это похоже на попытку узнать устройство закрытого здания по форме крыши и по эху, которое возвращается на разные сигналы. Ни один признак не даёт готового плана помещений. Но если несколько независимых измерений согласуются с одной моделью, описание становится значительно убедительнее. Для Востока важно было объяснить и отражающие границы, и геометрию поверхности, и старые сейсмические наблюдения.

Российская часть работы продолжала исследования советской антарктической программы. Андрей Капица участвовал в ранних измерениях, а теоретические работы Игоря Зотикова помогали понимать условия у основания ледников. Британские радарные и спутниковые исследования дали другие части картины. Приписать результат единственной стране означало бы потерять сам способ его получения.

В 1999 году появился дополнительный материал: анализ

керна — столбика льда, извлечённого при глубоком бурении, — показал, что его нижняя часть образовалась при замерзании озёрной воды. Такой лёд называют аккреционным. Он отличается от льда, возникшего из выпавшего снега. Исследование изотопного состава, газов и структуры кристаллов позволило обсуждать обмен между озером и ледяной толщей ещё до прямого проникновения скважины в воду. Российская буровая группа впервые вскрыла озеро 5 февраля 2012 года — спустя шестнадцать лет после геофизической работы, определившей его масштаб.

Водоём оказался частью системы, где взаимодействуют вода, движущийся лёд, тепло и растворённые вещества. Чтобы понять историю озера, требуется выяснить, откуда вода поступает, где замерзает и как перемешивается. Даже слово «изолированное» нуждается в уточнении: отсутствие открытого контакта с атмосферой не делает внутренние процессы неподвижными.

Работа 1996 года не доказала существования в озере необычных животных или особой древней биосферы. Такие вопросы требуют собственных образцов и строгого контроля загрязнения. Достижение этой работы значительно и без таких ожиданий: огромный недоступный водоём удалось измерить и включить в физическую картину Антарктиды. История Востока показывает, как география продолжает делать открытия даже там, где карта поверхности давно кажется завершённой.

Источники к главе 9

10. 1996. Сколько сведений проходит через квантовый шум

1996 — препринт; 1998 — журнальная публикация. Рубрика: Результаты в России. МИАН, Москва, Россия. Александр Холево.

Разговор в шумном помещении показывает разницу между звуком и сообщением. Звук доходит до собеседника, но часть слов теряется. Можно говорить медленнее, повторять важное или заранее договориться о коротких обозначениях. Возникает вполне точный вопрос: с какой наибольшей скоростью удастся передавать сообщение так, чтобы вероятность ошибки становилась сколь угодно малой?

В классической теории связи ответ на этот вопрос дал Клод Шеннон. Но носители информации — свет, электроны, атомы — подчиняются квантовой механике. Когда отдельные квантовые состояния используются как сигналы, привычная задача обретает новые условия. Некоторые разные состояния невозможно гарантированно различить, измерив единственную копию сигнала. Сам процесс считывания также приходится включать в описание канала.

Александр Холево работал над этим кругом вопросов много лет. В постсоветский период он доказал теорему о пропускной способности классического канала с квантовыми

ми состояниями на выходе, представленную в препринте 1996 года и опубликованную в 1998-м. Она дополняла результаты других исследователей и вошла в фундамент квантовой теории информации. Связанный комплекс результатов обычно обозначают именами Холево, Бенджамина Шумахера и Майкла Д. Вестморленда.

Классическое сообщение в этой задаче остаётся обычным: отправитель хочет передать буквы или последовательность нулей и единиц. Квантовыми являются физические состояния, которыми он эти символы кодирует. Получатель должен измерить пришедшие системы и восстановить сообщение. Рассматривается канал без памяти: последовательные его использования независимы, а прежние сигналы не меняют того, как он подействует на следующий сигнал. Это существенно отличается от другой задачи — передачи самого неизвестного квантового состояния, для которой действуют иные ограничения.

Для наглядности вообразим два способа посылать световые сигналы. В одном случае они настолько различны, что приёмник уверенно узнаёт каждый. В другом — сигналы близки, а шум ещё больше затрудняет различение. Если получатель пытается немедленно угадать каждый отдельный символ, он может терять часть доступной информации. Квантовая теория допускает совместное измерение целой последовательности систем. Вместо отдельных букв получатель различает кодовые слова целиком. Такой способ может

извлекать больше информации, чем последовательное распознавание каждого сигнала по отдельности.

Полезно различить верхний предел и достижимую скорость. Одной верхней оценки мало: она запрещает надёжную передачу быстрее порога, но не показывает, какая скорость достижима. Теорема кодирования должна связать обе стороны: установить ограничение и показать существование способов передачи, приближающихся к нему в определённых условиях.

Работа Холево установила такую связь для канала с произвольными, в том числе смешанными, сигнальными состояниями. Смешанное состояние возникает, когда квантовая система описывается не одним чистым состоянием, а статистическим распределением возможностей. Это позволяет включить в теорию важные проявления неопределённости и шума, а не ограничиваться идеализированными чистыми сигналами.

Для расчёта используют энтропию — меру неопределённости квантового состояния. Сначала мысленно объединяют все возможные сигналы с учётом того, как часто отправитель выбирает каждый символ: получается среднее состояние, доступное получателю до расшифровки. Его энтропию сравнивают с той неопределённостью, которая в среднем остаётся в сигналах, когда переданный символ уже известен. Разность этих двух энтропий показывает, сколько классической информации можно передать на одно использование такого ка-

нала в пределе длинных кодовых слов. Затем выбирают наиболее выгодные частоты использования входных символов.

За словами «достижимая скорость» скрывается важное условие. Теорема относится к длинным кодовым последовательностям и предельному режиму: по мере увеличения длины можно уменьшать вероятность ошибки. Она не обещает, что короткое сообщение в сегодняшнем приборе немедленно достигнет этого предела. Реальному устройству нужны подходящие источники, память, измерения и вычисления. Математическая возможность и инженерная осуществимость здесь разделены вполне конкретными требованиями.

Такие результаты задают ориентиры для работы с квантовыми каналами. Без них трудно понять, вызвана ли неудача несовершенством приёмника или фундаментальным ограничением природы. Улучшать устройство имеет смысл по-разному в этих двух случаях. Инженер может заменить детектор, но не отменить доказанную границу одним удачным техническим решением.

Когда обсуждают квантовую связь, внимание часто достаётся защищённости или необычности отдельных частиц. Теоремы Холево возвращают разговор к проверяемому вопросу: какую информацию, при каких сигналах и с какой точностью действительно можно получить. В этой постановке квантовая механика становится строгим языком возможностей связи.

Источники к главе 10

11. 1997. Умножение, в котором важен порядок

1997 — препринт; 2003 — журнальная публикация. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. IHÉS, Бюрсюр-Иветт, Франция. Максим Концевич.

Пять, умноженное на семь, равно семи, умноженному на пять. Такая свобода менять множители местами настолько привычна, что кажется свойством умножения вообще. Но операции устроены разнообразнее. Сначала надеть носки, потом обувь — не то же самое, что выполнить действия в обратном порядке. Эта бытовая последовательность не объясняет квантовую механику, зато помогает принять её математическую особенность: порядок может входить в содержание результата.

В классической механике измеряемые величины можно описывать функциями состояния системы. Для частицы состояние задаётся, например, положением и импульсом. Перемножение значений двух функций не зависит от порядка. В квантовом описании физическим величинам соответствуют операторы, и их последовательное действие в общем случае переставлять нельзя.

Как пройти от одного описания к другому? Для отдельных простых систем существуют знакомые способы. Но матема-

тику интересует общий вопрос: можно ли построить квантовое правило умножения для широкого класса классических систем, чтобы оно было внутренне согласованным и в подходящем пределе возвращало привычное умножение?

Этот подход называется деформационным квантованием. Деформация здесь означает изменение математической операции. Новое произведение представляют как старое плюс последовательность поправок с формальным параметром. В физических приложениях этот параметр связан с постоянной Планка, задающей масштаб квантовых эффектов. При формальном переходе параметра к нулю поправки исчезают. Так в самой записи сохраняется связь с классическим случаем.

Слово «формальный» существенно. На этом этапе исследователь изучает согласованность ряда и его коэффициентов; он не обязан доказать, что при любом подставленном физическом числе бесконечная сумма сойдётся. Разные вопросы — существование алгебраической конструкции, её аналитические свойства и пригодность для конкретного эксперимента — требуют разных доказательств.

Разницу между порядком действий и расстановкой скобок можно увидеть на обычных действиях над числом. Возьмём тройку, прибавим единицу, затем удвоим результат: получится восемь. Удвоим тройку сначала и лишь затем прибавим единицу: получится семь. Порядок действий важен. Но если порядок длинной цепочки сохранён, соседние дей-

ствия можно заранее объединять в составные операции — итог от такой расстановки скобок не меняется.

Главное препятствие квантования тоже связано со скобками. Если множителей три, расстановка скобок должна оставаться согласованной: результат последовательного умножения не должен зависеть от того, какую пару объединили первой. Это свойство называется ассоциативностью. Свободу менять порядок множителей мы уже потеряли, но терять ещё и возможность непротиворечиво перемножать длинные выражения было бы слишком дорого. Поправки идут по степеням параметра: первой, второй, третьей и далее. Добившись ассоциативности с точностью до первой степени, можно столкнуться с нарушением на уровне второй. Исправление на этом уровне ставит задачу для следующего. Нужно доказать, что согласованную цепочку можно продолжать сколь угодно далеко.

В 1997 году Максим Концевич представил решение для любого конечномерного пуассонова многообразия. За термином стоит пространство состояний, снабжённое правилом — скобкой Пуассона, — которое связывает изменение одних физических величин с другими. Например, скобка координаты с функцией энергии системы задаёт скорость изменения этой координаты. Концевич доказал существование нужного квантования и более общую теорему формальности, связывающую соответствующие математические структуры.

Концевич родился в Химках в 1964 году, в РСФСР, СССР. В период этой работы он был профессором французского Института высших научных исследований, IHÉS. Результат относится к его работе во Франции. Квантование пуассоновых многообразий было названо среди его достижений при присуждении Филдсовской медали в 1998 году. Журнальная публикация появилась позднее, в 2003-м.

В построении участвуют графы — схемы из вершин и соединяющих их рёбер. Они помогают организовать множество взаимосвязанных членов формулы. Это способ строгого учёта: определённой схеме соответствует определённое выражение и вес. Суммирование устроено так, чтобы выполнялись требуемые алгебраические отношения.

Вместо отдельных удачных рецептов появилось единое основание. Теперь для указанного класса объектов вопрос существования получил ответ; можно исследовать конкретные реализации и связи с другими областями. При этом доказательство не утверждает, что любой математически построенный квантовый мир физически существует.

В построенном умножении порядок множителей влияет на результат, а расстановка скобок — нет.

[Источники к главе 11](#)

12. 1997. Кто разрешает иммунитету поднять тревогу

1997. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Йельский университет, США. Руслан Меджитов, Пола Престон-Хёрлберт, Чарльз Джейнуэй.

Способность распознать чужую молекулу ещё не объясняет, почему иммунная система начинает действовать. Организм постоянно встречается с веществами пищи, собственной микрофлорой и безвредными частицами среды. Если каждый контакт вызывает полномасштабную атаку, защита сама становится угрозой. Требуется не только узнавание, но и решение о том, когда включать сильный ответ.

У иммунной системы есть взаимосвязанные уровни. Врождённая защита реагирует на характерные признаки определённых угроз и повреждений. Адаптивная использует огромный набор более специализированных рецепторов и способна формировать иммунную память. Эти различия не означают, что системы работают в отдельных помещениях организма. Между ними нужны сигналы, которые согласуют действия.

В 1997 году Руслан Меджитов, Пола Престон-Хёрлберт и Чарльз Джейнуэй описали человеческий белок, родственник рецептору Toll плодовой мушки. Незадолго до этого

выяснилось, что у мушки Toll участвует в защите от грибковой инфекции. Сходство белков давало основание искать похожий механизм включения иммунной защиты у человека. Меджитов родился в Ташкенте в 1966 году, в Узбекской ССР, СССР. Исследование выполнено в Йельском университете в США. Оно стало важной частью объяснения того, как древние механизмы распознавания связаны с запуском специализированного иммунитета.

Рецептор — молекула, которая позволяет клетке отвечать на определённое воздействие. Его можно условно сравнить с датчиком, но белок не просто выдаёт электрический сигнал. Связывание и изменение структуры запускают цепь молекулярных взаимодействий. В итоге меняется активность других белков и работа генов.

В своей работе авторы исследовали человеческий гомолог Toll и показали, что его специально активированная форма запускает сигнальный путь NF-κB. Это важный регулятор клеточного ответа. Вслед за включением пути возникали воспалительные сигналы и повышалось производство B7.1 — молекулы, помогающей активировать Т-клетки. Эти лимфоциты участвуют в адаптивном иммунном ответе. Так обнаружилась конкретная связь между ранним распознаванием и условиями активации адаптивной защиты.

Т-клетке для активации обычно недостаточно распознать антиген — молекулярный признак, предъявленный ей другой клеткой. Нужен дополнительный сигнал, называемый ко-

стимуляцией; его может передавать В7.1. Значит, ответ Т-клетки мог зависеть не только от того, что она распознала, но и от состояния клетки, предъявившей антиген.

До выяснения подобных связей можно было подробно знать части иммунного ответа и всё же не понимать их согласования. Работа дала механизм, способный объяснять, почему молекулярное обнаружение определённых структур помогает организму перейти к следующему уровню защиты. Рецептор стал частью причинной цепи, а не просто ещё одним белком в длинном каталоге.

Но история требует аккуратной датировки. Статья 1997 года не завершила расшифровку всех Toll-подобных рецепторов и всех их природных активаторов. Эксперимент с активированной формой показал, на что способен сигнальный путь, но не отвечал сразу на каждый вопрос о естественном распознавании. Последующие исследования разных коллективов уточняли, какие молекулы и при каких условиях запускаяют конкретные рецепторы.

Это различие между возможностью и природной функцией важно для всей биологии. Если искусственно включённый белок меняет поведение клетки, обнаружена существенная связь. Но затем необходимо выяснить, когда белок включается в организме, какие партнёры ему нужны и что ограничивает ответ. Только несколько таких уровней вместе создают полноценное объяснение.

Понимание врождённого распознавания повлияло на ис-

следования инфекций, воспаления и способов направлять иммунный ответ. Из одного открытия не следует универсальная лечебная рекомендация: слишком слабый ответ опасен, слишком сильный тоже. Тревога организма перестала выглядеть чёрным ящиком между встречей с чужеродным материалом и мобилизацией защитных клеток.

[Источники к главе 12](#)

13. 1998. Как ссылки научились взвешивать страницы

1998 — научное описание системы. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Стэнфордский университет, США. Сергей Брин, Ларри Пейдж и коллеги.

Найти страницу, на которой есть нужное слово, и найти полезный ответ — разные задачи. Если слово встречается на миллионе страниц, простое совпадение почти ничего не решает. А если автору выгодно подняться в выдаче, он может повторять желательный текст снова и снова. Поиску требуется признак, который не сводится к содержанию одной страницы.

Сеть уже хранила такой дополнительный материал: ссылки. Один документ направляет читателя к другому. Это можно рассматривать как свидетельство внимания, рекомендацию или указание на источник. Разумеется, ссылки бывают случайными, рекламными и критическими. Но в большом масштабе их структура содержит информацию, которой нет в одиночном тексте.

Сергей Брин и Ларри Пейдж использовали её в поисковой системе, описанной в статье 1998 года. Брин родился в Москве в 1973 году, в РСФСР, СССР. Систему создавали в Стэнфордском университете. Отдельное описание алгорит-

ма PageRank связано также с Радживом Мотвани и Терри Виноградом; научную историю нельзя свести к двум именам основателей компании.

Самая простая идея — считать входящие ссылки. Но тогда ссылка с малоизвестной страницы и ссылка с крупного справочного ресурса оказываются равными. PageRank взвешивает ссылку с учётом авторитета её источника. Страница получает вес от ссылающихся на неё страниц, а те получают вес от своих источников.

Возникает круг. Чтобы узнать важность страницы A , нужно знать важность B ; чтобы узнать B , нужно знать A . В обычном разговоре такая зависимость выглядела бы порочным рассуждением. В математике она может стать системой уравнений. Нужно найти согласованные значения сразу для всех участников сети.

Полезно представить пользователя, который переходит по ссылкам, иногда оставляя текущую цепочку и выбирая новую страницу. Нас интересует, какую долю долгого путешествия он проведёт на каждой странице. Эта доля и задаёт вес страницы в модели: чем чаще такое блуждание приводит на неё, тем больше её PageRank. Возможность нового старта важна: иначе замкнутая группа ссылок способна удерживать всё путешествие внутри себя.

Ссылка передаёт не весь вес страницы каждому адресату. Если исходящих направлений много, соответствующий вклад распределяется между ними. Возьмём две страницы

одинакового веса: с одной ведут сто ссылок, с другой — одна. Каждая ссылка первой страницы передаст меньший вклад, чем единственная ссылка второй. Веса пересчитывают по всей сети снова и снова, пока их изменения не станут достаточно малы.

PageRank сам по себе не знает, о чём спросил человек. Высокий общий вес страницы ещё не делает её подходящей для запроса о редком лекарстве или конкретной математической формуле. В описанной системе этот показатель сочетался с другими признаками, включая текст и особенности ссылок. Важным результатом стало соединение идеи ранжирования с работающей архитектурой большого поискового сервиса.

Ссылочную структуру в те же годы исследовали и другие. Например, Джон Клейнберг предложил HITS, различающий авторитетные страницы и страницы, собирающие ссылки на них.

Здесь полезно разделить два уровня. Научно-технический вклад — способ использовать структуру гиперссылок и организовать поиск в большой сети. Коммерческая судьба Google — дальнейшая история компании. Успех бизнеса не доказывает каждую гипотезу статьи, а математическая ценность метода не измеряется только стоимостью корпорации.

Есть и граница доверия. Алгоритм оценивает связи между документами; он не проверяет истинность каждого утверждения. Авторитетный сайт может ошибиться, популярное

заблуждение — получить множество ссылок, а важный новый результат — ещё не успеть обзавестись ими. Это ограничение следует из природы самого признака, а не только из качества программирования.

Работа Брина, Пейджа и коллег показала, что огромный массив документов можно читать в двух измерениях смысла: что написано внутри и как устроены отношения между текстами. Связи между страницами помогли там, где одного текста уже не хватало: совпадающих по словам страниц стало слишком много.

[Источники к главе 13](#)

14. 1998. Словарь между частицами и гравитацией

1998. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Принстонский университет, США. Стивен Габсер, Игорь Клебанов, Александр Поляков.

Физическое уравнение может быть известно, а его решение — почти недоступно. Особенно трудно вычислять поведение квантовых полей, когда взаимодействие между их возбуждениями сильно. Привычный путь — сначала решить простую задачу, затем добавлять всё меньшие поправки — перестаёт надёжно работать, если поправки уже не малы.

В конце 1990-х возникла необычная возможность: перевести некоторые такие задачи на язык гравитации. В 1997 году Хуан Малдасена предложил соответствие между определёнными квантовыми теориями поля и теориями струн в пространствах особой геометрии. В некоторых режимах трудная задача с сильным взаимодействием получала более доступное гравитационное описание.

Но предположение об эквивалентности нуждается в правилах использования. Если в одной теории задана измеримая величина, чему она соответствует во второй? Как сравнивать ответы? В феврале 1998 года Стивен Габсер, Игорь Клебанов и Александр Поляков предложили важнейшую

часть такого словаря. Работа была выполнена в Принстоне. Поляков родился в Москве в 1945 году; Клебанов также родился в СССР. Оба продолжали исследования в американской научной среде.

Авторы связали корреляционные функции одной теории с зависимостью действия другой теории от граничных условий. Корреляционные функции описывают, как связаны изменения поля в разных точках и как система откликается на внешнее воздействие. Действие — математическая величина, из которой выводят уравнения гравитационной теории.

Представим регулятор слабого внешнего воздействия. Нас интересует не только ответ системы в одном положении регулятора, но и изменение ответа при небольшом повороте. В формулах квантовой теории такой вспомогательный регулятор называют источником; отдельного прибора за ним может не быть. В предложенном соответствии источнику отвечают граничные значения поля в гравитационном описании. Меняя их и вычисляя изменение действия на решении, получают сведения об отклике квантовой системы. Так трудный расчёт переводится в определённую задачу с граничными условиями.

Чтобы представить смысл граничных условий, достаточно вспомнить задачу о температуре внутри тела. Температуры на поверхности помогают определить распределение внутри. В квантовой и гравитационной задаче математика значительно сложнее, но разделение между внутренним объёмом

и условиями на его границе сохраняет значение.

Это не означает, что учёные заменили объёмную Вселенную обычной плоской картинкой. В рассматриваемом соответствии гравитационное описание имеет дополнительное пространственное измерение. Изменению положения вдоль этого измерения на стороне квантовой теории соответствует изменение масштаба: переход между описаниями более мелких и более крупных деталей системы. Геометрическая граница здесь — математический объект, а не экран, установленный где-то в космосе.

Название AdS/CFT сохраняет след этой конструкции. AdS обозначает пространство анти-де Ситтера с определённой отрицательной кривизной. CFT — конформную теорию поля, обладающую особой симметрией преобразований масштаба и геометрии. Эти условия существенны. Перенести полученные правила на любую физическую систему без дополнительного обоснования нельзя.

В том же феврале Эдвард Виттен независимо развил точное соответствие между наблюдаемыми величинами и гравитационным описанием. Поэтому история складывается из нескольких работ: гипотезы Малдасены и конкретных рецептов Габсера, Клебанова, Полякова и Виттена. Совпадения рассчитанных характеристик стали количественными проверками предложенной связи.

Если две очень разные теории описывают одну структуру, трудность вычисления может зависеть от выбранного язы-

ка. Геометрия способна сделать видимым то, что скрыто в сумме бесчисленных квантовых взаимодействий. И наоборот, квантовая теория помогает задавать вопросы о гравитации.

При этом соответствие не стало прямым экспериментальным доказательством теории струн или утверждением, что реальная Вселенная целиком устроена по этой конкретной модели. Внутри определённых теорий связи сформулированы строго и подкреплены проверяемыми расчётами. Работа 1998 года дала способ обращаться к этим связям как к вычислительному инструменту: ставить вопрос на одном языке и искать ответ на другом.

[Источники к главе 14](#)

15. 1999. Красная метка внутри живой клетки

1999. Рубрика: Результаты в России. Москва, Институт биоорганической химии РАН и другие российские учреждения. Михаил Мац, Аркадий Фрадков, Юлий Лабас, Александр Савицкий, Сергей Лукьянов и коллеги.

Под микроскопом можно увидеть клетку, но далеко не всегда понятно, где находится интересующий белок и куда он перемещается. Окрасить ткань после фиксации полезно, однако тогда движение уже прекратилось. Для наблюдения живого процесса нужна метка, которую сама клетка сможет производить и носить вместе с нужным объектом.

Такую возможность дали флуоресцентные белки. Их известнейший ранний представитель — зелёный белок GFP из медузы. В работе 1999 года Михаил Мац, Аркадий Фрадков, Сергей Лукьянов и коллеги расширили эту идею: выделили и описали родственные белки из коралловых полипов — кораллов и их родственников, не обладающих биолюминесценцией. Среди них оказался красный белок, получивший широкую известность как DsRed.

Здесь необходимо различать флуоресценцию и собственное свечение. Флуоресцентный белок получает энергию от внешнего света, а затем испускает часть её в виде света дру-

гой длины волны. Он похож на крошечный преобразователь цвета. Без подходящего освещения яркой метки не будет. Это отличается от биолюминесценции, где свет возникает за счёт химической реакции.

Почему появление красного цвета стало научным событием? Если все наблюдаемые объекты помечены одинаково, трудно понять, кто с кем взаимодействует. Несколько цветов позволяют различать белки, клеточные структуры или разные популяции клеток. Пример из обычной жизни — карта транспорта: обозначения маршрутов становятся полезнее, когда линии можно отличить друг от друга.

Но биологическая метка сложнее цветного значка. Чтобы клетка изготовила её сама, в неё вводят соответствующую генетическую инструкцию. Можно соединить инструкцию для исследуемого белка с инструкцией для флуоресцентного партнёра. Получится общий продукт, положение которого видно под микроскопом. При этом необходимо проверять, что добавленная часть не испортила работу исследуемой молекулы.

Именно здесь обнаружилось ограничение первоначально-го DsRed: его молекулы склонны объединяться в группы по четыре. Сцепляясь по четыре, молекулы метки могут стягивать вместе и белки, к которым они присоединены, меняя их поведение. Удобный цвет ещё не делает природную молекулу идеальным инструментом. Понадобилась последующая белковая инженерия — изменение аминокислотной после-

довательности с проверкой получившихся свойств.

В 2002 году Роберт Кэмпбелл и соавторы из лаборатории Роджера Циена в Калифорнийском университете в Сан-Диего описали мономерный красный белок mRFP1, происходящий от DsRed. Его отдельная молекула сохраняла флуоресценцию без обязательного объединения в четвёрку. Это была самостоятельная зарубежная работа, развившая инструментальную линию, начатую российским открытием. Научная история здесь напоминает эстафету: обнаружить природную возможность, понять недостаток, изменить конструкцию и проверить применение.

Флуоресцентные белки не превращают клетку в прозрачную схему. Свет рассеивается, метки могут выгорать, а их созревание занимает время. Интенсивность сигнала зависит не только от количества интересующего вещества. Поэтому изображение остаётся измерением, требующим контроля, а не фотографией всей биологии без искажений.

Красные белки расширили возможности живой микроскопии: стало легче различать одновременно наблюдаемые процессы. На их основе создавали и сенсоры, в которых изменение цвета или яркости связано с состоянием клетки. Описанные Мацем и коллегами природные молекулы дали исходный материал для этого семейства инструментов; последующие лаборатории изменяли их под всё более точные исследовательские задачи.

[Источники к главе 15](#)

16. 1999. Воздух четырёх ледниковых эпох

1999. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Станция Восток, Антарктида; российские, французские и американские лаборатории. Нарцисс Барков, Владимир Котляков, Владимир Липенков, Жан-Робер Пети, Жан Жузель, Доминик Рейно и коллеги.

В 1999 году Жан-Робер Пети, Нарцисс Барков, Владимир Липенков и их коллеги опубликовали климатическую и атмосферную летопись примерно за 420 тысяч лет. Её получили из керна станции Восток — длинного столбика антарктического льда. Внутри сохранились пузырьки древнего воздуха: исследователям досталась часть самой прошлой атмосферы. Для этого потребовалось извлечь газ, измерить состав и сопоставить его возраст с возрастом окружающего льда.

Запись охватывала четыре полных цикла смены ледниковых и межледниковых условий. Российские специалисты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и Института географии РАН работали вместе с французскими и американскими коллегами. За работой Нарцисса Баркова с этим ледяным архивом стояли десятилетия исследований Антарктиды. По воспоминаниям

его коллег из ААНИИ, он выступил инициатором сверхглубокого бурения на Востоке, а в экспедиции 1969–1971 годов руководил отрядом, пробурившим там первую 500-метровую скважину. Результат 1999 года продолжал советскую программу, но представлял новый по длительности и согласованности ряд данных.

Глубина слоя в керне связана с возрастом льда, однако эту связь нельзя получить простым пересчётом метров в годы. Снег накапливается с разной скоростью, нижние слои сжимаются и растягиваются при движении щита. Для построения временной шкалы нужны измерения и модель поведения льда.

В одном керне находятся два различных архива. Первый — сама замёрзшая вода. Соотношение её изотопов связано с условиями, при которых испарялась, переносилась и выпадала влага. В холодные периоды в антарктическом снеге обычно меньше молекул воды с тяжёлыми атомами водорода и кислорода. По изменениям их доли, с учётом других влияющих условий, восстанавливают температурные изменения. Второй архив — воздух, заключённый в пузырьках. Его анализ даёт концентрации углекислого газа, метана и других компонентов атмосферы.

У этих архивов разный возраст. Свежий снег порист, и воздух некоторое время продолжает сообщаться с атмосферой. Только после уплотнения поры замыкаются. Поэтому газ внутри слоя обычно моложе окружающего льда. Если по-

ставить оба измерения на шкалу без поправки, можно ошибиться в последовательности событий: решить, что изменение газа предшествовало потеплению, хотя сравниваются разные моменты.

Это хороший пример того, почему научный график сложнее красивой линии. За ним стоят процедуры синхронизации и оценки погрешности. Данные Востока показали тесное соответствие между изменениями температуры Антарктиды и концентрациями парниковых газов на протяжении длинного ряда циклов. Такая повторяемость позволила исследовать устойчивые связи внутри климатической системы, а не только один переход от холода к теплу.

Но соответствие линий не означает, что у всей истории одна причина. Изменения земной орбиты перераспределяют поступление солнечной энергии; океан, ледяные щиты, растительность и атмосферные газы отвечают друг на друга. Углекислый газ может усиливать уже начавшееся потепление. А когда его добавляют в атмосферу, например сжигая уголь, нефть и газ, это само становится внешним воздействием на климат. В обоих случаях газ затрудняет уход теплового излучения в космос. Меняется его роль в последовательности событий, а не физическое действие.

В 2004 году европейский проект EPICA опубликовал ледяную запись уже примерно за 740 тысяч лет. На перекрывающемся интервале она согласовывалась с Востоком, а более древние слои показали отличия ранних циклов. Поэтому 420

тысяч лет — исторический масштаб конкретного достижения, а не вечный предел возможностей ледяного архива. Последующие исследования продолжили удлинять и уточнять эту летопись.

Прежде чем доверять расчёту будущего климата, можно проверить, воспроизводит ли модель крупные перемены прошлого. Керна Востока дал для такой проверки четыре ледниковых цикла.

[Источники к главе 16](#)

17. 1999. Пять новых клеток таблицы Менделеева

1999 — начало публичной научной истории; дальнейшие результаты 2000–2010. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Дубна, Россия. Юрий Оганесян, Владимир Утёнков и коллективы Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ), Ливерморской и Ок-Риджской национальных лабораторий и других организаций.

В Дубне в 1998–1999 годах пучок кальция-48 направляли на плутониевую мишень. Среди огромного числа столкновений искали редкие события: рождение сверхтяжёлого ядра и следы его последующих распадов. В пробирке новый элемент не накапливался. Доказательство предстояло собрать из сигналов детектора.

Работы Юрия Оганесяна, Владимира Утёнкова и международного коллектива привели к признанию элементов 114, 115, 116, 117 и 118: флеровия, московия, ливермория, теннессина и оганесона. Важна не только длина таблицы. Эти опыты проверяли, насколько тяжёлым может быть атомное ядро и почему некоторые очень тяжёлые ядра живут дольше своих соседей.

Первые публикации 1999 года сообщали о ранних кандидатах. Они ещё не давали всей необходимой уверенно-

сти. В 2000 году появились сообщения о двух сходных цепочках распада элемента 114 и первом событии для элемента 116. Отнесение ранних событий к конкретным изотопам впоследствии уточнялось. Поэтому начало программы, накопление надёжного доказательства и официальное признание здесь нельзя свести к одной дате.

Протоны имеют одинаковый электрический заряд и отталкиваются. Ядро удерживается сильным взаимодействием между его составляющими на малых расстояниях. С ростом числа протонов задача удержания усложняется. Но устойчивость зависит не только от общей численности частиц. Протоны и нейтроны ядра занимают квантовые состояния, образующие оболочки. При определённых числах протонов или нейтронов оболочки заполняются, что может повышать устойчивость ядра; такие числа называют магическими. Теория предсказывала область, где сверхтяжёлые ядра благодаря оболочечному устройству должны сопротивляться распаду лучше, чем следовало бы из простого продолжения прежних закономерностей.

Эту область называли островом стабильности. Название красивое, но слово «стабильность» здесь сравнительное. Для экспериментатора огромна разница между ядром, живущим секунду, и ядром, распадающимся за миллионную долю секунды. Из этого ещё не следует существование материала, который можно хранить годами.

Чтобы приблизиться к такой области, использовали пуч-

ки кальция-48 и мишени из тяжёлых элементов. Изотопы одного элемента различаются числом нейтронов. Кальций-48 удобен тем, что при сравнительно небольшом числе протонов содержит много нейтронов. Это важно для приближения к острову стабильности: предсказанные долгоживущие сверхтяжёлые ядра должны быть богаты нейтронами, а при синтезе обычно получается их нехватка. Столкновение с тяжёлым ядром иногда позволяет собрать ещё более тяжёлую систему. Но большинство столкновений не заканчивается появлением нужного продукта: необходимо преодолеть электрическое отталкивание, слиться и пережить сильное возбуждение.

Даже удачное рождение атома ещё не равно открытию. Его надо выделить среди огромного количества других частиц. Продукты реакции проходят через разделитель и попадают в детектор. Исследователи сопоставляют место попадания, энергии последующих распадов и промежутки времени между ними. При альфа-распаде ядро теряет два протона и два нейтрона. Поэтому последовательность таких событий содержит сведения и о первоначальном ядре, и о его потомках.

Особенно убедительна взаимная проверка: к одному дочернему ядру можно прийти разными путями. Тогда распадная цепочка перестаёт быть единственным загадочным следом и становится частью согласованной системы измерений. Именно работы 2004 года, в которых цепочки удалось свя-

зять между собой, сыграли ключевую роль в признании элементов 114 и 116. Для элемента 116 вывод дополнительно укрепили результаты, опубликованные в 2006 году. Официальное признание последовало в 2011 году, имена — в 2012-м.

Программа продолжалась. Для элемента 117 понадобился берклий, произведённый и выделенный американскими партнёрами. Результат был опубликован в 2010 году. Производство редкой мишени, работа ускорителя, химическая подготовка и анализ детекторных событий составили общую международную цепь. Приоритет для элементов 115, 117 и 118 признали в 2015 году, названия утвердили в 2016-м. Среди утверждённых имён было и имя участника этой работы: элемент 118 назвали оганесоном в честь Юрия Оганесяна. Имя учёного появилось в периодической таблице при его жизни.

Новые ядра позволили проверять расчёты сил, связывающих материю, там, где прежних данных почти не было. Их времена жизни и способы распада показывают, как меняется устойчивость при добавлении протонов и нейтронов. Пять клеток таблицы стали пятью новыми участками экспериментально исследованной природы.

[Источники к главе 17](#)

18. 2000. Квантовая информация на повторяющемся узоре

2000 — препринт; 2001 — публикация. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Microsoft, Калифорнийский университет в Беркли и Калифорнийский технологический институт, США. Дэниел Готтесман, Алексей Китаев, Джон Прескилл.

Обычное цифровое устройство может выдерживать небольшие колебания напряжения, потому что различает условные ноль и единицу. Не каждое физическое отклонение меняет записанный бит. С квантовой информацией сложнее. Кубит — квантовый аналог бита — может находиться в суперпозиции состояний 0 и 1. Это их квантовое сочетание, которое при измерении даёт один из двух исходов. Сохранить нужно само сочетание, а не только возможность различить ноль и единицу. Прямое измерение, которое «уточнит, что записано», способно разрушить именно то, что требовалось сберечь.

Квантовое исправление ошибок решает парадоксальную на первый взгляд задачу: узнать о повреждении, не узнавая лишнего о самой информации. Для этого состояние кодируют избыточно, а затем измеряют специальные признаки ошибки. Эти признаки должны отличать допустимое состоя-

ние от сдвинутого или испорченного, не превращаясь в чтение логического нуля или единицы.

В 2000 году Дэниел Готтесман, Алексей Китаев и Джон Прескилл представили способ кодирования, впоследствии названный GKP по их фамилиям. Статья вышла в 2001-м. Китаев — уроженец РСФСР, СССР; в этой работе его аффилиацией была Microsoft. Готтесман представлял Microsoft и Беркли, Прескилл — Калифорнийский технологический институт (Caltech). Все три учреждения находились в США.

Идея состояла в том, чтобы разместить конечномерную квантовую информацию, например один кубит, внутри системы с непрерывными переменными. Примером служит квантовый осциллятор. Классический осциллятор можно представить как колеблющийся груз; в квантовой версии координату и импульс нельзя одновременно задать с произвольно высокой точностью.

На первый взгляд, непрерывность должна ухудшить ситуацию. Если допустимо бесконечно много значений, малое отклонение может возникнуть в любой точке. Авторы использовали повторяющуюся структуру кодовых состояний в фазовом пространстве — пространстве координаты и импульса. Небольшие сдвиги такого узора можно обнаруживать и компенсировать.

Представим линейку с повторяющимися делениями. Если весь рисунок чуть сдвинулся, можно определить смещение относительно сетки, не сообщая номер каждого деления.

Эта аналогия передаёт лишь принцип различения смещения и содержимого. В GKP-коде повторяющийся узор устроен и по координате, и по импульсу. Измерения показывают небольшое смещение относительно сетки, но не абсолютное значение каждой величины. Благодаря этому можно обнаружить ошибку, не нарушив запрет на их одновременное точное определение. Обычная нарисованная линейка такой задачи не решает.

Нужные измерения устроены так, чтобы извлекать информацию о сдвиговой ошибке. После них корректирующая операция возвращает систему к допустимой области. Если ошибка слишком велика, её можно перепутать с другим допустимым смещением, и восстановление даст неправильный логический результат. Поэтому защита имеет область работы и не отменяет необходимость контролировать шум.

Идеальные кодовые состояния математически удобны, но требуют недостижимых ресурсов. Их распределение по координате состоит из бесконечно узких пиков. В физическом устройстве пики имеют ненулевую ширину, а доступная энергия конечна. Поэтому подготовленное состояние лишь приближается к математической схеме. Авторы учитывали этот переход, а позднейшие исследования разрабатывали способы подготовки и использования реалистичных вариантов.

Здесь хорошо видна разница между носителем и записанной на нём информацией. Система может иметь непре-

рывные переменные, а защищаемая информация — принадлежать конечномерному кодовому пространству. Такое разделение позволяет использовать богатый набор физических состояний для защиты от шума.

Работа не обещала, что один осциллятор станет безошибочным при любых воздействиях. Схема защищает от определённых классов ошибок и может сочетаться с другими способами кодирования. Требования к приготовлению состояний, измерениям и управлению остаются частью задачи.

GKP-код предложил новый способ хранить квантовую информацию в состояниях одного осциллятора. Защиту можно строить не только между многими отдельными двухуровневыми системами, но и внутри специально организованного пространства состояний одного непрерывного носителя. Повторяемость, обычно ассоциирующаяся с простой цифровой разметкой, получила строго квантовое применение.

[Источники к главе 18](#)

19. 2001. Алгебра, которая умеет менять переменные

2001 — препринт; 2002 — публикация. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Мичиганский и Северо-Восточный университеты, США. Сергей Фомин и Андрей Зелевинский.

Вычисление может становиться сложнее с каждым действием, а затем неожиданно упроститься. Из длинной дроби исчезает почти всё, и остаётся короткое выражение. Для школьной задачи это приятный конец. Для исследователя — начало: почему сокращение произошло и можно ли заранее понять, когда оно повторится?

Возьмём две положительные величины, обозначенные буквами a и b . Будем строить последовательность по правилу: к последнему выражению прибавить единицу и разделить на предпоследнее. За a и b получится $(1 + b)/a$. Следующее выражение уже выглядит громоздко: $(a + b + 1)/(ab)$. Если продолжить и выполнить сокращения, возникнет $(a + 1)/b$, а затем снова a и b . Сложность выросла, но не бесконтрольно: нас вернула к началу скрытая структура правила.

Этот пример не является всей теорией кластерных алгебр. Он лишь даёт почувствовать её предмет: как устроены семейства выражений, получаемых последовательной заменой

переменных по строгим законам. Вместо одного удобного набора координат исследователь получает множество наборов и переходы между ними.

Сергей Фомин и Андрей Зелевинский ввели кластерные алгебры в работе, представленной в 2001 году и опубликованной в 2002-м. Фомин родился в Ленинграде, Зелевинский — в Москве; оба города находились в РСФСР, СССР. В момент этой работы они представляли американские университеты: Мичиганский и Северо-Восточный. Исходная задача была математической — найти общую структуру за связями, возникавшими, в частности, в теории представлений и вопросах полной положительности.

Кластер — это набор переменных; в нашем простом примере исходный набор состоит из a и b . Самого набора недостаточно: нужны ещё данные, определяющие правила его изменения. Вместе они образуют «семья» конструкции. Одну переменную заменяют новой по обменному соотношению — подобно тому, как в примере вместо a появляется $(1 + b)/a$. Такой переход вместе с изменением сопутствующих данных называют мутацией.

Правило замены локально: мы меняем одну часть набора. Но после многих замен разворачивается большая сеть связанных описаний. Вопрос в том, сохраняет ли она что-нибудь общее. Для возникающих переменных действует свойство Лорана: их можно выразить через исходный набор так, что знаменатель будет произведением степеней исходных пе-

ременных. Произвольные сложные многочлены в знаменателях в результате сокращаются.

Почему это нетривиально? При многократном делении на выражения легко ожидать всё более запутанные знаменатели. Если одна новая переменная сама является дробью, следующее действие переносит её числитель вниз, после чего трудности должны накапливаться. Теорема показывает, что правила системы обеспечивают согласованные сокращения. Сокращения из простого примера получают общую причину. А возвращение к исходным a и b — отдельная особенность этого примера: далеко не всякая цепочка мутаций возвращается к началу.

Такие гарантии важны ещё до любого приложения. Они сообщают, с какими объектами исследователь действительно имеет дело, какие особенности возможны и где искать закономерность.

Можно сравнить это с несколькими картами одной местности. Каждая удобна для своей задачи, но переход между картами должен быть определён. Аналогия ограничена: кластерные переменные здесь не являются координатами на местности, а вся конструкция может описывать совершенно абстрактные объекты. Общая мысль в том, что полезно знать не только отдельное представление, но и закон смены представлений.

Последующая жизнь кластерных алгебр показала связи с геометрией, комбинаторикой и математической физикой.

Основополагающая работа не содержала заранее всех этих применений. Она дала систему понятий, в которой разные вопросы стало возможно узнавать как родственников. Множество отдельных удачных формул впервые получило общий адрес.

[Источники к главе 19](#)

20. 2001. Порог, на котором исчезает характерный масштаб

2001 — критическая перколяция; 2007–2010 — развитие для модели Изинга. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. КТН, Стокгольм, Швеция; Женевский университет, Швейцария. Станислав Смирнов.

Пористый материал может содержать множество пустот и всё же не пропускать жидкость насквозь. Важно не только количество отверстий, но и то, соединены ли они. Несколько новых связей иногда почти ничего не меняют, а иногда создают путь от одной стороны образца до другой. Возникает порог: локальные изменения приводят к новому свойству целого.

Математическая модель такого перехода называется перколяцией. В простом варианте берут решётку и случайно объявляют её узлы открытыми или закрытыми. Затем спрашивают, образуется ли связный путь. Это не точная копия породы: из модели убраны форма реальных пор, химия поверхности и движение жидкости. Модель сохраняет другой вопрос — как из случайных местных связей возникает большая сеть.

Особенно интересна критическая точка, граница между режимами. Далеко от неё характерный размер связных об-

ластей помогает описывать систему. На пороге появляются структуры разных масштабов. При увеличении изображения можно снова встретить сложные границы и ответвления. Физики давно ожидали, что в двумерном случае за этим стоит особая симметрия.

Речь о конформной инвариантности. Конформное преобразование может сильно менять размеры и общую форму области, сохраняя локальные углы. Простейший пример — увеличить рисунок вдвое: длины изменятся, углы между пересекающимися линиями сохранятся. В более общем случае увеличение бывает разным в разных местах, но в каждой достаточно малой окрестности остаётся одинаковым по направлениям. В перколяции можно спросить, с какой вероятностью открытые узлы образуют путь от одного отмеченного участка границы до другого. Это называют вероятностью пересечения — в смысле перехода через область. Конформная инвариантность означает, что в непрерывном пределе эта вероятность не изменится, если область и отмеченные участки её границы преобразовать вместе.

Наглядность, однако, не является доказательством. Решётка состоит из отдельных узлов, тогда как конформное преобразование действует на непрерывную плоскость. Нужно строго пройти от одного описания к другому, уменьшая шаг решётки, и убедиться, что предел существует и обладает обещанными свойствами. Именно этот переход долго отделял убедительную физическую картину от математической

теоремы.

В 2001 году Станислав Смирнов доказал ключевой результат для критической перколяции на треугольной решётке, включая конформную инвариантность вероятностей пересечения в соответствующем пределе. Смирнов родился в Ленинграде в 1970 году, в РСФСР, СССР. Первую работу он выполнил в Королевском технологическом институте КТН в Стокгольме. Позднейшее развитие связано с Женевским университетом.

Смирнов искал специальные наблюдаемые — математические величины, определяемые по случайным конфигурациям. При правильном выборе они удовлетворяют дискретным аналогам строгих соотношений комплексного анализа. Комплексный анализ изучает функции комплексного переменного; именно такие функции позволяют описывать конформные преобразования. Его соотношения связывают изменения величины в разных направлениях и потому гораздо сильнее простого требования плавности. Случайная сетка начинает подчиняться строгим аналитическим ограничениям. Это даёт контроль над переходом к непрерывному пределу.

Дальнейшая линия работы затронула критическую модель Изинга. В каждом узле находится спин с одним из двух состояний. Его можно условно представить маленьким магнитом, направленным вверх или вниз; соседние спины взаимодействуют. Так изучают коллективное упорядочение и

его разрушение. Смирнов построил дискретные наблюдаемые с нужными свойствами и доказал, что в непрерывном пределе при конформной смене геометрии их значения меняются по точно определённом правилу, учитывающему местное растяжение; это свойство называют конформной ковариантностью. Такие инструменты служат исследованию границ между областями разных состояний. В совместной работе с Дмитрием Челкаком, представленной в 2009 году и опубликованной в журнале в 2012-м, исследование критической модели Изинга было распространено на широкий класс изорадиальных решёток: каждую их ячейку можно вписать в окружность одного и того же радиуса. Доказательства конформной инвариантности перколяции и плоской модели Изинга принесли Смирнову Филдсовскую медаль 2010 года.

Перколяция и модель Изинга различаются: в первой простой версии узлы выбираются независимо, во второй взаимодействие связывает их вероятности. Поэтому результат для одной модели нельзя автоматически объявить решением другой. Но обе истории раскрывают один большой вопрос: как возникает точная симметрия у случайной системы на критическом пороге.

Из этих теорем не получается готовая формула для любого пласта, магнита или коммуникационной сети. Реальные системы могут иметь другую размерность и другие взаимодействия. Зато становится ясно, почему математиче-

ская идеализация бывает плодотворной. Она позволяет отделить принципиальный механизм коллективного поведения от множества деталей — и затем строго доказать то, что на изображении выглядело лишь удивительным сходством.

[Источники к главе 20](#)

21. 2001. Собрать геном по дорогам графа

2001. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Калифорнийский университет в Сан-Диего и Университет Южной Калифорнии, США. Павел Певзнер, Хайсуй Тан, Майкл Уотерман.

Прибор прочитал миллионы фрагментов ДНК. Но длинная исходная последовательность всё ещё неизвестна: фрагменты короткие, их порядок потерян, многие участки похожи друг на друга. Это немного напоминает восстановление книги по обрывкам, только алфавит состоит из четырёх основных букв, а целые фразы могут повторяться почти дословно.

Прямой путь — сравнивать фрагменты попарно, находить перекрытия и искать подходящую цепочку. Однако число сочетаний быстро растёт. Повторы создают неоднозначности, а ошибки чтения добавляют ложные различия. Алгоритму требуется представление задачи, которое сделает её структурой более управляемой.

В 2001 году Павел Певзнер, Хайсуй Тан и Майкл Уотерман предложили влиятельный подход к сборке через эйлеровы пути в графе. Певзнер родился в Курске, в РСФСР, СССР. Работа выполнена в США, при участии Калифорний-

ского университета в Сан-Диего и Университета Южной Калифорнии. В задачу молекулярной биологии вошли инструменты теории графов.

Граф — набор вершин и соединяющих их рёбер. Вершинами могут быть города, а рёбрами — дороги, но эта картинка лишь помогает начать. В задаче ДНК вершины и связи кодируют отношения коротких последовательностей. После такого перевода исследователь работает не с огромной россыпью обрывков, а с сетью допустимых соседств.

Один вариант построения использует короткие слова фиксированной длины, встречающиеся в прочитанных фрагментах. У каждого слова есть начало и конец, которые на один символ короче. Они становятся вершинами, а само слово — направленной связью между ними. Последовательное прохождение связей восстанавливает более длинную запись, поскольку соседние слова перекрываются.

Например, слова АГТ и ГТА могут следовать одно за другим: конец первого, ГТ, совпадает с началом второго. Их соединение даёт АГТА. В этом маленьком примере ответ виден сразу. В большом графе тот же принцип позволяет организовать огромное количество локальных совпадений единым способом.

Эйлеров путь проходит по каждому ребру графа ровно один раз. Если в построенном графе существует эйлеров путь, его можно найти за время, пропорциональное числу рёбер и вершин. Для похожей задачи — обойти каждую вер-

шину ровно один раз — общего быстрого способа неизвестно. Именно такая трудность возникает в одной из прежних постановок сборки, где вершинами служат целые прочитанные фрагменты. Переход к коротким словам и обходу рёбер меняет математическую задачу. Работа Певзнера и коллег показала силу такого переописания для биологических последовательностей.

Превращение реальных чтений ДНК в подходящий граф требует отдельной работы. Если один участок многократно повторён, соответствующие пути могут сливаться. Если чтение содержит ошибку, появляются ложные ответвления. Если каких-то фрагментов не хватает, граф распадается. Поэтому нужны исправление ошибок, учёт кратности и дополнительные сведения, позволяющие распутывать неоднозначности.

Эти ограничения принципиальны. Иногда сами данные не содержат информации, достаточной для единственного ответа. Никакая скорость процессора не восстановит достоверно то, чего измерения не различили. Хороший алгоритм должен учитывать эту границу, а не маскировать её внешне гладкой последовательностью.

Переход к графу помогает понять и происхождение трудностей. Разрыв, ветвление и повтор становятся различимыми структурными проблемами. Вместо бесформенного сообщения «сборка не удалась» появляется возможность исследовать, какие связи спорны и какие новые данные помо-

гут выбрать путь.

Достижение 2001 года относится к вычислительной стороне биологии, без которой большие геномные исследования были бы невозможны в привычном масштабе. Секвенатор производит данные, но смысл длинной последовательности ещё надо восстановить. Здесь математический способ организовать связи оказался столь же существенным, как точность самого чтения: обрывки ДНК стали дорогами, по которым можно искать исходный текст.

[Источники к главе 21](#)

22. 2001. Квантовая связь с остановками для памяти

2001. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Инсбрукский университет, Австрия; Научно-технический университет Китая, Хэфэй; Гарвардско-Смитсоновский центр астрофизики, США. Лу-Мин Дуань, Михаил Лукин, Игнасио Сирак, Петер Цоллер.

Чем длиннее оптическая линия, тем меньше света доходит до конца. В обычной связи ослабевший сигнал можно распознать, восстановить и отправить дальше. Но если сообщение заключено в неизвестном квантовом состоянии, такая операция не годится. Квантовая механика запрещает универсальное точное копирование неизвестного состояния. Измерение тоже может уничтожить часть информации, которую предполагалось передать.

Проблема особенно остра, когда требуется связать удалённые устройства запутанностью. Их тогда приходится описывать общим квантовым состоянием: независимого описания каждой части недостаточно. В подходящих измерениях результаты по отдельности случайны, но между ними обнаруживаются особые квантовые связи. Если просто отправлять фотоны на всё расстояние, потери быстро сделают успешные события редкими. Сократить расстояние между

отправителем и получателем нельзя. Зато можно изменить устройство самой линии.

В 2001 году Лу-Мин Дуань, Михаил Лукин, Игнасио Сирак и Петер Цоллер предложили схему квантового повторителя с атомными ансамблями. По первым буквам их фамилий её называют DLCZ. Дуань представлял Инсбрук и университет в Хэфэе, Сирак и Цоллер — Инсбрук, Лукин — Гарвардско-Смитсоновский центр астрофизики. Лукин родился в 1971 году в РСФСР, СССР.

Общая идея повторителя — сначала создать запутанность на коротких отрезках, сохранить удачные результаты, а затем соединить отрезки. Здесь память столь же важна, как передача. Если один участок готов раньше другого, первый должен дожидаться второго. Без хранения пришлось бы требовать одновременного успеха множества редких событий.

В DLCZ роль памяти выполняет коллективное возбуждение атомов. Важен не один заранее выбранный атом, а согласованное состояние ансамбля. Слабое воздействие лазера с небольшой вероятностью создаёт возбуждение вместе с испущенным фотоном. Свет от двух удалённых ансамблей направляют на общую оптическую схему. Правильно устроенная регистрация фотона сообщает об успешном шаге, не раскрывая, из какого ансамбля он пришёл. При сохранении квантовой согласованности двух путей после такого сигнала остаётся суперпозиция двух возможностей: «возбуждение в первой памяти» и «возбуждение во второй». Указывать од-

ну из памяти как единственное место возбуждения было бы неверно. Это и есть запутанное состояние, которое затем сохраняют. Одного незнания, откуда пришёл фотон, недостаточно: оптическая схема должна физически исключить различимость двух путей.

Такое измерение иногда называют «возвещающим»: оно даёт сигнал, что можно переходить к следующей операции. Случайность не исчезает, но становится управляемой. Неудачный шаг повторяют, удачный сохраняют. Затем возбуждения промежуточных памяти преобразуют в свет и измеряют так, чтобы запутанность связала более далёкие концы цепочки.

Полезно отличать это соединение от пересылки готового сообщения. Сначала создаётся физический ресурс — совместное квантовое состояние. Для последующего обмена информацией нужны дополнительные операции и обычная связь между участниками. Поэтому квантовая запутанность не позволяет отправить осмысленное сообщение быстрее света.

Работа была теоретическим проектом. Она показала путь к дальней связи с относительно доступными элементами: атомными ансамблями, линейной оптикой и регистрацией фотонов. Но каждый из этих элементов имеет ограничения. Память забывает состояние, свет теряется, детекторы пропускают события, иногда возникает больше одного возбуждения.

Последующий анализ Мохсена Разави и Джеффри Шапи-ро подробно показал, что такие недостатки влияют и на скорость, и на качество передачи. Особенно существенно, различает ли детектор один фотон и несколько. Нельзя заменить описание прибора единственным словом «квантовый» и считать точность обеспеченной.

Проектировать такую линию приходится с часами в руках: как долго готовится соседний участок и сколько ещё проживёт сохранённое состояние? Дальность связи становится задачей согласования этих времён с потерями света и точностью измерений.

[Источники к главе 22](#)

23. 2001. Электрический след одного фотона

2001. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Москва, Россия; Рочестер, США. Григорий Гольцман и коллектив Московского педагогического государственного университета, Роман Соболевский и коллеги из Рочестерского университета.

При хорошем освещении нас интересует яркость: достаточно ли света для чтения или фотографии. Когда света очень мало, вопрос меняется. Иногда важно узнать, пришёл ли вообще один фотон, и установить момент его прихода. Для этого нужен прибор, в котором поглощение чрезвычайно малой порции световой энергии запускает надёжно различимый электрический сигнал.

В 2001 году группа Григория Гольцмана вместе с американскими коллегами продемонстрировала быстрый однофотонный детектор на очень тонкой полоске нитрида ниобия, охлаждённой до сверхпроводящего состояния. Поглощённый фотон на короткое время нарушал это состояние, и возникал импульс напряжения. Работа стала одной из исходных для направления сверхпроводниковых нанопроволочных детекторов, известного под сокращением SNSPD.

Сверхпроводимость — коллективное состояние веще-

ства, при котором постоянный электрический ток может течь без электрического сопротивления. Она существует при определённых температуре, магнитном поле и величине тока. За допустимыми пределами этих величин материал перестаёт быть сверхпроводящим. Детектор использует близость к такой границе как источник чувствительности.

Через узкую охлаждённую полосу пропускают ток, меньший критического. Фотон поглощается и передаёт энергию электронной системе. На малом участке сверхпроводимость ослабляется. В простом описании этого процесса ток обходит ослабленную область по оставшейся сверхпроводящей части полосы. Там его плотность возрастает и может превысить критическую. Тогда участок с сопротивлением перекрывает полосу поперёк. Теперь ток сопровождается напряжением, и электроника замечает импульс.

Поглощённый фотон меняет состояние чувствительного элемента, а энергию измеримого электрического сигнала в основном обеспечивает заранее запитанная цепь. Похожий общий принцип встречается во многих измерениях: крошечное воздействие управляет процессом, для которого энергия подготовлена заранее.

После отвода лишнего тепла полоска возвращается в исходное состояние. Но скорость отдельного микроскопического процесса и скорость работы всего прибора — разные характеристики. Важны также индуктивность полосы, схема считывания и время восстановления тока. Очень корот-

кое время отклика из ранней статьи ещё не означает, что весь детектор успевает с такой же быстротой подготовиться к следующему фотону.

Качество счётчика определяется сразу несколькими величинами. Эффективность показывает, какую долю пришедших фотонов он замечает. Темновой счёт описывает ложные срабатывания, возникающие без полезного света. Временной разброс показывает, насколько точно можно связать электрический импульс с приходом фотона. Прибор с высокой эффективностью, но большим шумом может оказаться бесполезным в задаче, где сигнал приходит крайне редко.

Здесь становится понятной связь с квантовой коммуникацией. Если информация передаётся состояниями слабых световых импульсов, потери в линии оставляют получателю мало событий. Дополнительный шум нельзя просто вычестить из каждого отдельного измерения: он создаёт ошибки в самой последовательности зарегистрированных событий. Поэтому улучшение детектора способно изменить возможности всей системы, даже если источник света и кабель остаются прежними.

Тонкая сверхпроводящая структура открыла продуктивный путь к таким измерениям. Последующие исследователи совершенствовали материалы, форму проводников, оптическое сопряжение и охлаждение. Образец 2001 года экспериментально показал сам принцип быстрого счёта отдельных фотонов. Цена чувствительности была и остаётся вполне ма-

териальной: рабочий элемент требует криогенной температуры. Но именно управляемый холод позволил регистрировать приход единичной частицы света по событию в электрической цепи.

[Источники к главе 23](#)

24. 2002. Как посчитать то, чего не видит приближение

2002. Рубрика: Уроженцы России и СССР в мировой науке. Институт высших научных исследований IHÉS, Франция; сохранённая связь с ИТЭФ, Москва, Россия. Никита Некрасов.

Один из самых успешных приёмов физики — разложить трудную задачу на простой ответ и последовательные поправки. Если взаимодействие слабо, первые поправки могут дать замечательную точность. Но существуют вклады, которые такое разложение не обнаруживает ни на одном конечном шаге. Они не обязаны быть большими, чтобы принципиально менять устройство теории.

Математический пример помогает увидеть препятствие. Функция $\exp(-1/g^2)$ при малом положительном g стремительно приближается к нулю. Если доопределить её в нуле значением ноль, все производные там окажутся нулевыми. Тогда и все коэффициенты её степенного ряда, которые вычисляют по этим производным, равны нулю. Ненулевые значения рядом с нулём такой степенной ряд не восстановит. Этот пример не является формулой результата Некрасова; он показывает, почему «посчитать ещё одну поправку» не всегда достаточно.

В квантовой теории поля один из источников подобных вкладов связан с инстантонами. Это особые конфигурации поля, которые появляются в математическом описании процессов после перехода к так называемому евклидову времени. Такой переход — математическая замена временной координаты мнимой величиной; он меняет вид уравнений и делает некоторые расчёты доступнее. Учёт инстантонов позволяет описывать явления, не сводимые к малым колебаниям вокруг одного простого состояния.

В 2002 году Никита Некрасов представил метод прямого вычисления инстантонных вкладов в определённых суперсимметричных калибровочных теориях. Он работал во французском IHÉS. В статье он указал и московский Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), откуда был в отпуске, и поддержку российских грантов. Некрасов родился в Москве в 1973 году, в РСФСР, СССР. Здесь международное место работы сочеталось с продолжающейся российской научной связью.

Суперсимметрия в этой задаче — свойство математической модели, связывающее разные типы частиц. Она даёт сильные ограничения и помогает удерживать вычисления под контролем. Такие модели полезны как точно исследуемая область квантовой теории. Их специальные симметрии нельзя автоматически приписывать всем реально наблюдаемым частицам.

Чтобы учесть инстантоны, требуется суммировать вкла-

ды множества конфигураций. Они различаются не только количеством инстантонов, но и непрерывными параметрами. Некрасов использовал симметрии и специально организованную деформацию задачи с двумя параметрами. Метод локализации позволял свести трудные интегралы к сумме вкладов выделенных конфигураций, которые удобно описывать комбинаторными данными — наборами диаграмм Юнга, составленных из рядов клеточек.

Локализация здесь не означает пространственного сжатия вещества. Смысл в том, что симметрия позволяет сосредоточить вычисление на определённых частях математического пространства всех конфигураций. Это можно сравнить с суммой, в которой большинство слагаемых взаимно сокращается, а результат определяется оставшимися особыми членами. Однако в реальном доказательстве нужно точно показать, почему остальные вклады учтены или сокращаются.

Полученная статистическая сумма, собирающая с определёнными весами вклады рассматриваемых инстантонных конфигураций, стала известна как функция Некрасова. В подходящем пределе она связана с препотенциалом Зайберга—Виттена — функцией, содержащей важную информацию о низкоэнергетическом поведении теории. Зайберг и Виттен получили препотенциал в 1994 году другим путём. Некрасов предложил восстановить тот же ответ прямым подсчётом инстантонных вкладов.

У исходной работы, её проверок и дальнейших доказательств разные роли. Некрасов дал вычислительную конструкцию, согласующуюся с известными результатами. В 2003 году Хираку Накадзима и Кота Ёсиока, а также Некрасов вместе с Андреем Окуньковым представили разные доказательства того, что в рассматриваемых ими теориях нужный предел инстантного подсчёта действительно даёт препотенциал Зайберга—Виттена. В 2004-м Александр Браверман и Павел Этингоф представили другой подход, охватывающий произвольную простую группу. Эта последовательность показывает, как физическая конструкция превращается в предмет самостоятельных теорем.

Метод Некрасова открыл точно контролируемый путь к эффектам, которые не видит обычное приближение по слабому взаимодействию. Сложная квантовая задача оказалась связана с геометрией пространств конфигураций и с комбинаторикой. Эта связь позволяет проверять расчётные методы там, где общий расчёт прежде казался недоступным.

[Источники к главе 24](#)

25. 2002. Нейтрон над зеркалом

2002. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Гренобль, Франция. Валерий Несвижевский и сотрудники Института Лауэ—Ланжевена, ПИЯФ, ОИЯИ и Гейдельбергского университета.

Мяч, брошенный вверх, поднимается тем выше, чем больше сообщённая ему скорость. В обычной механике можно подобрать почти любую высоту. Для очень медленного нейтрона над горизонтальным зеркалом ответ другой: его вертикальное движение описывается определёнными квантовыми состояниями. Между разрешёнными энергиями существуют промежутки.

В 2002 году Валерий Несвижевский и международный коллектив сообщили об экспериментальных свидетельствах таких состояний в земном поле тяжести. Опыт выполнили в Институте Лауэ—Ланжевена в Гренобле. Среди участников были специалисты Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ) и международного ОИЯИ в Дубне. Работа соединила два привычно далёких сюжета: квантовую механику отдельных частиц и повседневную силу земного притяжения.

Само существование дискретных энергий не было новым. В атомах электроны занимают определённые состояния, и переходы между ними дают спектральные линии. Но там удержание связано с электромагнитным взаимодействием. В

опыте с нейтронами решающим для вертикального движения стало поле тяжести в сочетании с отражающей поверхностью.

Нейтрон электрически нейтрален. Это помогает уменьшить влияние электрических сил, которые могли бы заслонить слабое гравитационное действие. Однако нейтрон не становится совершенно нечувствительным к веществу: при достаточно малой энергии он способен отражаться от подходящей поверхности. Поэтому горизонтальное зеркало создаёт нижнюю границу, а земная гравитация препятствует свободному уходу вверх.

В квантовой механике частицу описывает волновая функция. Для неё одновременно должны выполняться уравнение движения и условия на границах. Не всякая зависимость от высоты подходит. Согласовать все требования удаётся лишь для определённых энергий. Это общий источник квантования: допустимое состояние определяется устройством всей задачи, а не произвольным выбором скорости в одной точке.

Исследователи пропускали ультрахолодные нейтроны через узкий зазор между нижним зеркалом и верхним поглощающим элементом. Слово «ультрахолодный» означает здесь очень малую кинетическую энергию частиц. Изменяя высоту зазора, можно было выяснить, при каких условиях нейтроны проходят к счётчику. У каждого состояния есть характерный вертикальный масштаб. При уменьшении зазора ниже масштаба самого низкого состояния нейтрон часто

взаимодействует с поглотителем, и пропускание резко подавляется. Однако характерная высота не служит жёстким потолком: выше неё вероятность обнаружить нейтрон убывает постепенно, а потери меняются непрерывно.

Смысл измерения состоял не в съёмке нейтрона, замершего на определённой высоте. Квантовое состояние имеет пространственное распределение вероятности. У него нет единственной траектории, похожей на многократные отскоки теннисного мяча. Детектор измерял число прошедших частиц, а исследователи сопоставляли зависимость этого числа от зазора с предсказаниями квантового описания.

Трудность в том, что нужная энергия очень мала. Любая непредусмотренная шероховатость, вибрация или взаимодействие с поверхностью может изменить движение нейтрона. Поэтому убедительность требует понимания не только уравнения, но и реального прибора. Характерные изменения пропускания должны объясняться его геометрией и квантовыми состояниями, а не произвольно выбранной поправкой к шуму.

Полученный результат расширил набор систем, в которых квантовую механику можно проверять непосредственно. Он также открыл направление точных исследований взаимодействия нейтронов с поверхностями и поиска очень слабых дополнительных воздействий. Новая сила, если бы она заметно действовала на выбранных расстояниях, могла бы сдвинуть энергии состояний.

Есть принципиальная граница вывода: квантованным оказалось движение нейтрона в практически классическом гравитационном поле Земли. Опыт не обнаружил гравитон и не построил квантовую теорию гравитации. Зато он показал, что даже привычное земное притяжение, если подготовить достаточно медленную частицу и подходящие границы, участвует в создании состояний, которые обычной механике уже недоступны.

[Источники к главе 25](#)

26. 2002. Увидеть марсианский водород под пылью

2002. Рубрика: Международные исследования с российским участием. Орбита Марса, аппарат NASA Mars Odyssey. Игорь Митрофанов и коллектив российского прибора HEND, Институт космических исследований РАН (ИКИ), ОИЯИ и американские партнёры.

Оптический снимок Марса показывает видимую поверхность, но не даёт полной картины запасов водорода под ней. Для такого исследования российский прибор HEND на американском аппарате Mars Odyssey измерял нейтроны, покидающие грунт. Их распределение по энергиям несло сведения о подповерхностном веществе.

В 2002 году Игорь Митрофанов и его коллеги опубликовали карты, показавшие дефицит высокоэнергичных нейтронов в приполярных частях северных низменностей и южных возвышенностей Марса. Этот дефицит указывал на значительные концентрации подповерхностного водорода. Модели со слоем, богатым водяным льдом, позволяли объяснить наблюдения.

Источником своеобразной подсветки служат космические лучи. Быстрые частицы попадают в грунт и вызывают ядерные взаимодействия, в результате которых возникают вто-

ричные нейтроны. Часть из них движется наружу, пережив столкновения с атомными ядрами. Состав грунта меняет их количество и распределение по энергиям.

Водород особенно заметно влияет на замедление нейтронов. Его ядро — протон — имеет близкую к нейтрону массу. При столкновении двух частиц сопоставимой массы возможна эффективная передача энергии. Это похоже на лобовой удар бильярдного шара по такому же неподвижному шару: первый может почти остановиться, передав второму своё движение. Поэтому даже без прямого наблюдения молекул воды присутствие водорода меняет нейтронный сигнал. Прибор измеряет следствие взаимодействий и по нему восстанавливает свойства вещества.

Такое измерение называют дистанционным зондированием. Оно отличается от обычной фотографии не только диапазоном излучения, но и логикой вывода. Камера показывает отражённый свет, а здесь исследователь сравнивает наблюдаемый поток с расчётом прохождения частиц через разные варианты грунта. Результат зависит от того, какие состав, плотность и распределение вещества по глубине включены в модель.

HEND, High Energy Neutron Detector, был российским вкладом в комплекс приборов Mars Odyssey. Международная миссия использовала также другие измерения для исследования состава поверхности и подповерхностных слоёв. HEND измерял свою часть нейтронного спектра.

Нейтронные данные особенно ценны там, где сверху лежит сравнительно сухой материал. Он может скрывать лёд от оптической камеры, но взаимодействие космических частиц с более глубоким веществом оставляет измеримый след. Планета, кажущаяся сухой на снимке, получает дополнительное измерение — распределение водородсодержащего материала под наружным слоем.

По нейтронам прибор обнаруживает водород, а не воду как таковую. Водород может входить в разные соединения. Чтобы сделать вывод о льде, нужны не только нейтронный дефицит, но и физически правдоподобная модель местных условий. Температура, широта, свойства грунта и другие наблюдения помогают выбрать между вариантами.

Эта граница важна для оценки результата. Работа не показала жидкое озеро под поверхностью и не обнаружила жизнь. Она предоставила карту и количественные ограничения, без которых разговор о распределении марсианской воды остался бы гораздо менее определённым. Поиск мест для подробного исследования получил физическую основу. В 2008 году аппарат NASA Phoenix непосредственно подтвердил наличие водяного льда под грунтом в районе своей посадки в северной приполярной области Марса. Это была независимая проверка в одном месте на поверхности; подтвердить карту всей планеты она не могла.

Водородные карты помогают обсуждать историю климата Марса, обмен вещества между поверхностью и атмосферой

и условия сохранения льда. Практические идеи использования воды будущими экспедициями требуют ещё множества измерений, включая глубину, форму и доступность запасов. Но первый шаг уже сделан: российский прибор помог пре-
вратить скрытый под пылью состав в наблюдаемую характе-
ристику планеты. Для этого понадобилось смотреть не на то,
что грунт отражает, а на то, как он изменяет проходящие че-
рез него частицы.

[Источники к главе 26](#)

27. 2002. Как узнать форму пространства

2002–2003. Рубрика: Результаты в России. Санкт-Петербург, Россия. Григорий Перельман.

На поверхности мяча можно нарисовать замкнутую линию и, постепенно стягивая её, превратить в точку. Линию разрешено двигать по поверхности, но нельзя разрывать или проводить сквозь мяч. На поверхности бублика так получится не со всякой петлёй: та, которая охватывает его отверстие, зацепится за устройство самой поверхности. Как бы мы ни растягивали бублик, не разрезая и не склеивая его, препятствие останется.

Это простой вход в топологию — раздел математики, который изучает свойства, сохраняющиеся при непрерывной деформации. Топологу в определённой задаче может быть безразлична точная длина окружности, зато существование отверстия меняет всё. Мягкий мяч можно сплющить и вытянуть. Его поверхность будет выглядеть иначе, но топологически останется сферой.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.