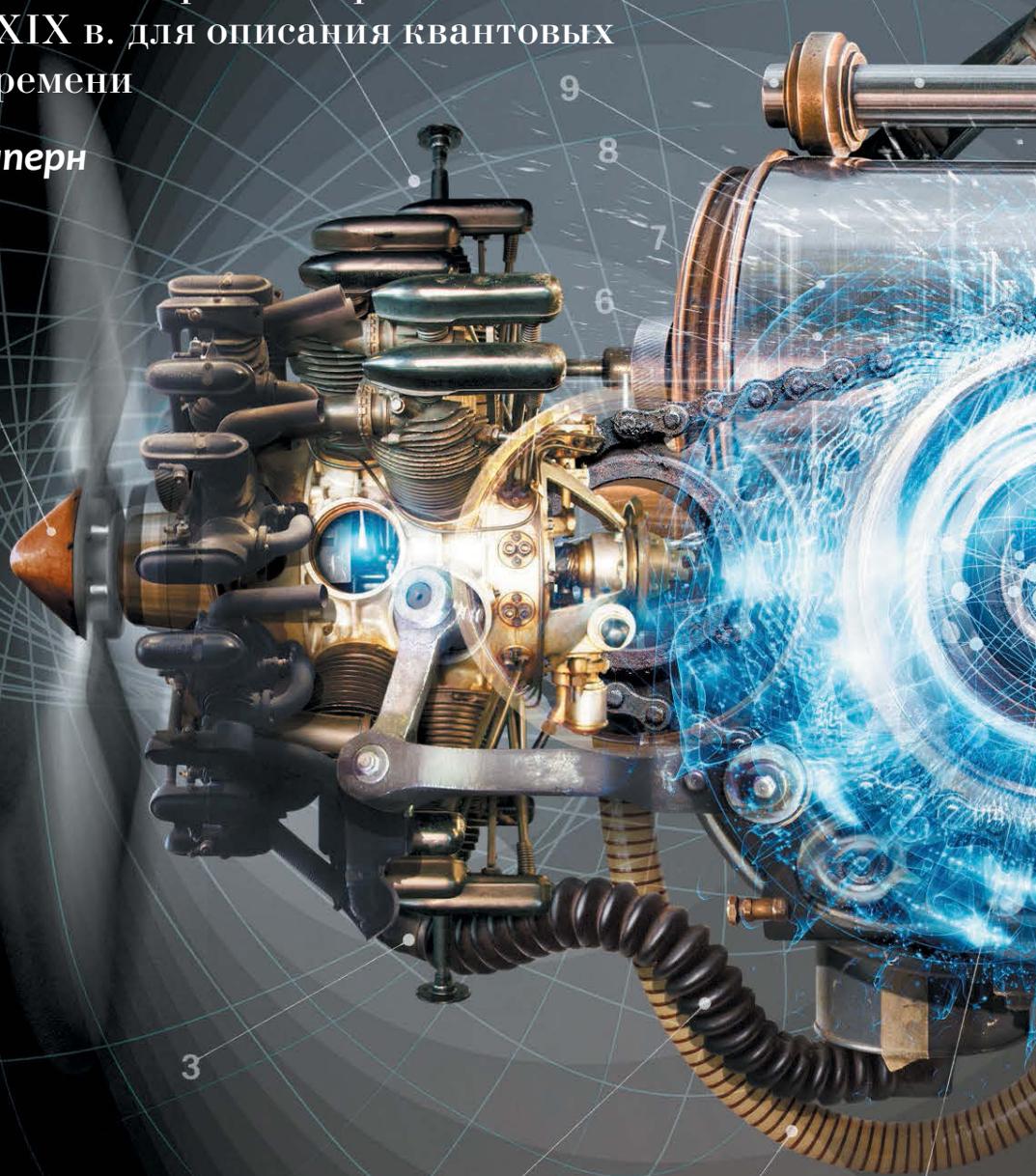


Квантовый ст

Подобно тому как в жанре стимпанка стиль викторианской эпохи переплетается с современной техникой, новая область физики приспосабливает термодинамику XIX в. для описания квантовых систем нашего времени

Николь Юнгер Халперн



ИМПАНК



19

17

8

14

13

21

26

11

15

10

16

ОБ АВТОРЕ

Николь Юнгер Халперн (Nicole Yunger Halpern) — физик-теоретик, научный сотрудник Института теоретической, атомной, молекулярной и оптической физики Гарвардского университета. Ежемесячно публикует статьи в блоге «Квантовые горизонты» Института квантовой информации и материи Калифорнийского технологического института.



Лондон, час, когда Розалинда была рада, что стащила черный плащ своего брата и надела его вместо своего алого. Расположенная рядом фабрика на ночь перестала изрыгать дым, но скоро опять начнет. Какой-то шум заставил ее отступить к кирпичной стене. Подняв глаза, она раскрыла рот от изумления. Большое продолговатое неповоротливое судно медленно проплывало по небу. Темнота скрывала детали, но ей и не нужно было видеть: на его борту наверняка был нарисован латунный замок. Это Меллатор поднял в небо свой дирижабль.

Добро пожаловать в стимпанк! За последние несколько десятилетий этот жанр прочно вошел в литературу, изобразительное искусство и кинематограф. События его, как правило, разворачиваются поблизости от зарождающихся фабрик и в покрытых сажей городах, в Англии индустриальной эпохи и на Диком Западе — в реальном мире, где бурно росла и развивалась техника. Персонажи стимпанка превращают эти изобретения в футуристические механизмы, включая автоматические устройства и машины времени. Подобный союз старого и нового создает атмосферу романтики и приключений. Неудивительно поэтому, что почитатели стимпанка покупают цилиндры и нижние юбки, надевают украшения из латуни и стекла и стекаются на фестивали.

Эти фанаты мечтают о приключениях. Но уже сегодня физики, которые работают на стыке трех областей — квантовой физики, теории информации и термодинамики, — живут в них. Аналогично тому как стимпанк переплетает научно-фантастическую технику с викторианским стилем, современная область физики, которую я называю «квантовым стимпанком», соединяет технику XXI в. с научными принципами XIX в.

Наша цель — модернизировать законы термодинамики, науки, которая изучает работу, теплоту и эффективность, в соответствии с требованиями самых продвинутых экспериментов, передовой техники и теории. Термодинамика родилась на гребне волны промышленной революции, вызванной изобретением паровой машины.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Термодинамика, область физики, которая изучает тепловые процессы и КПД, возникла во время промышленной революции. Сегодня ученые работают над тем, чтобы придать этим законам современный вид и их можно было бы применять для задач современной техники, в частности к квантовым компьютерам и системам квантовой связи и квантовой информации.
- Эта область, в которой наука XIX в. соединилась с футуристической техникой, чем-то напоминает сочетание викторианского стиля и научно-фантастических изобретений в произведениях жанра, называемого стимпанком, и поэтому получила название «квантовый стимпанк».
- Один из недавних успешных примеров квантового стимпанка — предложенный учеными мотор на основе принципов квантовой механики и термодинамики.

Но по мере миниатюризации техники происходит объединение термодинамики и теории информации во все более мелких, микроскопических системах. Центр внимания ученых с паровозов переместился на двигатели нанометровых масштабов, молекулярные моторы живых клеток и холодильники минимально возможного размера. Теперь мы должны понять, как традиционные термодинамические понятия, такие как «тепло», «работа» и «термодинамическое равновесие», применять к современным квантовым системам.

Викторианская физика встречается с наукой нового тысячелетия

К 1800 г. Томас Севери и Томас Ньюкомен изобрели, а Джеймс Уатт и Мэттью Болтон усовершенствовали паровую машину. Ученых тогда интересовало, насколько эффективно такие машины смогут откачивать воду из шахт. Их поиски решения чисто практических задач переросли в исследования фундаментальной физики — например, почему время течет только в одном направлении. Вся термодинамика основана на этой работе.

Этот раздел физики описывает системы многих частиц, такие как пар, в терминах макроскопических свойств, таких как температура, давление, объем и энергия. Энергия в переходном состоянии подразделяется на два класса: работа и теплота. Работа — это хорошо организованная энергия, которую можно использовать для таких целей, как вращение мельничного колеса. Тепло — это энергия случайного движения — колебания частиц.

Степень хаотичности [системы] физики количественно описывают с помощью величины, называемой энтропией. Каждая частица пара характеризуется своими координатами и импульсом (масса частицы, умноженная на ее скорость). Совокупность координат и импульсов всех частиц мы называем микроскопическим состоянием пара. Мы не в состоянии описать микросостояние системы, потому что в паровом котле содержится порядка 10^{24} частиц. Представьте, что вы пытаетесь найти координаты и скорость каждой из них! Вместо этого мы определяем вероятность того, что пар находится в том или ином микросостоянии. Энтропия количественно характеризует эту неопределенность. Согласно второму закону термодинамики, энтропия замкнутой изолированной системы не может уменьшаться. Этот факт лежит в основе того обстоятельства, что время течет в одном направлении.

Но паровые машины, ставшие центральным элементом традиционной термодинамики, напоминают современную технику примерно так же, как шляпы-цилиндры похожи на шлемы виртуальной реальности. Во многих современных устройствах и экспериментальных установках используют сложные квантовые системы малых размеров.

Квантовая теория описывает физику атомов, электронов и других составляющих материи. Они могут вести себя образом, абсолютно невозможным для больших классических систем, таких как паровые котлы, фабрики и люди. Например, квантовые частицы могут быть квантово перепутанными, демонстрируя нечто вроде сверхсильной корреляции. Если вы создадите два квантово перепутанных атома и проведете измерение одного из них, состояние другого мгновенно изменится, даже если он находится на другом конце континента. Физики могут использовать квантовое перепутывание для обработки информации способами, невозможными для классических систем. Наука о том, как мы можем решать сложные вычислительные задачи, совершенствовать средства коммуникаций, защищать информацию и повышать точность измерений с помощью квантовых систем, называется квантовой теорией информации. Эта теория — удобный математический инструментарий для применения новых знаний в приложении к термодинамике. Как же нам удастся объединить две области науки? Чтобы рассуждать об информации, мы должны противостоять незнанию. Так же как и физики, специалисты в области теории информации измеряют степень незнания (*степень неопределенности*. — *Примеч. пер.*) величиной энтропии.

Например, квантовые компьютеры — это системы, в которых ключевую роль играют как квантовая теория информации, так и термодинамика. Google, IBM, другие компании и университеты напряженно работают над созданием машин, задача которых — взламывать определенные схемы шифрования и моделировать новые материалы гораздо быстрее, чем любой классический компьютер. Большинство систем квантовых вычислений необходимо охлаждать до температуры, близкой к абсолютному нулю. Охлаждение сводится к рассеиванию тепла, термодинамической величины. В то же время квантовые компьютеры совсем не похожи на машины, для которых была разработана [классическая] термодинамика.

Попытки применить термодинамические понятия к квантовым системам относятся к середине XX в., когда Джозеф Джойсик (Joseph Geusic), Эрих Шульц-Дюбуа (Erich Schulz-DuBois) и Генри Деррик Сквилл (Henry Derrick Scovil) предложили первый квантовый двигатель. Он был изготовлен на основе мазера (устройства, которое работает как лазер, но излучает в СВЧ-диапазоне). Позже Ронни Козлофф (Ronnie Kosloff) из Еврейского университета в Иерусалиме и его коллеги помогли выделить квантовые двигатели в отдельную область науки. Другой пионер — Марлан Скалли (Marlan Scully), которого иногда называют «квантовым ковбоем», — занимается квантовой оптикой в Принстонском университете и Техасском

Прорисовка концепции квантового двигателя

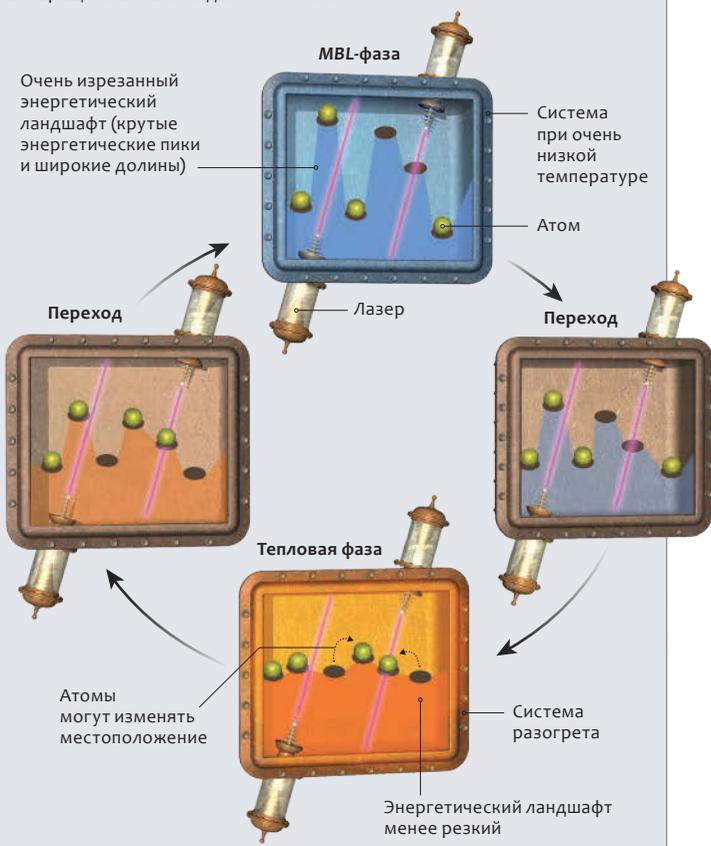
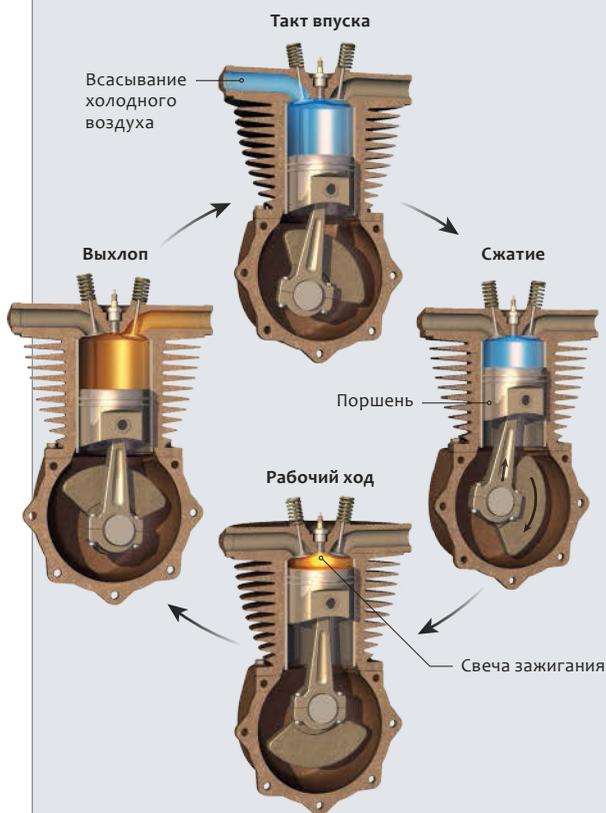
Термодинамика как область физики возникла в эпоху паровых машин. Физики «квантового стимпанка» работают над модернизацией этой области физики для применения к квантовой технике, такой как квантовые двигатели. Один из таких моторов на основе принципа многочастичной локализации, *MVL-мобиль*, показанный здесь, существует пока только как мысленный эксперимент, но, возможно, будет построен в недалеком будущем. Так же как в автомобильном двигателе циклический процесс, заставляющий машину двигаться, состоит из четырех тактов, *MVL-мобиль* для совершения работы проходит через четырехступенчатый квантовый процесс.

Автомобильный двигатель

Двигатель автомобиля всасывает холодный воздух и выбрасывает горячий в ходе четырехступенчатого цикла, который толкает машину вперед. Во время такта впуска двигатель втягивает в цилиндр холодный воздух; впрыскивается бензин. Во время такта сжатия поршень движется внутри цилиндра вверх, чтобы сжать эту смесь. Затем во время такта рабочего хода искра свечи зажигания воспламеняет воздушно-бензиновую смесь. Горячие газы давят на поршень, заставляя его двигаться вниз, и крутят колеса автомобиля. Наконец, во время такта выпуска горячая смесь продуктов сгорания выбрасывается наружу.

Двигатель на основе многочастичной локализации

MVL-мобиль проходит через четырехэтапный процесс, который начинается, когда атомы пребывают в фазе, называемой многочастичной локализацией. Атомы охлаждены до сверхнизких температур и находятся в поле с высокими энергетическими пиками и долинами с низкой энергией, которое удерживает атомы от больших перемещений. Затем мы меняем параметры лазерного излучения таким образом, чтобы вершины энергетического ландшафта сравнялись с долинами. Двигатель переходит в тепловую фазу, когда атомы могут свободно перемещаться, и двигатель поглощает энергию. Наконец, мы снова возвращаем все в исходное состояние.



аграрно-техническом университете, а также разведением крупного рогатого скота. Тем временем теоретики Джан Паоло Беретта (Gian Paolo Beretta), а также покойные Элиас Гифтопулос (Elias Gyftopoulos) и Джордж Хатсопулос (George Natsopoulos) изучали направление течения времени с квантовой точки зрения.

Основополагающей работой стала докторская диссертация 1988 г. Сета Ллойда (Seth Lloyd) «Черные дыры, демоны и потеря согласованности: как сложные системы получают информацию и что они с ней делают» (*BlackHoles, Demons, and the Loss*

of Coherence: How Complex System Get Information, and What They Do with It), которую он защитил в Рокфеллеровском университете и в которой были заложены многие важные идеи в области квантовой термодинамики.

Инструменты квантового стимпанка

Как мы уже видели, энтропия играет важную роль в термодинамике, теории информации и квантовой теории. Энтропию часто рассматривают как единое понятие, но на самом деле различные виды энтропии существуют в форме различных

математических функций, описывающих различные условия. Самые известные типы были введены в термодинамику Людвигом Больцманом и Джошуа Гиббсом в 1800-х гг., в теорию информации — сотрудником компании *Bell Telephone Labs* Клодом Шенноном в 1948 г. и в квантовую теорию информации — физиком-теоретиком Джоном фон Нейманом в 1932 г. Эти виды энтропии количественно определяют не только степень неопределенности, но и эффективность, с которой мы можем выполнять задачи по обработке информации, такие как сжатие данных, и задачи термодинамики, такие как работа двигателя автомобиля.

Нахождение новых энтропийных функций для современных малых квантовых систем — одна из ключевых задач теоретиков квантового стимпанка. Предположим, мы пытаемся использовать квантовую перепутанность для обмена информацией в определенном канале. Мы можем спросить: существует ли теоретический предел тому, насколько эффективно мы можем выполнить эту задачу? Ответ, вероятно, будет зависеть от энтропии.

Другая цель квантового стимпанка — построение того, что физики называют теориями ресурсов. Эти теории особое внимание уделяют ограничениям, при которых мы работаем. Например, первый закон термодинамики вынуждает нас сохранять энергию: мы не можем породить или уничтожить энергию; мы можем только преобразовывать ее из одной формы и одной системы в другую. Физики могли бы придумать состояние, в котором существует ограничение, например среду с фиксированной температурой, а затем попытаться математически смоделировать его с помощью теории ресурсов. Используя теорию ресурсов, мы можем рассчитать максимальную эффективность, с которой может быть выполнена та или иная задача. Эффективность, как правило, равна одной из функций энтропии.

Третья область внимания в наших поисках обновленной термодинамики — вывод уравнений, называемых флуктуационными соотношениями. Эти уравнения — продолжение второго закона термодинамики, который утверждает, что энтропия в замкнутой изолированной системе не может уменьшаться. Флуктуационные отношения описывают небольшие системы, на которые воздействуют большие силы, и говорят нам о работе, которую эти силы выполняют.

В 1996 г. Кристофер Яжинский (Christopher Jarzynski), в настоящее время работающий в Университете штата Мэриленд, доказал одно из самых известных флуктуационных соотношений. Физики называют его уравнением (или равенством) Яжинского, хотя сам Яжинский из скромности никогда так его не именуется. Экспериментаторы используют это уравнение для измерения определенных термодинамических свойств малых систем.

В качестве примера: представьте, что нить ДНК плавает в воде с такой же температурой, что и ее собственная. Нить обладает некоторым количеством свободной энергии. Последняя, собственно говоря, представляет собой энергию, которую система может использовать, чтобы совершить работу. С помощью лазеров ученые могут удерживать один конец нити и тянуть за другой. После того как некоторое время нить ДНК остается растянутой, ее температура снова сравнивается с температурой раствора, но в результате свободная энергия нити изменится. Эта разница в свободной энергии используется в химии, фармакологии и биологии. Мы можем оценить разницу в величине свободной энергии, многократно растягивая нить, измеряя работу, требуемую в каждом случае, подставляя полученные данные в уравнение Яжинского и решая его.

Первый закон термодинамики вынуждает нас сохранять энергию: мы не можем породить или уничтожить энергию; мы можем только преобразовывать ее из одной формы и одной системы в другую

Сколько измерений следует провести, задались мы с Яжинским вопросом, чтобы оценить разницу свободной энергии с требуемой точностью? Мы рассчитали, какое минимальное количество измерений, вероятно, необходимо выполнить, и предложили схему оценки точности с использованием теории информации малых систем.

В другой работе мы с коллегами показали, что флуктуационные соотношения и новомодные энтропийные функции — два равноправных подхода к термодинамике микромасштаба, и использовали каждый из них для вывода другого. Физики в Лондоне, Кельне и в других местах расширили и углубили это исследование.

Новая квантовая машина

Так же как традиционная термодинамика помогла описать физику паровых машин, наши усилия в области квантовой термодинамики смогут помочь нам изобретать квантовые машины. Экспериментаторы уже создали квантовые машины на основе фотонов (частиц света), электронные системы и сверхпроводящие кубиты (квантовые цепи, в которых ток может течь бесконечно долго, не затухая).

Недавно мы вместе с Кристофером Уайтом (Christopher D. White), в настоящее время работающим в Университете штата Мэриленд, Сарангом Гопалакришнаном (Sarang Gopalakrishnan), сейчас в Городском университете Нью-Йорка, и Гилом Рефаэлем (Gil Refael) из Калифорнийского технологического института разработали новую квантовую машину. Будучи теоретиками, мы сначала придумали машину, которая существовала только в наших головах, как идею для мысленного эксперимента. Но мы также предлагаем способ, как можно построить версию машины, используя квантовые инструменты, имеющиеся в лабораториях уже сегодня. Например, охлаждая атомы, а затем захватывая их и манипулируя ими с помощью лазеров, можно реализовать нашу конструкцию практически.

В термодинамике сохраняются едва уловимый запах солидола и угольной пыли, шум укутанных клубами пара первых поездов, нарушающих безмолвие сельского пейзажа, и борющихся с волнами первых океанских лайнеров, возгласы восхищения ландшафтом, открывающимся с летящего в небе воздушного шара

В нашей машине используется фаза вещества, называемая многочастичной локализацией (*MBL*), — еще одно состояние материи помимо знакомого всем жидкости, твердого тела и газа. Квантовые частицы могут пребывать в этой фазе, если они испытывают силы взаимного отталкивания и могут медленно колебаться в условиях неровного, крутого, случайного ландшафта. Ключевой элемент системы *MBL* — ее «атермичность», поскольку она не находится в тепловом равновесии. Частицы, находящиеся в тепловом равновесии, перемещаются по всему доступному пространству быстро и случайным образом. Если вы предоставите пару возможность находиться в определенном сосуде в течение длительного времени,

макроскопические параметры, такие как температура и объем, в конце концов установятся и перестанут сильно изменяться.

Но *MBL*-частицы в отличие от частиц пара не перемещаются, а остаются в одной и той же области. Отсутствие теплового равновесия служит ресурсом в задачах термодинамики. Автомобильные двигатели, например, работают, используя разницу температур горячих газов и холодного окружающего воздуха. Газы не находятся в тепловом равновесии, потому что горячие частицы локализованы в одной области, а холодные — в другой и ни одна из частиц не может перемещаться по всему пространству. Поскольку автомобильный двигатель использует для своей работы атермичность газовых смесей, я и мои сотрудники использовали атермичность частиц многочастичной локализации. Мы называем нашу конструкцию *MBL*-мобилем.

Работа автомобильного двигателя проходит за четыре такта, которые образуют полный, или замкнутый, цикл. К концу цикла двигатель возвращается в исходное состояние, перемещая автомобиль на некоторое расстояние путем передачи тепла горячих газов холодной окружающей среде. *MBL*-мобиль также проходит четырехступенчатый цикл. В цикле нашего двигателя мы поочередно переводим атомы из тепловой фазы, в которой частицы могут разлетаться по всему пространству, в фазу *MBL* и обратно. Чтобы привести в движение двигатель, мы изменяем окружающую среду, в которой находятся частицы, с довольно плоской на неровную, меняя настройки лазеров. Перед началом каждого такта двигатель обменивается теплом с внешней средой. Двигатель взаимодействует с горячей средой, когда он находится в своей тепловой фазе, и с холодной средой, когда он находится в фазе *MBL*. Таким образом, мы имеем четыре такта: (1) теплообмен с горячей средой в тепловой фазе, (2) переход из тепловой фазы в *MBL*, (3) теплообмен с холодильником и (4) переход из фазы *MBL* в тепловую.

Мы оценили, насколько хорошо может работать *MBL*-мобиль, рассчитав его мощность и КПД и сравнив их с аналогичными показателями других двигателей. Например, у некоторых бактерий есть жгутики — длинные гибкие хвосты, вращающиеся с помощью биологического моторчика. Каким же образом нам эти маленькие моторчики сравнить с нашим? По нашим оценкам, наш двигатель в десять раз мощнее жгутика. С другой стороны, каким образом наш квантовый мотор сравнить с двигателем автомобиля? Мы оценили удельную мощность двух моторов, то есть их выходную мощность на единицу рабочего объема: автомобильный двигатель более эффективно использует пространство, но примерно всего лишь в десять раз.

Фаза многочастичной локализации дает нашему мотору четыре преимущества. Во-первых, он может быть любого размера — от десяти частиц до бесконечности. Чтобы построить большой двигатель, можно начать с мини-мотора из десяти частиц. Вы строите множество копий мини-мотора, а затем заставляете их работать совместно. Если бы мини-моторы вели себя как тепловые, они влияли бы друг на друга, потому что частицы одного попадали бы в другой. Многочастичная локализация гарантирует, что все, находящееся в одном мини-моторе, остается там. Таким образом, можно поместить множество мини-моторов рядом друг с другом, обеспечив высокую удельную мощность всего двигателя, — это второе преимущество *MBL*-мобиля.

Третье преимущество проявляется, если вы проводите много испытаний двигателя. В некоторых случаях он будет производить работу. Однако в небольшом числе испытаний двигатель будет не производить, а, наоборот, потреблять работу. Таких «неправильных» испытаний происходит меньше, если вы переводите двигатель из *MBL*-фазы в термическую, чем когда переход целиком происходит в фазе *MBL*. Более того, величина работы меньше изменяется от одного успешного испытания к другому, если вы используете *MBL*; *MBL* повышает надежность двигателя.

Успех нашего *MBL*-мобиля, по крайней мере в мысленных экспериментах, позволяет предположить, что многочастичная локализация может найти применение и в других требующих решения термодинамических задачах. Представьте, например, что мы запустили наш цикл в обратном направлении. Двигатель должен охлаждать, передавая тепло из холодной среды в горячую. Чтобы проявились такие свойства, как квантовая перепутанность, квантовые системы необходимо охлаждать. Холодильник на основе многочастичной локализации сможет охлаждать многочастичные квантовые системы. Как вариант, ученые предложили также использовать *MBL* для хранения энергии. А недавно мы вместе с моими сотрудниками приступили к созданию рабочей версии двигателя с помощью другого набора инструментов — сверхпроводящих квантовых битов в магнитном поле. Существует масса практических решений, когда мы применяем к материаловедению мышление в стиле квантового стимпанка.

Взгляд сквозь квантовый монокль

Приверженка стимпанка всматривается в будущее через монокль. Что она там видит? Математический и физический инструментарий выковывается на стыке квантовой теории, теории информации и термодинамики. Мы работаем также, чтобы применить этот инструментарий в других разделах науки — материаловедении (как в случае

MBL-мобиля), химии, физике высоких энергий, для разгадки тайн черных дыр и материи пространства-времени, а также в атомной и молекулярной физике и в оптике.

Технологии настойчиво требуют применения. Большинство работ по квантовому стимпанку имеют теоретический характер, хотя эксперименты по практическому использованию уже начались и множатся. Но так же как развитие термодинамики послужило мощным толчком промышленной революции, квантовая, информационная термодинамика и термодинамика микросистем должны стимулировать новые изобретения. *MBL*-двигатели не станут источником механической энергии наших автомобилей в этом десятилетии. Но молекулярные переключатели, преобразователи солнечной энергии и рассеивающие тепло транзисторы — это микротехника на основе термодинамики. Они должны направлять теорию.

Другая задача — объединить в квантовом стимпанке разрозненные усилия: новомодные виды энтропии, различные теории ресурсов, флуктуационные соотношения, квантовые тепловые машины и многое другое. Это лишь некоторые из множества различных видов работ, ведущихся во всем мире, и новые инструменты, находящиеся в стадии разработки. Согласование различных определений и результатов этих областей укрепит теорию квантовой термодинамики.

В термодинамике сохраняются едва уловимый запах солидола и угольной пыли, шум укутанных клубами пара первых поездов, нарушающих безмолвие сельского пейзажа, и борющихся с волнами первых океанских лайнеров, возгласы восхищения ландшафтом, открывающимся с летящего в небе воздушного шара. Наука о квантовой информации меняет наше представление о вычислениях, средствах связи, криптографии и измерениях. Вы читаете об этом слиянии старого и нового в журнале *Scientific American*, но с тем же успехом могли бы держать в руках роман Герберта Уэллса или Жюль Верна. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Руби М. Длинная рука второго закона // ВМН, № 2, 2009.
- Quantum Steampunk: Quantum Information, Thermodynamics, Their Intersection, and Applications Thereof across Physics. Nicole Yunger Halpern. Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, 2018.
- Quantum Engine Based on Many-Body Localization. Nicole Yunger Halpern et al. in *Physical Review B*, Vol. 99, No. 2, Article No. 024203; January 2019. <https://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.99.024203>