

Как измерять температуру малой квантовой системы

текст

Алексей Рубцов

доктор физико-математических наук,

физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,

Российский квантовый центр

иллюстрация

Родион Китаев



Без Людвигу Больцману (1844–1906) мы, может быть, так и не знали бы, что такое температура

Хочется начать с шутки о том, что, если элементы квантовых систем обработки информации болеют, у них повышается температура. Но шутки не получатся — это так и есть. Впрочем, и для окружающих нас «классических» полупроводниковых устройств перегрев вреден — это знает каждый. Если же говорить про кубиты, на основе которых разрабатывают квантовые информационные системы, для них повышение температуры означает увеличение декогеренции (то есть разрушения квантового состояния) и, как следствие — резкое ухудшение характеристик. Поэтому, например, так называемые потоковые кубиты приходится охлаждать действительно очень хорошо — до тысячных градуса Кельвина. Кроме того, многие квантовые эффекты — сверхпроводимость, сверхтекучесть, эффект Кондо и другие — наблюдаются только при достаточно низких температурах.

Таким образом, информация о том, чем определяется температура квантовых объектов, важна и для перспективных технологий, и для наших фундаментальных знаний об устройстве мира. На самом деле,

непростым оказывается даже вопрос, имеет ли та или иная микросистема какую-либо определенную температуру или, иными словами, каковы пределы применимости самого понятия температуры. Простое «школьное» определение говорит, что температура есть мера средней энергии движения молекул или других составляющих систему частиц. Слово «средней» означает, что эту энергию нужно измерить много раз и результаты измерения усреднить — хотя бы умозрительно. Если система достаточно большая, проблем нет — можно усреднить результаты измерений в разных ее точках (в большой системе их много). Это соответствует так называемому макроскопическому пределу. Говоря о температуре предметов, окружающих нас в быту, мы имеем в виду именно температуру в смысле макроскопического предела. Вышеописанное усреднение в этом случае — это, например, усреднение по объему ртути в градуснике (в стандартном градуснике два грамма ртути, это примерно шесть на десять в двадцать третьей степени атомов — вполне достаточно, чтобы усреднить). А вот как быть, если изучаемая система очень мала

и описывается законами квантовой физики, так что понятие энергии движения ее составных частей теряет смысл?

Оказывается, для малых квантовых систем температуру тоже можно определить, если вероятность обнаружить систему в заданном состоянии определяется его энергией, в соответствии со знаменитым распределением Больцмана. Только теперь речь идет уже не об энергии отдельных составляющих систему частиц, а об энергии системы в целом (скажем, в атоме бессмысленно говорить об энергии каждого из его электронов, но можно — об энергии всего атома).

Итак, о температуре малых квантовых систем говорить можно, но не в любом случае, а только если для этих систем применимо распределение Больцмана. Как же это реализовать на практике? Уже более ста пятидесяти лет физики связывают формирование температуры с так называемым термодинамическим равновесием между исследуемой системой и ее окружением (его принято называть термостатом). В состоянии термодинамического равновесия энергия, а, возможно, и частицы свободно «перетекают» из системы в термостат и обратно, поэтому система и приходит к равновесию. Утверждение о том, что все физические объекты в конце концов приходят в термодинамическое равновесие со своим окружением, настолько важно, что иногда его называют нулевым началом термодинамики.

Но можно придумать множество случаев, когда термодинамическое равновесие отсутствует. Мы рассмотрели один из них, названный нами «вакуумный термостат», когда составляющие квантовую систему частицы могут только покидать ее, но не возвращаться обратно. Такое представление хорошо подходит для описания многих реальных ситуаций. Например, в экспериментах по сверхсильному охлаждению облако атомов в оптической ловушке (ловушку «собирают» из направленных со всех сторон лазерных лучей) охлаждается за счет испарения из него отдельных атомов. Естественно задаться вопросом — каким состоянием закончится такой процесс? Тривиальный результат состоял бы в том, что в конце концов ловушку покинут все атомы. Но если сделать ловушку достаточно глубокой, ситуация становится более интересной — у некоторого количества атомов попросту не хватит энергии, чтобы вылететь наружу. Таким образом, процесс испарения закончится стационарным состоянием ловушки, содержащим некоторое количество атомов в ней. Говорить о термодинамическом равновесии ловушки с окружением в этом случае не приходится — частицы не возвращаются в ловушку. Тем не менее, наши расчеты показали, что полученное таким образом стационарное состояние ловушки, в которой осталось некоторое количество атомов, превосходно описывается распределением Больцмана. То есть понятие температуры оказалось применимым более широко, чем представлялось до сих пор.

Почему все это важно? В последнее время в физике произошла очередная вспышка интереса к тому, где и как пролегают границы между квантовой и классической физикой, физикой отдельных частиц и макрообъектов. Вопросы о механизмах декогеренции — разрушения квантового состояния и термализации — установления термодинамического равновесия здесь выходят на первое место. Мы надеемся, что наш результат окажется важен для ответов по крайней мере на некоторые из таких вопросов.



Оригинальную статью за авторством А.М. Шакирова, Ю.Е. Щадиловой и А.Н. Рубцова можно найти по адресу arxiv.org/pdf/1503.07818v1