

Виртуальные кубиты, виртуальные температуры и основания термодинамики

Брюннер и др. (Великобритания)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru)

arXiv:1106.2138v1 [quant-ph] 10 Jun 2011

Virtual qubits, virtual temperatures, and the foundations of thermodynamics

Nicolas Brunner¹, Noah Linden², Sandu Popescu³ and Paul Skrzypczyk^{1,3}

¹Н. Н. Wills Physics Laboratory, University of Bristol, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, United Kingdom

²Department of Mathematics, University of Bristol, University Walk, Bristol BS8 1TW, United Kingdom

³Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, Centre for Mathematical Sciences, Wilberforce Road, Cambridge CB3 0WA, United Kingdom

В области квантовой термодинамики [1–3] сделаны большие успехи в фундаментальном понимании явлений на стыке квантовой механики и термодинамики. Эта линия развития уходит в 50-е годы, когда был исследован термодинамический анализ лазеров [4–6]. С тех пор появился значительный интерес во многих связанных областях, с большим числом результатов в области квантовых тепловых машин [7–16], термодинамики конечного времени (finite-time thermodynamics) [17–22] и второго начала термодинамики ([23–26] и приведенные там ссылки).

Одним из важных моментов данной работы является недавнее изучение наименьших тепловых самодостаточных (selfcontained) машин [27–31]. Под самодостаточными системами мы понимаем те, в которых отсутствуют источники внешней работы или другие формы управления, возможны только несвязанные взаимодействия с тепловыми резервуарами при различных температурах. Эти наименьшие самодостаточные тепловые машины являются, вероятно, наиболее элементарными тепловыми машинами. Как таковые, они по своей сути просты и прозрачны, они предлагают нам некоторый взгляд на основы термодинамики, свободный от несущественных деталей и дополнений. Он приводит к общему выводу о том, в чем состоят конечные функции тепловых машин.

В основе этого взгляда на термодинамику лежит понятие *виртуального кубита* и его *виртуальной температуры*. Виртуальный кубит – это двухуровневая подсистема из двух резервуаров, которая приводит в действие тепловую машину, рассматриваемую как составную систему. Различные виртуальные кубиты обладают различными виртуальными температурами. Используя эти понятия, мы покажем, во-первых, что наименьшие тепловые машины – холодильники, тепловые насосы и тепловые машины – реализуют все функции через простой механизм; они приводят внешнюю систему в тепловой контакт с правильно выбранным виртуальным кубитом при правильно подобранной виртуальной температуре. Более сложные тепловые машины,

включая классические, используют существенно тот же самый механизм. Единственное различие состоит в том, что они связывают систему со многими виртуальными кубитами при различных температурах в одно и то же время.

Далее мы демонстрируем широту этого подхода. Прежде всего, виртуальный кубит открывает естественный путь к пониманию работы в терминах инверсии популяции и негативных температур. Это, в свою очередь, показывает, что работа обладает дополнительным свойством, для которого мы используем термин “интенсивность (strength)”. Кроме того, это понятие представляется мощным средством для понимания коэффициента полезного действия, особенно предела Карно. Будет показано, что наименьшие тепловые машины обладают некоторым коэффициентом полезного действия, который всегда является универсальным (не зависящим от деталей модели), в то время как любая тепловая машина, приближающаяся по эффективности к идеальному циклу Карно функционирует в основном, в пределе наименьших машин, используя только одну виртуальную температуру. Будет также показано, что интенсивность работы исчезает в пределе Карно, усиливая слабую природу предела Карно.

В конечном счете мы увидим что ресурс пары тепловых резервуаров обозначается понятием виртуальной температуры, что приводит, в свою очередь к введению идеи “истинной тепловой машины”.

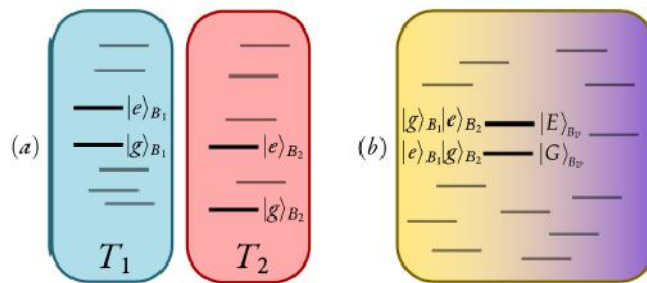


Рисунок 1: Схематическая диаграмма резервуара - виртуального кубита.

(a) Два резервуара, один при температуре T_1 , а другой при температуре T_2 . Каждому резервуару мы сопоставляем две произвольные энергии собственных состояний, $|g\rangle_{B_i}$ и $|e\rangle_{B_i}$ со значениями E_i .

(b) Оба эти резервуара могут рассматриваться в качестве единого составного резервуара. Две энергии собственных состояний этой составной системы – это $|G\rangle_{B_v} \equiv |e\rangle_{B_1}|g\rangle_{B_2}$ и $|E\rangle_{B_v} \equiv |g\rangle_{B_1}|e\rangle_{B_2}$. ‘Виртуальная температура’ T_v этого ‘виртуального кубита’ может принимать любое значение – положительное или отрицательное – в зависимости от E_1 и E_2 .

Статья построена следующим образом. В разделе II вводится концепция виртуального кубита и его виртуальной температуры, а в разделе III показывается, как эта концепция используется для понимания сущности тепловой машины. В разделе IV мы приступаем к явной демонстрации этой идеи для наименьших тепловых машин, обсуждая сначала холодильники и тепловые насосы в разделе V, а затем работу и тепловые двигатели в разделе VI.

В разделе VII мы вводим понятие ‘интенсивности’ работы и исследуем ее проявления как для конечномерных, так и для бесконечномерных систем. С классической точки зрения, когда думают о работе, считается, что нет различных типов работы. Однако, как мы ниже увидим, все, что требуется от тепловой

машины, производящей работу, это чтобы виртуальный кубит имел отрицательную температуру.

Но различные тепловые машины могут иметь свои виртуальные кубиты при различных отрицательных температурах. Обратимся к понятиям "температуры, при которой работа производится" или "температура работы". Ясно, что работа, произведенная при различной температуре, должна отличаться многими физическими аспектами. Действительно, интуитивно представляется, что работа, производимая при отрицательных температурах с меньшими абсолютными значениями – соответствующая более сильным инверсиям в машине – оказывается в некотором смысле "интенсивней".

Важно подчеркнуть, что эта "интенсивность" работы не эквивалентна мощности, то есть темпу производства работы; это совершенно иное понятие, не имеющее никакого отношения к масштабу времени. В действительности, как будет показано, все остальное совпадает, мощность машины зависит от рабочей температуры – меньшая по абсолютной величине отрицательная температура соответствует большей мощности. Но мощность зависит от множества других факторов, кроме этой температуры; она критически зависит от констант связи, учитывающих масштаб времени. С другой стороны, виртуальная температура, при которой производится работа, является понятием, не связанным с какими бы то ни было аспектами течения времени.

В разделе VIII анализируется универсальность понятия эффективности машин для наименьших машин. Далее в разделе IX обсуждается, как тепловые машины приближаются к пределу Карно, а в разделе X исследуется производство энтропии в необратимых машинах.

В конце - в разделе XI - вводится понятие 'истинной' машины. Домашний холодильник использует дополнительную работу для передачи тепла от холодного источника к горячему. Далее, с теоретической точки зрения, холодильники в общем случае представляют собой "машину в режиме реверса", использующую дополнительную работу для переноса тепла в направлении, противоположном градиенту температур.

Мы утверждаем, что эта работа не является необходимой. С одной стороны, хорошо известно, что для функционирования холодильника внешний источник работы не требуется. Однако сам по себе этот факт не является неожиданным – мы всегда можем заменить источник работы машиной, которая ее производит, используя два внешних резервуара. Действительно, мы знаем, что работа, используемая для нашего домашнего холодильника в конечном счете поступает от силовой станции. Существуют также примеры холодильников, в котором нет видимого места, где используется работа – например, адсорбционные холодильники не имеют машин и насосов – но само по себе не имеет значения, что работа не представлена в некоторой скрытой форме (такой, как расширяющийся газ, и т.п.). Понятия виртуальных кубитов и виртуальных температур дают начальные средства для постановки этого вопроса.

Главное состоит в том, что нет необходимости производить работу – даже внутри машины – для построения холодильника. Холодильники, описанные в статье, работают за счет приведения внешней системы в тепловой контакт с виртуальными кубитами, температура которых ниже, чем T_1 и T_2 , действительные температуры двух резервуаров. Нет точки, в которой работа производится или используется.

В этом смысле такой холодильник является истинным. Обычные холодильники (и тепловые насосы), которые используют работу, теперь оказываются "избыточными". Это наиболее очевидно, если мы говорим о ресурсах, которые нам предоставляет составной тепловой резервуар. Ясно, что

работа является ресурсом, обеспечиваемым составным резервуаром, и мы действительно можем использовать его для построения холодильника. Мы, однако, видим, что составной резервуар обеспечивает также и другие ресурсы, именно энергию при любой температуре, не обязательно работу. Энергия при “холодной” температуре является ресурсом, который может быть использован для того, чтобы достичь охлаждения непосредственно, в то время как работа нуждается в каком-то преобразовании. Таким образом, обычные холодильники устраняют необходимость использования ресурса (работы), который мощнее того, что требуется. Истинные тепловые машины используют минимально возможные ресурсы и являются, таким образом, “чистейшими” тепловыми машинами.

Далее, важно различать между истинной или не-истинной тепловыми машинами, когда мы хотим точно узнать, что в точности делают тепловые резервуары, управляющие ими. Если мы учитываем, что эти резервуары не бесконечны по размеру, то тепловые машины с необходимостью провоцируют их деградацию, в частности, понижая их свободную энергию. Истинные холодильники связаны с иными виртуальными кубитами, нежели холодильники, которые используют работу в качестве промежуточного агента.

- [1] G. Gemma, M. Michel, and G. Mahler, Quantum Thermodynamics (Springer, New York, 2004).
- [2] E. P. Gyftopoulos and G. P. Beretta, Thermodynamics: Foundations and Applications (Dover, New York, 2005).
- [3] A. E. Allahverdyan, R. Ballian, and Th. M. Nieuwenhuizen, J. Mod. Opt. **51**, 2703 (2004).
- [4] N. F. Ramsey, Phys. Rev. **103**, 20 (1956).
- [5] H. E. D. Scovil and E. O. Schulz-DuBois, Phys. Rev. Lett. **2**, 262 (1959).
- [6] J. E. Geusic, E. O. Schulz-DuBois, and H. E. D. Scovil, Phys. Rev. **156**, 343 (1967).
- [7] E. Geva and R. Kosloff, J. Chem. Phys. **104**, 7681 (1996).
- [8] C. M. Bender, D. C. Brody, and B. K. Meister, Proc. Roy. Soc. A **458**, 1519 (2002).
- [9] B. Lin and J. Chen, Phys. Rev. E **67**, 046105 (2003).
- [10] T. E. Humphrey and H. Linke, Physica E **29**, 390 (2005).
- [11] D. Segal and A. Nitzan, Phys. Rev. E **73**, 026109 (2006).
- [12] M. J. Henrich, M. Michel, and G. Mahler, Europhys. Lett. **76**, 1057 (2006).
- [13] M. J. Henrich, G. Mahler, and M. Michel, Phys. Rev. E **75**, 051118 (2007).
- [14] E. Boukobza and D. J. Tannor, Phys. Rev. Lett. **98**, 240601 (2007).
- [15] H. T. Quan, Y.-X. Liu, C. P. Sun, and F. Nori, Phys. Rev. E **76**, 031105 (2007).
- [16] A. E. Allahverdyan, K. Hovhannisyan, and G. Mahler, Phys. Rev. E **81**, 051129 (2010).
- [17] E. Geva and R. Kosloff, J. Chem. Phys. **96**, 3054 (1992).
- [18] E. Geva and R. Kosloff, Phys. Rev. E **49**, 3903 (1994).
- [19] T. Feldmann, E. Geva, R. Kosloff, and P. Salamon, Am. J. Phys. **64**, 485 (1996).
- [20] T. Feldmann and R. Kosloff, Phys. Rev. E **61**, 4774 (2000).
- [21] T. Feldmann and R. Kosloff, Phys. Rev. E **68**, 016101 (2003).
- [22] R. Kosloff and T. Feldmann, Phys. Rev. E **82**, 011134 (2010).
- [23] W. Pusz and S. L. Woronowicz, Comm. Math. Phys. **58**, 273 (1978).
- [24] A. Lenard, J. Stat. Phys. **19**, 575 (1978).
- [25] D. Janzing, P. Wocjan, R. Zeier, R. Geiss, and Th. Beth, Int. J. Th. Phys. **39**, 2717 (2000).
- [26] T. D. Kieu, Phys. Rev. Lett. **93**, 140403 (2004).
- [27] N. Linden, S. Popescu, and P. Skrzypczyk, Phys. Rev. Lett. **105**, 130401 (2010).
- [28] P. Skrzypczyk, N. Brunner, N. Linden, and S. Popescu, arXiv:1009.0865 (2010).

- [29] N. Linden, S. Popescu, and P. Skrzypczyk, arXiv:1010.6029 (2010).
- [30] J. P. Palao, R. Kosloff, and J. M. Gordon, Phys. Rev. E **64**, 056130 (2001).
- [31] M. Youssef, G. Mahler, and A.-S. F. Obada, Phys. Rev. E **80**, 061129 (2009).
- [32] R. Alicki, J. Phys. A: Math. Gen. **12**, L103 (1979).
- [33] E. Boukobza and D. J. Tannor, Phys. Rev. A **74**, 063822 (2006).
- [34] E. Boukobza and D. J. Tannor, Phys. Rev. A **74**, 063823 (2006).
- [35] H. Weimer, M. J. Henrich, F. Rempp, H. Schroder, and G. Mahler, Europhys. Lett. **83**, 30008 (2008).
- [36] S. Carnot, Reflexions sur la Puissance Motrice de Feu (Bachelier Libraire, Paris, 1824).
- [37] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, The Feynman Lectures on Physics (Addison Wesley, Reading, MA, 1963), Vol. 1.
- [38] S. Popescu, arXiv:1009.2536 (2010).
- [39] J. M. R. Parrondo and P. Espanol, Am. J. Phys. **64**, 1125 (1996).
- [40] P. Talkner, Ann. Phys. **167**, 390 (1986).
- [41] Заметим, что мы определяем размер тепловой машины размерностью его гильбертова пространства.