

Насколько малы могут быть тепловые машины? Вперед к минимально возможному холодильнику

Н. Линден, С. Попеску и П. Скржипчик (Великобритания)

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

arXiv:0908.2076v1 [quant-ph] 14 Aug 2009

How small can thermal machines be? Towards the smallest possible refrigerator

Noah Linden¹, Sandu Popescu², and Paul Skrzypczyk²

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

² H. H. Wills Physics Laboratory, University of Bristol, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, United Kingdom

Dated: August 22, 2009)

Когда более двух веков назад Сади Карно [1] стал изучать физику паровых машин – и в процессе этого исследования создал термодинамику, один из краеугольных камней физики – ключ к успеху заключался в абстракции от реальных машин и рассмотрению идеализированных (“модельно независимых”) тепловых машин. Он установил, что хотя свойства каждой машины зависят от особенностей ее конструкции, фундаментальный предел их эффективности не зависит от этих особенностей. Но может ли физика действительно быть полностью исчерпана этим ответом? Здесь можно задать вопрос относительно других фундаментальных пределов, в частности, насколько малыми могут быть тепловые машины? Существует ли фундаментальный предел их размера? И, когда мы говорим, что они очень малы, имеются ли дополнительные ограничения на их эффективность? Могут ли маленькие машины работать так же хорошо, как макроскопические машины, или существует связь между размером и эффективностью? Например, могут ли маленькие машины быть сконструированы так, чтобы они могли охлаждаться при температуре, произвольно близкой к абсолютному нулю, или размер накладывает фундаментальный предел?

В настоящей статье эти вопросы изучаются в рамках квантовой механики. Наиболее важно, что квантовая механика дает естественное и универсальное понятие “размера”, а именно – размерность гильбертова пространства, которые описывают систему. Это и есть понятие размера, которое здесь будет использоваться для характеристики тепловых машин, а вовсе не их протяженность в пространстве или их масса. Тем не менее, очень часто случается, что малая размерность гильбертова пространства ассоциируется с микроскопическими системами (атомы, спины и т.п.) и, следовательно, с малыми пространственными размерами и малыми массами.

В частности, специально изучается такой тип термодинамических машин, как “самодостаточные (self-contained)” холодильники. Этим термином обозначается тот факт, что они не используют никакого внешнего источника работы. Как хорошо известно, такое охлаждение может быть достигнуто, когда работа выполняется

над микроскопической системой. Действительно, лазерное охлаждение [2, 3, 4] является “рабочей лошадкой” в широкой области атомной и молекулярной оптики. Такие внешне управляемые холодильники также изучаются теоретически, недавно они привлекли большое внимание, например, см. [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Однако в этом случае можно уверенно назвать микроскопическую систему, которая является самодостаточным холодильником - например, требуется, микроскопический лазер. В данной статье авторы интересуются учетом всех степеней свободы, которые образуют наш холодильник; это причина, по которой внимание фокусируется на машинах, которые не требуют внешней работы. С другой стороны, разумеется, ни одна тепловая машина не может работать без источника свободной энергии. Поэтому во всех тепловых машинах это предусматривают, позволяя холодильнику контактировать с двумя тепловыми резервуарами, имеющие различные температуры.

Отталкиваясь от выводов, относящихся к фундаментальной физике, авторы полагают, что данная работа может быть полезной для ряда применений. Одной из таких областей применения является биология. Интригующим является вопрос, как простые механизмы, подобные описываемому в данной статье, используются биологическими системами. Вторая область применения – это быстро развивающаяся сфера нанотехнологии, где очевидны преимущества от охлаждения в атомных масштабах.

В настоящей работе изучаются три модели. Первый холодильник состоит из двух кубитов (двухуровневые системы). Развивая эту идею, представлен второй холодильник, состоящий из кубита и кутрита (трехуровневая система), где все взаимодействия происходят в ближайшем окружении. В качестве последнего примера представлен холодильник, состоящий из одиночного кутрита, т.е. наименьший возможный холодильник. Наконец, доказываем, что нет фундаментальных пределов для близости к абсолютному нулю температуры, при которой этот холодильник может охлаждаться.

При этом остается много других интересных вопросов и еще не изученных проблем, которые почти не затрагивались в статье. Первое – что можно сказать относительно эффективности представленных холодильников, возможно ли оценить ее количественно? Если так, то является ли конструкция представленного холодильника наиболее эффективной, либо существуют другие гамильтонианы, которые лучше с точки зрения охлаждения?

Более того, фундаментальным является вопрос, существует ли связь между малым размером и эффективностью – например, можно создать лишь большой и эффективный холодильник, либо малый и неэффективный? Иными словами, может ли малая машина обладать эффективностью идеальной машины Карно? Представленные частные модели не обладают такой эффективностью; действительно, как охлаждающая спираль, так и кубиты машины обладают равновесными температурами, которые на конечную (а не бесконечно малую) величину отличаются от температур их окружения, что приводит к необратимому обмену тепла. Однако можно ли найти лучшую модель?

Помимо холодильников, интересно также рассмотреть и другие термодинамические машины. Можем ли мы как-либо извлечь ‘работу’ и использовать ее для функционирования других тепловых машин?

Литература:

[1] S. Carnot, *Reflexions sur la puissance motrice du feu* (1824); *Reflection on the Motive Power of Fire*, Dover, (1960).

- [2] T. Hänsch and A. Schawlow, *Opt. Comm.*, 13, 68, (1975).
- [3] D. J. Wineland and T. W. Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 20, 637, (1975).
- [4] For a review see: F. Bardou, J. P. Bouchaud, A. Aspect and C. Cohen-Tannoudji, *Lévy statistics and laser cooling*, Cambridge University Press, (2001)
- [5] E. Geva and R. Kosloff, *J. Chem. Phys.*, 96, 3054, (1992).
- [6] E. Geva and R. Kosloff, *J. Chem. Phys.*, 104, 7681, (1996).
- [7] T. Feldmann, E. Geva and P. Salamon, *Am. J. Phys.*, 64, 485, (1996).
- [8] T. Feldmann and R. Kosloff, *Phys. Rev. E*, 61, 4774, (2000).
- [9] J. P. Palao, R. Kosloff and J. M. Gordon, *Phys. Rev. E*, 64, 056130, (2001).
- [10] T. Feldmann and R. Kosloff, *Phys. Rev. E*, 68, 016101, (2003).
- [11] F. Tonner and G. Mahler, *Phys. Rev. E*, 72, 666118, (2005).
- [12] M. J. Henrich, M. Michel and G. Mahler, *Europhys. Lett.*, 76, 1057, (2006).
- [13] D. Segal and A. Nitzan, *Phys. Rev. E*, 73, 026106, (2006).
- [14] F. Rempp, M. Michel and G. Mahler, *Phys. Rev. A*, 76, 032325, (2007).
- [15] M. J. Henrich, M. Michel and G. Mahler, *Phys. Rev. E*, 75, 051118, (2007).
- [16] H. T. Quan, Y. Liu, C. P. Sun and F. Nori, *Phys. Rev. E*, 76, 031105, (2007).
- [17] T. Feldmann and R. Kosloff, [arXiv:quant-ph/0906.0986](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0906.0986)
- [18] H. Briegel and S. Popescu, [arXiv:quant-ph/0806.4552](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0806.4552)
- [19] L. Schulman and U. Vazirani, *Proc. 31st STOC (ACM Symp. Theory Comp.)*, ACM Press, (1999).
- [20] J. M. Fernandez, S. Lloyd, T. Mor and V. Roychowdhury, *Int. J. Quant. Info.*, 2, 461, (2004).
- [21] E. Sudarshan and B. Mirsa, *J. Math. Phys.*, 18, 756, (1977).