

ДЕМОН МАКСВЕЛА

(Maxwell demon)

«...как и полагается демонам Максвелла, всю жизнь они занимались открыванием и закрыванием дверей...».

*Аркадий и Борис Стругацкие
«Понедельник начинается в субботу»*



Иллюстрация Regina Fernandes

В 1850 году Р. Клаузиус сформулировал второй закон термодинамики, согласно которому «теплота сама по себе не может перейти от более холодного тела к более тепловому» (самая простая и понятная всем формулировка этого закона – «чудес не бывает»). Для того чтобы показать, что второй закон термодинамики не является абсолютным и всегда выполнимым законом природы, а имеет статистическую природу, Д. Максвелл

в 1867 году предложил следующий мысленный эксперимент. Представьте себе ящик, который состоит из двух отсеков – А и В – разделенных между собой перегородкой с отверстием и наполненных газом, находящимся при одинаковой температуре и давлении (рис. 1). Некое разумное существо – демон – закрывает и открывает это отверстие с помощью очень легкой заслонки. Что это за демон, откуда он взялся и как его зовут – Максвелл не уточнил, поэтому впоследствии его так и прозвали – демон Максвелла. Умный демон по замыслу ученого может работать в нескольких режимах. В первом из них он устраивает жесткий отбор для молекул: из отсека А вы пускает только синие (предположим, что они холодные), красным (горячим) выход закрыт (рис. 1а). Из отсека В, наоборот, демон выпускает только красные молекулы, синие же остаются внутри. Через некоторое время в одном отсеке останутся горячие молекулы, а во втором соберутся холодные, т.е. будет наблюдаться очевидный температурный дисбаланс. В другом режиме демон готов выпускать через отверстие какие угодно молекулы, но только из одного отсека (рис. 1б). В этом отсеке молекул становится все меньше и меньше, но итог оказывается такой же, как в первом случае: один из отсеков, в котором молекул много, становится горячее.

Если бы такой демон существовал в реальности, то его проделки должны были бы привести к нарушению второго закона термодинамики и самопроизвольному переходу тепла от холодного тела к горячему (например, чайник, стоящий на электрической плите, вдруг самопроизвольно покрывался бы льдом, а плита, на против, нагрелась бы от охлаждающегося чайника). На самом деле,

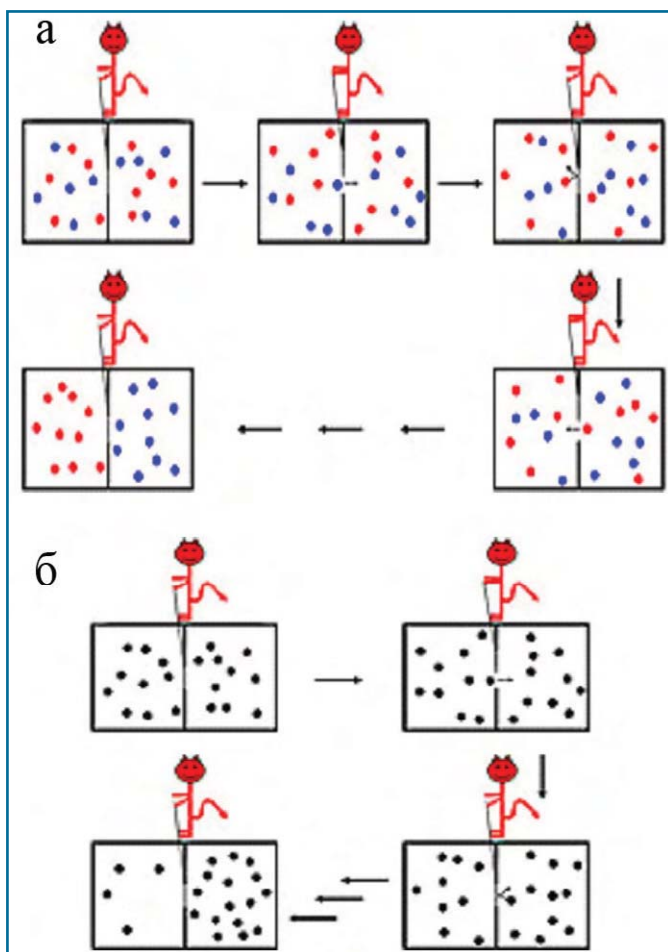


Рис. 1. Иллюстрация с сайта <http://s119716185.websitehome.co.uk/>

если в систему из двух отсеков включить еще и самого демона, то ни какого нарушения законов не произойдет, ведь даже несмотря на то, что демон всемогущ, для выполняемой работы ему нужно открывать и закрывать заслонку, а также знать, какие молекулы подлетают к ней. Для получения такой информации необходимо, например, направлять на молекулы электромагнитное излучение и принимать отраженные сигналы, что невозможно сделать без затрат энергии.

По прошествии более века после того, как Максвелл придумал своего демона, все чаще и чаще стали появляться сообщения о создании искусственных *наномашин*, *нанороботов*, принцип действия которых схож с работой того самого демона из XIX века.

Возьмем, к примеру, разработанный недавно наноклапан, разрешающий движение молекул лишь в одном направлении. Такая наномашинка представляет собой молекулярную структуру под названием ротаксан, состоящую из длинной

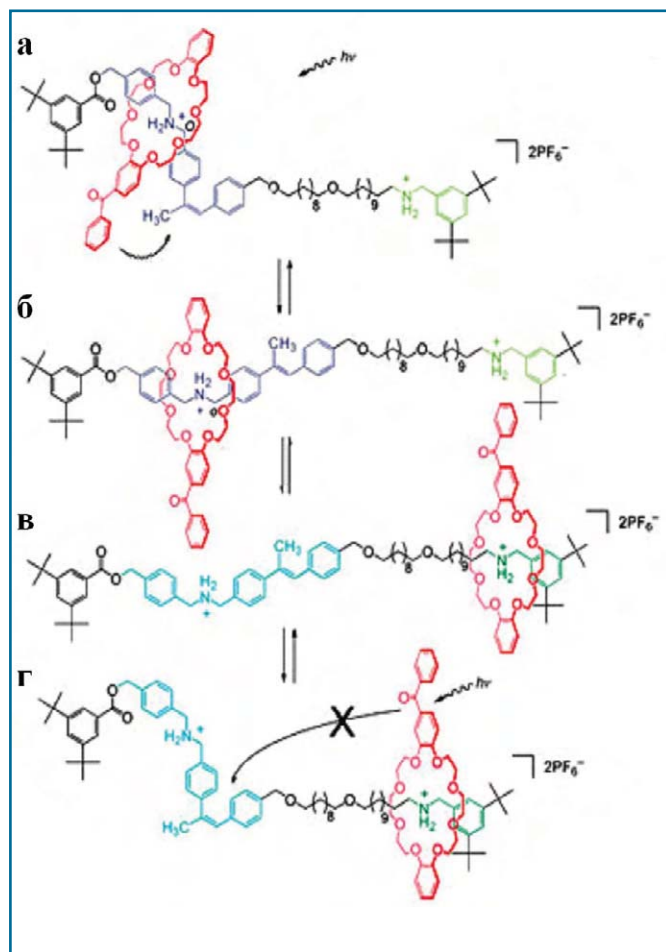


Рис. 2. Строение наноклапана, контролирующего движение молекул

гантелеобразной молекулы с объемными углеводородными группами на концах, «опоясанной» другой циклической структурой (обозначена красным на рис. 2). В нормальном состоянии ротаксановый стержень изогнут, в результате чего молекулярный цикл оказывается зажат между объемными группами (рис. 2а). Однако под воздействием света происходит изменение углового конфигурации углеводородного фрагмента на линейный, приводящее к свободному перемещению молекулярного кольца к противоположному концу «гантели» ротаксана (рис. 2б,в). Таким образом, в предлагаемом приборе обозначенный синим структурный фрагмент играет роль активируемых светом «ворот». Через некоторое время за счет светопоглощающих молекул растворителя, в котором находятся молекулы ротаксана, возбуждение в системе гасится, и углеводородная цепь вновь изгибается – молекулярные ворота запираются (рис. 2г).

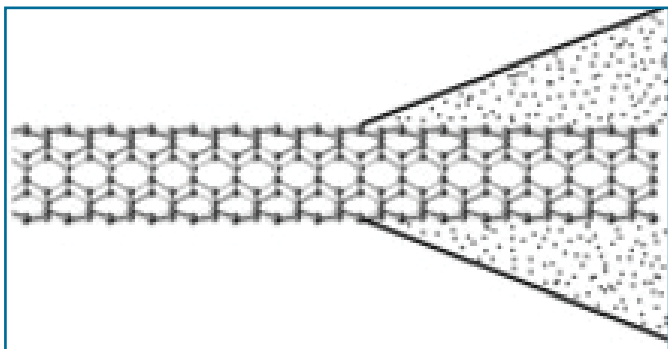


Рис. 3. Упрощенная схема теплового диода. Решетку нанотрубки с одного конца закрывает конус из аморфного композита

Другой иллюстрацией к проделкам демона Максвелла является недавно созданный твердотельный термический выпрямитель или термический диод, представляющий собой одномерную проводящую систему – *углеродную нанотрубку* или нанотрубку из нитрида бора, у которой на одном конце сосредоточено больше массы, чем на другом. Для создания разницы в распределении массы нанотрубки покрывались неравномерным слоем специально подобранного аморфного материала. Модифицированную

таким образом нанотрубку закрепляли между электродами, служившими нагревательным элементом на одном конце трубки и термодатчиком на другом. Нагревая попеременно то один, то другой край трубки, исследователи измеряли ее теплопроводность. Оказалось, что при передаче тепла от конца с большой массой к более легкому краю этого устройства по трубке пробегало на 7% больше фононов, чем при передаче энергии в обратном направлении, т.е. происходила потеря теплового равновесия без затраты энергии. Чем вам не демон Максвелла? Конечно, такое отличие в теплопроводности при протекании энергии в разных направлениях – недостаточная для практического использования эффективность. Однако дальнейшие эксперименты с различной конфигурацией нанотрубок, вариацией химического состава аморфного материала, возможно, приведут в будущем к созданию более эффективного устройства, теплопередача которого зависит от направления потока энергии. И тогда мы не раз еще вспомним демона Максвелла и поразимся гениальности его создателя.

Литература:

1. Serreli V., Chin-Fa Lee, Kay E.R., Leigh D.A. Nature. 2007. Vol. 445. P. 523.
2. Chang C.W., Okawa D., Majumdar A., Zettl A. Science. 2006. Vol. 314. P. 1121.