

Baglæns varmestrømning

Varme, der strømmer fra et koldt legeme til et varmere, lyder som et brud på fysikkens love. Men på den meget lille skala i naturen kan det faktisk ske, viser eksperimenter. Heldigvis bryder vores verdensbillede ikke sammen af den grund.

Forfatteren



Alberto Imparato er lektor i statistisk fysik, Institut for Fysik og Astrofysik, Aarhus Universitet
imparato@phys.au.dk

Lad kaffekoppen stå på bordet, og kaffen begynder af sig selv at blive varmere eller måske endda at koge over. Det ville sikkert glæde en del og brænde tungen på andre, men det ville også få en del fysikere til at få bekymrede rynker i panden på vegne af termodynamikkens anden hovedsætning.

Umiddelbart forventer man jo, at der skal tilføres energi for at få varme til at strømme fra et koldere sted til et varmere – det sker ikke bare af sig selv. Men det er ikke desto mindre netop det, vi har observeret i eksperimenter. Du skal bare ikke

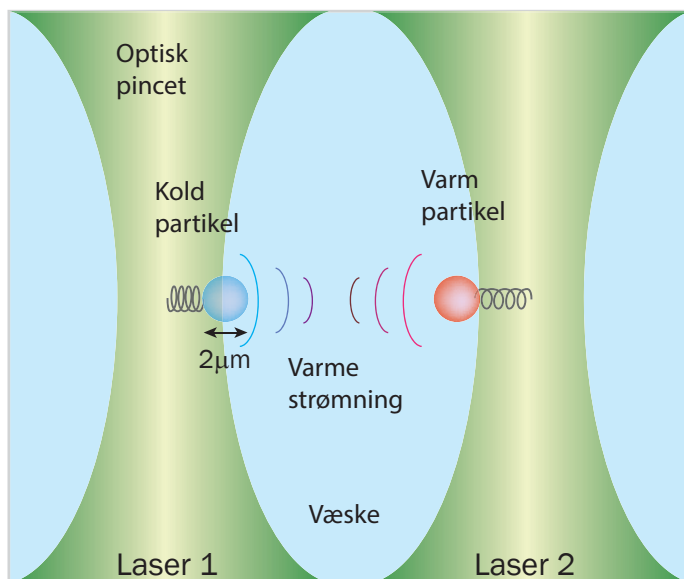
forvente, at det sker i selv den mindste kop cappuccino – vi skal helt ned i mikro- og nanopartikelnes verden.

En lidt anderledes fysisk lov

Termodynamikkens anden hovedsætning er noget speciel sammenlignet med andre fysiske love som Newtons tyngdelov eller bare termodynamikkens første hovedsætning.

Fysiske love udtrykker som regel en matematisk relation imellem forskellige størrelser udtrykt ved en formel, hvor en eller flere fysiske størrelser kan findes som funktion af andre fysiske størrelser. Fx udtrykker termodynamikkens første hovedsætning energibevarelse: Den totale energi i en termodynamisk proces er givet ved summen af arbejde og varme. Til forskel fra dette, siger den anden hovedsætning noget om, i hvilken retning processen foregår i stedet for at beskrive forhold imellem fysiske størrelser. Omsat til ord kan loven udtrykkes som: "Varme kan ikke strømme fra et koldere til et varmere sted, uden at der udføres eksternt arbejde."

Det typiske eksempel er køleskabet. Det koldere sted er skabets indre, og det varme er køkkenet udenom. Køleskabet fungerer kun, hvis man sætter stikket i stikkontakten og tænder for strømmen. På den måde udfører den elektriske strøm et arbejde (med at drive en pumpe). Mere formelt sagt, så indfører man en tilstandsfunktion, som kaldes entropi, og man postulerer, at i et lukket system kan entropien ikke mindskes – kun blive større eller forblive konstant. Sætningen ovenfor om varmestrøm er den sædvanlige måde at udtrykke termodynamikkens anden hovedsætning på, og den er den direkte konsekvens af den mere formelle påstand.



Principillustration af den eksperimentelle opstilling. To små partikler af silika er fanget i fokuset af to laserstråler og holdes ved forskellige temperaturer. De små "fjedre" indikerer, at partiklerne kan bevæge sig en smule mod hinanden, og de vekselvirker via den omgivende væske.

Den klassiske termodynamik blev formuleret i løbet af 1800-tallet, da fysikerne beskæftigede sig med forholdene omkring store maskiner, fx effektiviteten af en dampmaskine. Den anden hovedsætning afspejler, at det ikke er muligt at følge bevægelsen for et enkelt atom i et makroskopisk fysisk system, eller sagt med Maxwells ord: »loven er utvivlsomt sand, så længe vi kun kan beskæftige os med mangelegemesystemer og ikke har midler til at studere eller håndtere de enkelte molekyler, som systemerne består af.«

Varmestrømning på mikrometer-skala

Man kan så spekulere over, hvad der sker med termodynamikkens anden hovedsætning, når man faktisk har at gøre med små systemer med få frihedsgrader. Her er den indre energi af samme størrelsesorden som den termiske energi for omgivelserne. Noget sådant er fx tilfældet i nanomaskiner, som kan være naturlige eller menneskeskabte motorer, som omsætter kemisk energi til mekanisk energi. Denne type maskiner er fx ansvarlige for aktiv transport i de levende celler.

Og når man undersøger sagen nærmere finder man faktisk, som Maxwell indså, at mikroskopiske systemer som nanomotorer ikke blot er nedskalerede versioner af deres makroskopiske fætre.

I et studie, som for nylig er publiceret i tidsskriftet *Physical Review Letters*, har vi studeret energistrømmen imellem to partikler i mikrometerstørrelse (1/1 000 000 meter), som var fanget med en laserpincet og holdt ved forskellige temperaturer.

Fra den makroskopiske termodynamik ved vi, at så snart der opstår en temperaturforskul imellem de to systemer, vil varmen begynde at strømme fra den varme side til den kolde side af systemet. Det, vi ser, er, at der er en – godt nok meget lille – sandsynlighed for, at det omvendte sker. Med andre ord ser vi, at i løbet af et stykke tid kan varmen strømme fra det kolde legeme til det varme, uden at vi udefra udfører arbejde på systemet.

Paradigmeskift fremfor lovbrud

Modsigelsen af anden hovedsætning er dog kun tilsyneladende. Når man gentager eksperimentet mange gange, bliver gennemsnitsresultatet som ventet: At den gennemsnitlige varmemstrøm går fra det varme til det kolde, ganske som anden lov siger. Men på et eller andet givet tidspunkt er der altså en sandsynlighed forskellig fra nul for, at varmen går den modsatte vej. Sandsynligheden skrumper blot til ingenting, jo længere tid forsøget forløber. Forløbet for sandsynligheden følger en eksakt matematisk sætning, som kaldes fluktuationssætningen. De forsøg, vi har udført understreger altså, at entropien er en statistisk værdi, ganske som Maxwell nævnte. Så når vore nye resultater ikke er et egentligt "lovbrud" er det fordi, forståelsen af termodynamikkens 2. hovedsætning har ændret sig fra at skulle fortolkes absolut til at være statistisk baseret.

Denne forståelse er helt essentiel, når man betragter små systemer. Vore grundlæggende resultater kan bane vejen for design af mikro-maskiner og hjælpe med en øget forståelse af, hvordan eksempelvis biologiske processer på celleniveau er termodynamisk mulige. ■

Videre læsning

James Clerk Maxwell (1872): *Theory of Heat*. New York: D. Appleton & Co.

Forskningsartiklen A. Béruit, A. Imparato, A. Petrosyan, S. Ciliberto (2016): Stationary and transient Fluctuation Theorems for effective heat flux between hydrodynamically coupled particles in optical traps. *Physical Review Letters* i februar 2016.

Artiklen er oversat af Ole J. Knudsen

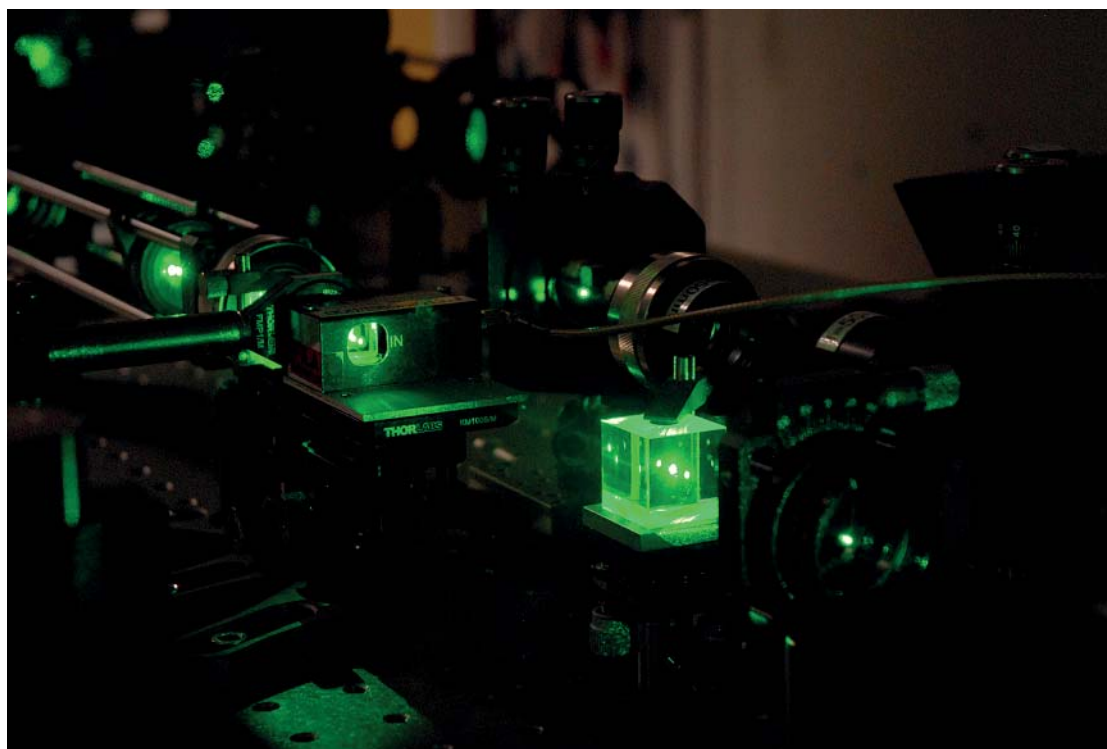


Foto af den eksperimentelle opstilling med lasere på ENS Lyon, Frankrig. Denne opstilling blev brugt til de beskrevne eksperimenter.