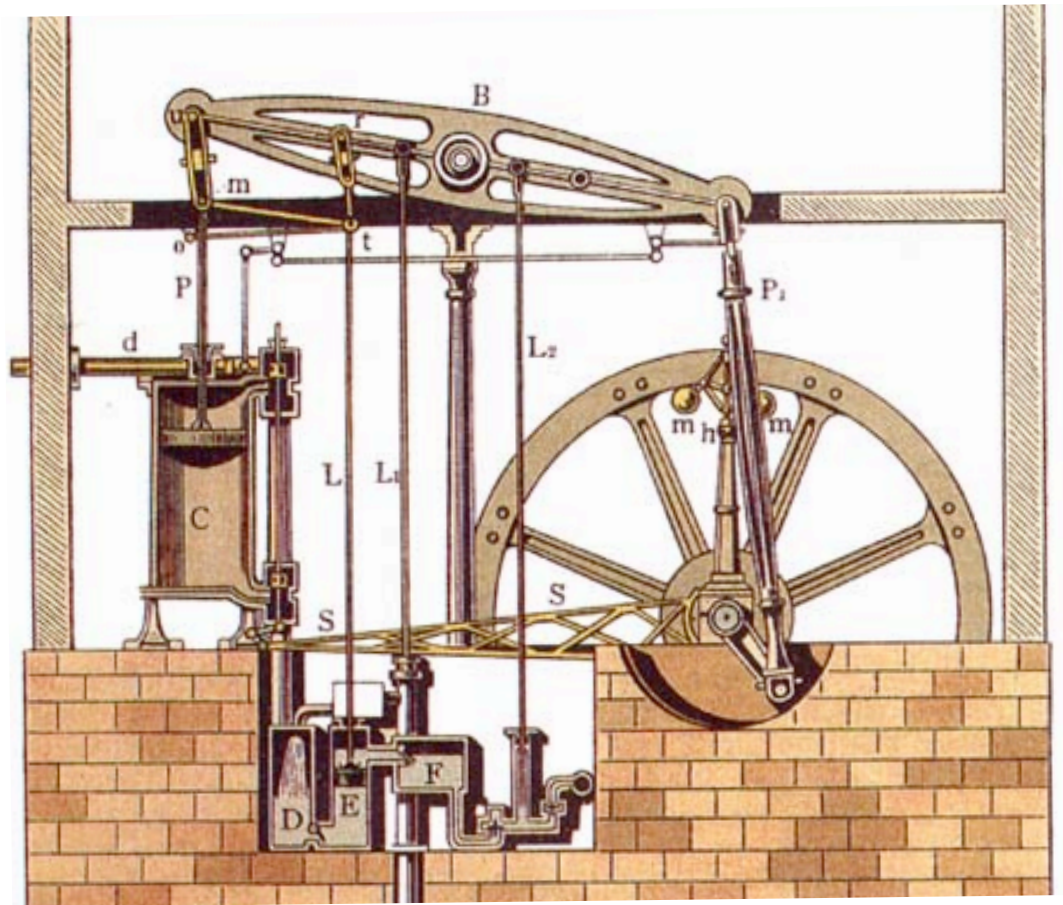


# ENTROPIA

Bigarren Legeak, eta entropiak berak, garrantzia izugarria dute Zientziaren osotasunean, eta, beraz, gizakiok dugun Unibertsoaren ulertze arrazionallean: Bigarren Legeak eta entropiak *edozein* aldaketaren jatorriaz hornitzen gaituzte. Ez dute soilik motorren funtzionamendua edo erreakzio kimikoen gertatzea azaltzen; berebat azaltzen dute erreakzio kimikoen ondorioz finenak: gizakion kulturaren sortze-ekintza literarioa, artistikoa eta musikala.



## Termodinamikaren 2. legea entropia

Termodinamikaren lege baten formulazioak eta interpretazioak sistemaren propietate bat dakar ondorioz: Zero Legetik,  $T$  temperatura sortzen da; eta  $U$  barne-energia, Lehen Legetik. Modu berean ere, Bigarren Legearen ondorioa da beste propietate termodinamiko bat existitzen dela: *entropia* ( $S$  ikurraz adierazten da). Ideiak finkatzeko asmotan esan dezagun ezen  $U$  barne-energiak sistema batek duen energia *kantitatea* adierazten duela, eta  $S$  entropia energia horren *kalitatearen* neurria dela: entropia handia kalitate txikia da; entropia txikia, aldiz, kalitate handia.

Zientziaren indarra abstrakzioetik dator. Nahiz eta sistema konkretu baten behatze arretatsuak Izadiaren ezaugarri bat azalera dezakeen, argituz, behatze hori era abstraktoan jarritz haren aplikazio-maila erabat heda daiteke. Bigarren Legea lurrin-makinaren behatzetik ondorioztatu zen, baina edozein aldaketari aplikatu dakioke, era abstraktoan adieraziz gero. Hots, lurrin-makinak aldaketaren funtsa barneratzen du; gizakion ekintza denak, digestioetik sortze artistikoraino, lurrin-makinaren funtzionamenduaren oinarriak azaltzen ditu.

# Lurrun-makina eta 2. legea

## Sadi Carnot

Lurrun-makina galdarak, balbulek, hodiekin eta pistoiek osatzen dute. Baina makinaren funtsa errazagoa da, honako hauek osatzen dute: energia beroa duen iturria (tenperatura handian dagoen iturria, *bero-iturri beroa*), beroa lan bihurtzen duen mekanismo bat –pistoia, turbina–, eta estolda-zulo hotza (*bero-iturri hotza*), azken horretatik erabili ez den energia desagertarazten da, bero eran. Bero-iturri hotza zer den somatzen beti ez da erraza, ingurunea bera izan baitaiteke, eta ez berenberegir diseinatutako zerbait.

XIX. mendearen hasieran, **Sadi Carnot**-ek, ingeniari gazte frantsezak (1796-1832) Frantziaren botere ekonomikoa eta militarra bultzatu nahi zuen lurrun-makinaren errendimenduaren gaineko murrizketak aztertuz. Garai hartan onartua zen ideiatik abiatu zen Carnot: beroa nolabaiteko jariakin ezin neurtuzkoa zen, berotik hotzera jariatzen zen, eta lana egiteko gai zen, gradientean behera, ur-errota higiarazten duen uraren antzera. Eredua ez zen zuzena, eta, halere, Carnot-ek emaitza zuzena eta harrigarria ondorioztatu zuen: lurrun-makina ideal baten errendimendua ez dago lan-substantziaren mende, baizik eta tenperaturen mendekoa da, beroa hartzen den bero-iturri beroaren tenperatura eta kanporatzen den bero-iturriaren tenperatura hotza.

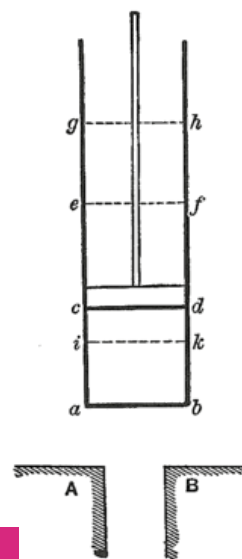
Lurrun-makinaren errendimendua –makina termikoarena, oro har– honako era honetan definitzen da: ekoizten duen lanaren eta xurgatzen duen beroaren arteko zatidura da. Hortaz, bero osoa lan bihurtuko balitz, haren zatiren bat bera ere ez kaporatu gabe, orduan, errendimendua 1 litzateke. Carnot-ek honako adierazpen hau ondorioztatu zuen, adierazpena da  $T_{iturri\ bero}$  eta  $T_{iturri\ hotz}$  tenperatura absolutuen artean dabilen makinari dagokion errendimendu maximoa:

$$errendimendua = 1 - T_{iturri\ hotz} / T_{iturri\ bero}$$

Hain erreza den adierazpen hori termodinamikoki ideala den edozein makinari dagokio, eta ez da makinaren diseinuaren mendekoa. Adierazpen horrek errendimendu teoriko maximoa damaigu, eta nahiz eta esfortsu handiz makinaren diseinua hobetzen saiatu ez dago hark finkatutako balioa gaiztatzetik. Esaterako, zentral elektriko baten turbinei 300 °C-an (573 K) dagoen lurrun gainberotua ematen bazaie, eta galtzen den beroa ingurunera, 20 °C-an dagoena (293 K), kanporatzen uzten bazaie, errendimendu maximoa 0,46 da; hortaz, erragailuak erretzen duen erragaitik sortzen den beroaren 46% baino ezin da elektrizitate bihurtu; eta tenperatura horiek finkoak izanik, ez dago disenurik errendimendua hobetuko duenik. Bihurtze-errendimendua hobetzeko bi modu dago: ingurugiroaren tenperatura txikitzea edo, ostantzean, tenperatura handiagoko lurruna ematea turbinei. Errendimendua 100% izateko, ingurunearen tenperaturak nulua izan beharko luke ( $T_{iturri\ hotza} = 0$ ), edo lurrunaren tenperaturak infinitua ( $T_{iturri\ bero} = \infty$ ); bi horiek ezinezkoak dira.



Sadi Carnot-ek bere lenean proposatutako motorraren eskema



## 2. legearen 2 enuntziatu

### Kelvin-en eta Clausius-en enuntziatuak

**Mendeak aurrera egin zuten, eta beroari buruzko ardura areagotu zen; bi erraldoi intelektualek *aldaketa* aztertu zuten, izan ere beste ikuspegi bat erabili zuten beroa lan bihurtzea aztertzeko.**

Erraldoietan lehenak, **William Thomsom**-ek – Lord **Kelvin** (1824-1907)– makina termikoaren funtsezko egituraz hausnartu zuen: ikustezina ezinbestekotzat jo zuen, bero-iturri hotza –askotan ingurunea bera; diseinatu gabekoa, beraz– funtsezkoa zela aurkitu zuen; konturatu zen iturri hotzik gabe makinak ezin zuela funtzionatu. Zehatz dezagun; honako hau da *Kelvin*-en Termodinamikaren Bigarren Legearen enuntziatua:

*ez da existitzen ziklikoa den prozesurik zeinean bero-iturri batetik xurgatutako beroa oso-osorik lan bihurtzen den.*

Beste modu batean esateko: izadiak zerga ezartzen dio beroa lan bihurtze prozesuari: bero-iturri berotik lortzen den energiaren zati bat inguruneari bero moduan eman behar zaio. Estolda-zulo hotzak derrigorrean egon behar du, nahiz eta identifikatzen erraza izan ez, beti ez baita diseinatzen. Zentral elektrikoetako hozketa-dorreak, zentzu horretan, beraz, garrantzitsuagoak dira haien funtzionamenduarentzat, turbina konplexuak edo errektore nuklear garestia baino.

Bigarren erraldoia **Rudolf Clausius** (1822-1888) izan zen. Horrek prozesu errazaz pentsatu zuen: temperatura ezberdinetan dauden gorputzen arteko bero-fluxuaz, hain zuzen. Eguneroko fenomenoak identifikatu zuen: energia berez joaten da temperatura handian dagoen gorputz batetik temperatura txikian (txikiagoan) dagoen gorputz batera. Are gehiago, Clausius konturatu zen alderantzizko prozesua, gorputz hotz batetik gorputz bero baterako bero-transferentzia –hots, temperatura txikian dagoen gorputz batetik temperatura handian (handiagoan) dagoen gorputz baterakoa– ez dela berezkoa. Izadiko asimetria bat aurkitu zuen: energiak gorputz beroetatik gorputz hotzetara bero eran pasatzeko joera dauka; baina kontrako pasatzea ez da berezkoa. Agerikoa den baieztapen hori honako era honetan, Termodinamikaren Bigarren Printzipioaren *Clausius*-en enuntziatuaz ezaguna den eran, birformulatu zuen:

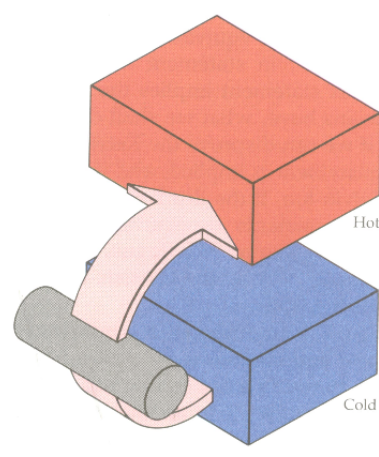
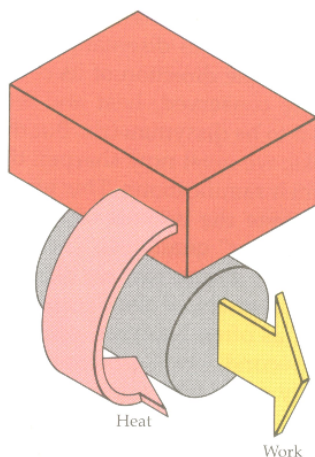
*beroa ez da transferitzen temperatura txikian dagoen gorputz batetik temperatura handiagoan dagoen beste gorputz batera, prozesu horrekin batera beste tokiren batean bestelako aldaketarik gertatzen ez bada behintzat*

#### Espontaneo (berezko)

Termodinamikaren arabera *espontaneo* hitzak adierazten du gertatzeko ez duela behar inolako lan motarik. Orokorrean, “espontaneo” eta “berezkoa” (naturala) sinonimoak dira. Kaleko hizkuntzan ez bezala, termodinamikan, espontaneoak ez dauka abiadurarekin konnotaziorik. Termodinamikan, espontaneo hitzak adierazten du aldaketek duten gertatzeko *joera*. Nahiz eta zenbait berezko aldaketa azkarak izan (gas baten espantsio askea, esaterako), beste batzuk izugarri motelak izan daitezke (adibidez, karbonoa diamante bihurtzea). Espontaneotasunak joerari dagokio, eta, izan ere, ez du zertan gertatu: joera nahikoa da. Clausius-en arabera, energiak joera dauka goi-tenperaturetatik behe-tenperaturetara jariatzeko, baina prozesu horren berezotasuna apur zitekeen isolatzaileraren bat bi temperaturen artean tartekatuz.

Beroa transferitu daiteke “okerreko” (berezkoa ez den) noranzkoan, baina transferentzia hori lortzeko lana egin behar da. Esandako hori eguneroko bizitzan beha daiteke: hozkailuan sartuz objektuak hoztu daitezke, prozesu horretan objektuetatik beroa ateratzen da eta epel(ago) dagoen ingurunean uzten; baina hori lortzeko lana egin behar da: hozkailuak jarduteko elikadura-iturri bateri konektatuta egon behar du; hots, oso urrun egon daitekeen zentral elektriko batean erretzen den erregailua da ingurunean gertatu behar den azken aldaketa hoztea gerta dadin.

*Kelvin*-ek (ezkerrean) eta *Clausius*-ek (eskuinean) egindako behaketak honako hauek dira, hurrenez hurren: estolda-zulo hotza (bero-iturri hotza) guztiz beharrezkoa da makina termikoaren funtzionamenduarentzat at eta beroa ez doa berez gorputz hotz batetik bero batera.



# Entropia

## entropiaren enuntziatua (I)

**Kelvin-en eta Clausius-en enuntziatuak behaketen ondorioak dira. Ez da inoiz eraiki estolda-hotzik gabeko makina termikoa, nahiz eta askotan zer den somatzerik ere ez dagoen. Berebat, inoiz ez da behatu gorputz bat haren ingurunearen tenperatura baino tenperatura handiagoa berez pasatzen.**

**Adierazi diren moduan enuntziatu horiek izadiaren legeak dira, behaketa orokorren ondorioak baitira. Ba al dira Bigarren Legeak? Zergatik ez da izendatu Kelvin-en enuntziatua Bigarren Lege, eta Clausius-ena, Hirugarrena?**

Erantzuna da, logikaren ikuspegitik, bi enuntziatuak baliokideak direla: bi enuntziatuek elkarri inplikatzeko diete. Praktikan, erabilgarria da Bigarren Legearen bi enuntziatu izatea; haxe da: bi enuntziatuak bildu eta erraza den enuntziatua aurkitzea.

Lortzeko asmotan Clausius-ek egindako lanari erreparatu eta funtzio termodinamiko berria definituko dugu:  $S$ , entropia.

### Entropia, $S$

Entropia hitzaren jatorri etimologikoa “*bueltatzen dena*” hitz grekerretan dago, eta ez da oso lagungarria adierazten duena ulertzeko. “ $S$ ” izkia, arbitrarioki, hautatu zen hura adierazteko, hark duen forma esangurarekin lotuta zegoelakoan. Dena dela hautua egokia izan zen: izki hori ez zegoen erabilita ordura arte ezagutzen ziren propietate termodinamikoak adierazteko, alfabetoaren bukaera aldera zegoen, eta  $P, Q, R, T, U$  eta  $W$  zegoeneko erabiliak ziren hizkiengatik gertu zegoen.

Clausius-ek honako era honetan definitu zuen sistema baten entropia-aldaketa: bero eran transferitutako energia eta transferentzia hori gertatu den tenperatura absolutuaren arteko zatidura:

$$\text{Entropia-aldaketa} = \text{era itzulgarrian} \\ \text{transferitutako beroa} / \text{tenperatura}$$

“Era itzulgarrian” baldintza garrantzitsua da: onartu behar da bero-trukea gertatzen dela sistema eta ingurunearen arteko tenperatura-diferentzia infinitesimala dela-eta. Garrantzia handikoa da agitazio termikoko gune zurrumbilotsurik ez agertzea.

Arestian aipatu da entropia dela metaturik dagoen energiaren “kalitate”aren neurria: aurrera egiten dugun heinean “kalitate”a zer den argituko dugu. Lehenik eta behin, entropia eta desordena identifikatuko ditugu: materia eta energia era desordenatuan banatzen badira, gas batean gertatzen den moduan, entropia handia da; materia eta energia era ordenatuan metatzen badira, aldiz, entropia txikia da, azken hori da kristal baten kasua. Desordenari buruzko ideia hori gogoan dugula, Clausius-en enuntziatuaren ondorioak aztertuko ditugu, eta baieztatuko dugu

hark barneratzen duela entropia dela sistemaren desordenaren neurria.

Clausius-en entropia-aldaketaren definizioa argitzeko irudikoa honako hau izan daiteke: liburutegi batean edo kale jendetsuan barrena ez zut egitea. Liburutegia da tenperatura txikian dagoen, agitazio termiko txikiko, sistemaren metafora; ez zut egitea da bero erako energia transferentzia. Liburutegi isilean bat-batean ez zut egitea oso aztoratzailea da: desordena gora egiten du hein handi batean. Aldiz, beste muturrean, kale jendetsua da tenperatura handian dagoen, agitazio termiko handiko, sistemaren metafora: kale horretan ez zut egite berberak desordena txikia eragingo du, entropia-aldaketa txikia, beraz. Argi dago bi kasuetan ondoriozta daitekeela entropia-aldaketak izan beharko lukeela tenperaturaren berreturaren batekiko alderantzizko proportzionala ( $T$ -rekiko, esaterako), entropia-aldaketa handiena tenperatura txikienean gertatzen baita. Bi kasuetan gehitutako desordena ez tularen (bero eran transferitu den energia) proportzionala da, edo kantitate horren berreturaren batekikoa (lehena, kasu honetan). Clausius-en adierazpenak bat egiten du metafora honekin.

### Adibidea

Entropia-aldaketa da sistematik (sistemari) bero eran transferitu (era itzulgarrian!) den (zaion) energia (jouletan) eta transferentzia gertatzen den tenperaturaren (kelvinetan) arteko zatidura; beraz, haren unitateak  $\text{J K}^{-1}$  dira. Adibidez, onar dezagun  $1 \text{ kW}$ -eko berogailua tanga batean,  $20^\circ\text{C}$ -an ( $293 \text{ K}$ ) bera, murgiltzen dugula, eta  $10 \text{ s}$ -an martxan jartzen dugula; modu horretan, uraren entropia  $34 \text{ J K}^{-1}$  kantitatean jaso dugu.  $20^\circ\text{C}$ -an dagoen termoak  $100 \text{ J}$  askatzen baditu haren entropiak  $0,34 \text{ J K}^{-1}$  kantitatean beheratzen da.



# Entropia

## entropiaren enuntziatua (II)

Termodinamikaren Bigarren Legea entropiaren funtzioan adieraz dezakegu eta, berebat, frogatu dezakegu enuntziatu bakar batek Kelvin-en eta Clausius-en enuntziatuak barneratzen dituela. Honako hau da aipatutako enuntziatu bakarra:

*berezko aldaketa orok unibertsoaren entropia handitzen du*

Aurreko enuntziatuan gakoa *unibertsoa* hitza da; termodinamikan, unibertsoa da sistema gehi ingurunea. Ez da ezinezkoa sistemak edo inguruneak *bakoitzak* bere aldetik entropiaren beherapena izatea, tokiren batean beherapen hori konpentsatzen duen beste aldaketaren bat badago.

Ikus dezagun Kelvin-en enuntziatua entropiaren enuntziatuan barneratuta dagoela; horretarako, kalkula ditzagun estolda-zulo hotzik gabeko makina termikoan gertatzen diren bi entropia-aldaketak (alboko irudia). Iturri beroak beroa askatzen duenean, sisteman entropia-beherapena gertatzen da. Energia hori inguruneari transferitzen zaionean lan moduan, ez dago entropia-aldaketarik, entropia-aldaketak bero-transferentzien bidez adierazten baitira. Ez dago beste inolako aldaketarik. Beraz, aldaketa osoa unibertsoaren entropia-beherapena da, bigarren legearen aurka dagoena. Hortaz, estolda-zulo hotzik gabeko makina termikoak ezin du lanik egin.

Estolda-zulo hotza duen makina termikoak lan egin dezakeela konprobatzeko, makina termiko erreala pentsa dezagun. Bero-iturriak beroa askatzen duenean bero eran, entropiak behera egiten du, eta az dago entropia-aldaketarik bero horren zatiren bat lan bihurtzen denean. Dena dela, energia dena lan bihurtzen ez badugu, zerbait alperrik galduko dugu, bero eran, bero-iturri hotzean. Bero-iturri hotzaren entropiak gora egingo du eta, haren tenperatura behar bezain txikia bada, bertan utzitako bero-kantitate txikiak ere entropia jaso egingo du, eta bero-

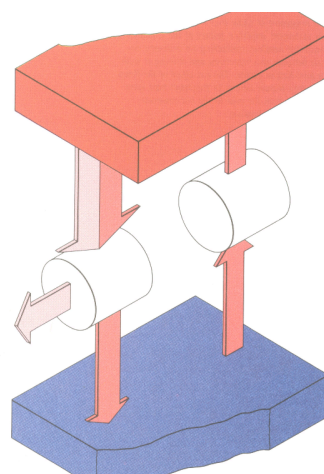
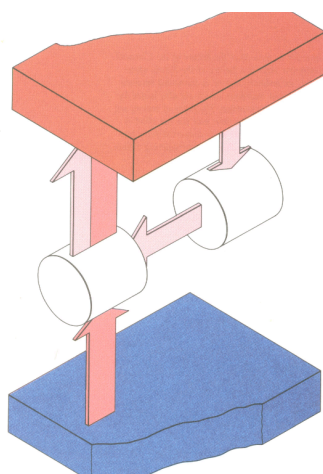
iturriari gertatu den entropia-beherapena, konpentsatuko. Beraz, oro har, unibertsoan, entropiak gora egiten du, baina soilik estolda-zulo hotza existitzen bada, zeinean ekarpen positiboa sor daitekeen. Horixe da edozein makina termikotan derrigorrean estolda-zulo hotza izateko zergatia: entropiak gora egin dezake soilik bero-iturri hotza badi; eta makinak beroa erabiliz lan egin dezake soilik prozesu osoa berezkoa bada.

Bero-iturritik lortutako energiari bero-iturri hotzean askatu beharreko zatia eta, horrexegatik, lan bihurtzeko erabili ezin izango den energia zatia, bero-iturri beroaren eta hotzaren tenperaturen mendekoa baino ez da. Are gehiago, askatu beharreko energia kantitate minimoa – beraz, beroa lan bihurtzeko lor daitekeen errendimendu maximoa – Carnot-en adierazpenak damaigu.

Azter dezagun Clausius-en enuntziatua entropiaren ikuspuntutik. Bero-iturri hotza energia kantitatearen bat askatzen badi, bero eran, bere entropiak behera egingo du. Beherapen handia izango da, gorputza hotz baitago. Bero kantitate berbera bero-iturri beroari transferitzen zaio; entropiak gora egingo du, baina, tenperatura handiagoa denez, gertatzen den entropia-aldaketa txikia da eta argi dago bero-iturri hotzean gertatu den entropia-beherapena baino txikiagoa. Oro har, beraz, entropiak behera egiten du, eta prozesua ez da berezkoa: horixe da, hain zuzen, Clausius-en enuntziatuaren ondorioa.

Entropia kontzeptuak bigarren legearen bi enuntziatu fenomenologiakoak barneratzen ditu, alde batetik; eta, bestetik, aldaketaren berezkitasunaren adierazgarri da. Lehen legeak eta barne-energiak aldaketa *gertagarriak* identifikatzen dituzten, asmatutako aldaketetan. Bigarren legeak eta entropiak aldaketa posibleetan *berezko aldaketak* identifikatzen dituzte: gertagarria den prozesua berezkoa da baldin eta soilik baldin unibertsoaren entropia handitzen bada.

Kelvin-en eta Clausius-en enuntziatuen interpretazioak entropia erabiliz. Kelvin-en enuntziatuaren aurka doan makinak (ezkerretara) entropia-beherakada dakar ondorioz. Clausius-en aurka egiten duen prozesuak (eskuinean) entropiaren beherakada garbia dakar ondorioz, gorputz hotzean gertatzen den beherakada, gorputz beroan gertatzen dena baino handiagoa baita, eta ez dago bestelako aldaketarik.



# Entropia

## entropiaren interpretazio estatistikoa

Entropiaren interpretazio molekularra eta desordenaren neurriaren interpretazioa. Zenbait prozesurekin lotutako entropia-aldaketa modu errazean aurrean badaiteke ere, entropia desordenaren neurritzat joz gero, aldaketaren zenbakizko balio erreala kalkulatzeko ez da hain erraza. Esaterako, gas baten zabaltze isotermoak haren molekula eta energia konstantea bolumen handiago batean banatzen ditu; beraz, sistema ez da hain ordenaturik egon, hots, molekula jakin baten energia eta kokapena aurreateko, era arrakastatsuan, probabilitatea txikiagoa da: hortaz, entropiak gora egiten du.

Korapilotsuagoa den era batean ere hel gaitezke emaitza berberak: era horrek “desordena”ren irudiko egokia agiten du, honako hau da: imagina ditzagun partikulak sailkatuta kutxa batean konfinaturik dauden (potenzial-ozin infinitua) partikulek dituzten energia-maila berezien arabera. Mekanika kuantikoaren bidez posibleak diren energia-maila horiek kalkula daitezke. Emaizta nagusia hau da: kutxako hormak zenbat eta aldenduago egon, hainbat eta gertuago egongo dira energia-mailak enkarrengandik. Giro-tenperaturan milaka milio maila betetzen dituzte molekulak: molekulen banaketa da tenperatura horri dagokion Boltzmann-en banaketa. Kutxa zabalduz doan heinean, Boltzmann-en banaketak geroz eta maila gehiago barneratzen ditu eta, ondorioz, geroz eta zailagoa da aurreateko zein energia-maila dagokion zori hautatu den partikula bati. Molekulak betetzen duen energia-mailarekin lotutako areagotzen doan ez-jakintasuna da, hain zuzen, sistemaren “desordena”: horri entropia handiagoa dagokio.

Antzeko zerbait esan daiteke entropia-aldaketaz gas lagin baten tenperaturak gora egindakoan. Clausius-en definizioa oinarrituriko termodinamika klasikoko kalkulu errazaren arabera tenperaturak gora egiten duenean entropiak gora egin behar du. Gorakada hori erraz

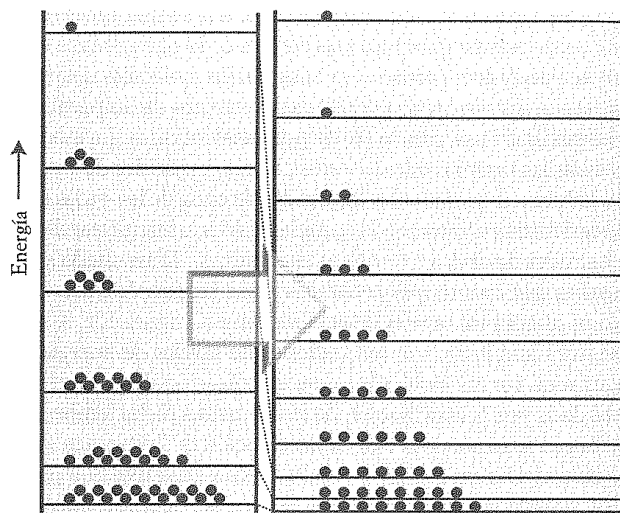
uler daiteke ikuspegi molekularra erabiliz: bolumena konstante mantenduz, tenperaturak gora egiten badu, Boltzmann-en banaketaren buztana luzatzen da, eta, beraz, energia-maila gehiago barneratzen ditu. Beste behin, hortaz, zorizko eran hautatutako molekula baten energia-maila zein den esateko probabilitatea txikiagoa da, desordena handitzen da, eta, ondorioz, entropiak gora egiten du.

Hau da galdera, beraz: zer da entropiaren balioa zero absolutuan? Boltzmann-en banaketaren arabera,  $T=0$  denean, zero absolutuan, sistemaren “oinarriko egoera” (energiaren eskalan, lehen egoera, energiari txikienekoa) baino ez dago beterik. Orduan, horren arabera ziur egon gaitezke ezen itxu-itxuan (zoriz) aukeratutako molekula baten egoera oinarrikoa izango dela: ez dago energia-abanaketari buruzko ziurgabetasunik, eta, hortaz, entropia nulua da.

Ludwig Boltzmann-ek adierazpen arraz erraza proposatu zuen sistema baten entropia absolutua adierazteko:  $S = k \ln W$ .

Adierazpenean agertzen den  $k$  konstanteari Boltzmann-en konstante deritzen. Nepertar funtzioaren zenbakiak ( $W$ ) esangura sakona dauka: sistemaren energia osoa konstante mantenduz, “konfigurazio” (energia-banaketa) baten pisua adierazten du; hots, energia jakinerako, molekulen konfigurazio ezberdinen kopurua da. Adierazpen hori termodinamika klasikoa bera baino zailagoa da erabiltzen, izan ere, termodinamika estatistikoko kontzeptua da. Esan dezagun, Boltzmann-en adierazpenak balio duela ez bakarrik entropia absolutua kalkulatzeko, baizik eta edozein aldaketarekin lotutako entropia-aldaketa kalkulatzeko. Kasu denetan, jakina, entropia-aldaketen adierazpen denak bat datoz, zehatz-mehatz, Clausius-en definiziotik ondorioztatzen diren horiek.

Kutxa batean sarturik ditugun partikulez osatutako sistemaren (gasaren eredua) entropiak gora egiten du, kutxa bera zabaltzean, kutxaren hormak elkarrengandik aldentuz baitoaz, eta ondorioz, partikulen energia-mailak elkarri urreratzen baitira (hori guztia mekanika kuantikoaren bidez frogatu daiteke). Demagun tenperatura konstantea dela zabaltze-prozesu horretan, Boltzmann-en banaketak energia-maila gehiago bereganatuko ditu, eta itxu-itxuan aukeratutako molekula bat energia-maila jakin batean egoteko probabilitateak behera egiten du. Hots, desordenak eta entropiak gora egiten dute gasak bolumen handiagoa betetzen duenean.



# Entropia

## lurrin-makina, hozkailua, bero-punpa

Entropiaren kontzeptua makina termikoen, bero-punpen eta hozkailuen funtzionamenduaren oinarrian dago. Ikasi dugunaren arabera, makina termikoa dabil bero-iturri hotz batean bero duelako, eta, horrela, desordena sortzen da: desordena horrek konpentsatzen du, eta, gehienetan gainditzen du, bero-iturri beroan gertatu den bero-erako edozein energia-ateratzearekin lotutako entropia-beherakuntza. Makina termikoaren errendimendua Carnot-en adierazpenak ematen digu. Horren arabera, posibleak diren bero-iturrietan tenperaturarik handienekoaren eta txikienekoaren artean lan eginez errendimendu maximoa lortzen da. Hortaz, lurrin-makina batean errendimendu maximoa lortzen da gainberoturiko lurrina erabiliz. Horren arrazoia da iturriaren tenperatura handiak minimo egiten duela bero-xurgapenarekin lotutako entropia-beherakuntza (hobea da kale jendetsuan usin egitea, inor ohartzerik nahi ez badugu, behintzat); eta, horrela, ez-tolda-zulo hotzean entropia gutxiago sortu behar da, goi-tenperaturan gertatu dena konpentsatzeko, eta, ondorioz, energia soberakin hori erabil daiteke makina diseinatu izan den lana egiteko.

*Hozkailuaren zeregina* da objektu bati beroa kentzea eta bero hori inguruneari transferitzea. Prozesu hori ez da berez gertatzen, berarekin batera entropia osoak behera egiten baitu. Hotz dagoen gorputz batetik (liburutegi isila, gure irudikoan) bero kantitate jakina ateratzen denean, ateratzearekin lotutako entropia-beherapena handia da. Bero hori inguruneari pasatzen zaionean, entropiak gora egingo du, jakina, baina handitze hori, aipatutako txikitzea baino txikiagoa da, ingurunearen tenperatura handiagoa baita (kale jendetsua). Orduan, globalki, entropiak behera egiten du.

Entropia-handitze garbia lortzeko, bero-iturri hotzetik ateratzen den energia baino gehiago pasatu behar zaio inguruneari (kale jendetsuan egiten dugun usinak bortitzagoa izan behar du). Beraz, energia gehitu beharra dago. Lortzeko

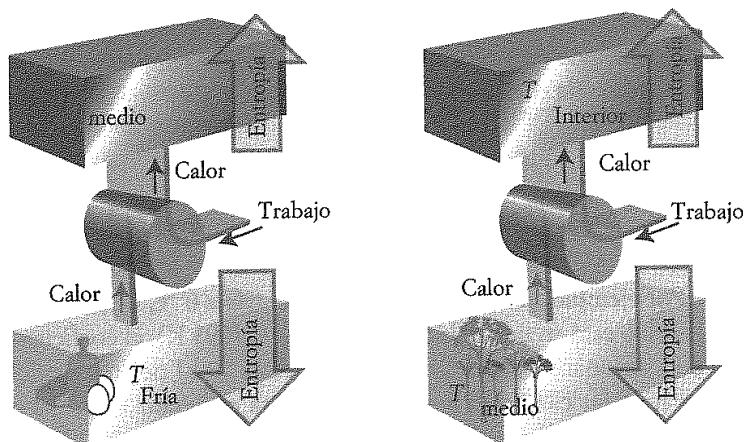
modua da sisteman lan egitea, lan hori energia-fluxuari gehitzen baitzaio.

Lana egiten dugunean, hasieran gorputz hotzetik atera dugun energia, *beroa* + *lan* bihurtzen dugu bukaeran; energia oso hori epelago dagoen inguruneari ematen zaio. Sistema lan nahikoa eginez gero, ingurune epelari energia kantitate handia tranferituko zaio, eta horrekin batera entropiak gora egingo du nabarmen; entropia, oro har, handituko da eta prozesua gerta daiteke. Jakina, hozkailua martxan mantentzen duen lana ekoitzi ahal izateko, tokiren batean berezko prozesuren batek gertatu beharko du, esaterako, urruneko zentral elektriko batean.

Demagun  $T_{hotz}$  tenperaturan dagoen gorputz batetik  $q$  bero kantitatea atera nahi dugula, eta energia hori ingurunean,  $T_{ingurune}$  tenperaturan bera, utzi. Gorputzaren entropia-beheratzea  $q/T_{hotz}$  da. Haatik, sisteman  $w$  lana egiten badugu, jariatuz doan energia  $q + w$  izan arte handituko da. Horren ondorioz, ingurunearen entropia  $(q + w)/T_{ingurune}$  kantitatean handituko da. Aldaketa horrek gorputz hotzaren beheratzea konpentsa dezan  $w$  lanaren balioa finka dezakegu honako hau bete dezan:  $(q + w)/T_{ingurune} = q/T_{hotz}$ , hots,  $w = (T_{ingurune}/T_{hotz} - 1)q$ . Eta funtzionamendu-koefizinetea  $c = q/w$  denez, lortu nahi genuena lortzen dugu. Kontura zaitetz transferitu nahi den bero kantitate jakina transferitu ahal izateko kalkulatu behar den lana lortzeko  $w = q/c$  erabili dugula.

Hozkailua martxan dagoenean, inguruneari ematen zaion energia da gorputz hotzetik ateratakoaren eta gailua martxan izateko erabili denaren arteko batura. Behakizun hori da *bero-punpa*ren funtzionamenduaren oinarria. Bero-punpak gunee bat berotzen du, inguruneetik hartzen duen beroa guneari transferituz. Bero-punpa, futsean, hozkailua da, zeinaren gorputz hotza ingurunea den; horrela, berotu nahi den guneari transferitzen zaio beroa. Orduan, oraingo honetan gure helburua hozkailuaren atzeko aldean dago, eta ez barnean.

Hozkailuan eta bero-punpan parte hartzen duten prozesuak. Hozkailu batean (ezkerrean) epelagoa dagoen ingurunearen entropiak gora egiten du, gutxienez, sistemaren entropiak behera egiten duen heine berean (sistema da hozkailuaren barnealdea). Handitze hori lortzen da jariatuz doan energiari lana gehituz. Bero-punpan (eskuinean) entropiaren handitze garbi berbera lortzen da, baina kasu honetan garrantzia duena da etxebizitza-barneari emandako energia.



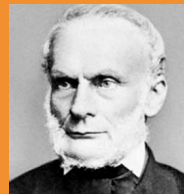
## Laburpena entropia, 2. legea eta lurrun-makina

### entropia

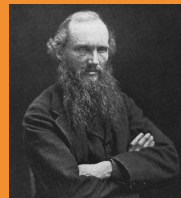
Artikuluaren hasieran esan dugu denok garelako lurrun-makinak; izan ere, egia da lurrun-makinaren interpretazioa abstrakto nahikoa denean. Desordenaren egituraren batek iraun dezala nahi izanez gero, beste tokiren batean desordena-maila handiagoa sortuz egin behar da, horrenbestez, unibertsoaren entropia-handitze netoa izango baita. Desordena hori gertatzen da aipatu dugun zentzu sofistikatuan. Hori guztia egia da, ikusi dugunez, benetako lurrun-makinaren kasuan. Baina, era unibertsalean ere bada egia. Esaterako, barne-konbustiozko motor batean erretzen den hidrokarburo likidoaren ordez 2000 aldiz gehiago betetzen duten gasen nahastura sortzen da (600 aldiz handiago oraindik ere erretzen den oxigenoa kontuan harturik). Are gehiago, errekuntzan askatzen den energia ingurunean barreiatzen da. Motoraren diseinuak desordenaren barreiatze hori bahitzen du eta eraikitze erabiltzen du, adibidez, gutxi ordenaturik dagoen zerbaitetik, adreilu pilo batetik, egituraren bat, eraikuntza bat, sorraraz; edo korrante elektrikoa (elektroien fluxu ordenatua) zirkuitu batean zirkularazteko.

Errekaia janaria izan daiteke. Entropia-handitzearekin lotutako barreiatzea da jakien metabolismoak; hots, metabolismoaren ondoriozko energiaren eta materiaren barreiatzea. Barreiatze hori organismoaren bide biokimikoek aprobetxatzen dute, eta ez pistoiek eta engranajeek osatutako hurrenkera mekanikoak. Bide biokimikoek sortutako egitura aminoazidoetatik abiatuz eraikitako proteinak izan daiteke. Jaten dugu, eta, ondorioz, hazten gara. Egituren izaerak ezberdinak izan daitezke: arte-lanak ere izan daitezke! Jatearen eta digestioaren ondorioz askatutako energiak sor dezakeen egituretako bat da zorizko jarduera neuronal eta elektrikotik eraikitako jarduera elektriko ordenatua. Jaten dugu, eta, ondorioz, sortzen dugu: arte-lanak, literatura lanak eta ezagutza-lanak.

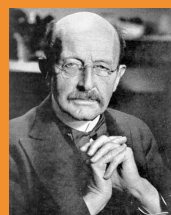
Lurrun-makinak, energia barreiatuz higadura ordenatua (lana) sortzen duen dispositiboa den heinean, gure organismoan gertatzen diren prozesu denak azaltzen ditu. Are gehiago, ortziko makina termikoa, eguzkia, eraikitze-iturrietan handienetakoa da. Denok bizi gara haren energiaren berezko barreiatzeari esker eta bizi garen heinean gure ingurunean desordena sortzen dugu: ezin izango genuke bizi ingurunerik gabe. XVII. mendeko hausnarketa da John Donne-k, jakin gabe bazen ere, Carnot-ek, Joule-k, Kelvin-ek eta Clausius-el baino bi mende lehenago, bigarren legearen bertsioa aipatu zuena: gizakiok ez gara uharteak.



Rudolf J.E.I Clausius  
(1822-1888)



William Thomson  
Lord Kelvin  
(1824-1907)



Max Karl E.L. Planck  
(1858-1947)



# Entropia

## tenperaturaren eskala absolutua

Tenperatura-eskala absolutua eraiki daiteke, eta horretarako, soilik behaketa mekanikoetan oinarritutako eta pisuak, sokak eta txirrikak baino ez erabilita eraikitako termometroa erabiliz.

Kelvin ohartu zen posiblea zela tenperatura-eskala defintzea, lanaren funtzioan eta Carnot-ek makina termikoaren errendimendurako aurkitatutako adierazpena erabiliz.

Honako era honetan definituko dugu makina termiko idealaren errendimendua: egindako lana eta xurgatutako beroaren arteko zatidura; berori adierazteko  $e$  (epsilon) hizki grekoa erabiltzen da. Makinak egiten duen lana pisu jakina altxatzen den altuera behatuz neur daitek. Makinak xurgatzen duen beroa ere, printzipioz, pisu baten eroketa antzemanaz neur daiteke. Bero eran transferitutako energia ezagut daiteke egoera-aldaketa jakina lortzeko behar den lana tanga adiabatiko batean neurtuz gero, eta, ondoren, egoera-aldaketa berbera eraginez, baina tanga diatermoan, prozesu bietan egindako lanaren arteko diferentzia bigarrenetan transferitutako berotzat joz. Hortaz, makina termiko baten errendimendua neur daiteke zenbait saiakuntza mekanikotan pisuen beharaz edo igotzea behatuz.

Carnot-en adierazpenaren arabera,  $e = 1 - T_{\text{bero-iturri beroa}} / T_{\text{bero-iturri hotza}}$ , honako hau idatz daiteke: Orduan, bero-iturri hotzaren tenperatura neurtzeko, makina horrek erabiltzen dituen aipatutako pisuak baino ez ditugu erabili behar.  $e$

$= 0,24$  dela aurkitzen badau, horrek esan nahi du bero-iturri hotzaren tenperatura  $0,76 T_{\text{bero-iturri beroa}}$  dela.

Dena dela, oraindik, Tbero-iturri beroa ezezaguna da. Aukera dezagun arraz errepikagarria den sistema, Fahrenheit-en besapea baino fidagarria; eta finka dezagun haren tenperatura balio batean. Horrela, sistema hori erabil daiteke makinaren bero-iturri moduan: ur likidoa eta haren lurruna eta hitzoaren arteko orekako nahastura, uraren puntu hirukoitza bera, aukeratzen da sistematizat, gaur egungo lanetan. Egoera horren tenperatura  $273,16 \text{ K}$  da zehazki. Uraren puntu hirukoitza uraren propietatea da: nahiz eta kanpo-baldinatzak aldatu, presioa esaterako, puntu hirukoitza ez da aldatzen; beraz, egoera erabat errepikagarria da. Orduan, lehen aipatutako adibidean, zenbait pisuren errotzeen bidez bero-iturri hotza uraren puntu hirukoitzean daukan makina termiko baten errendimendua neurtuko bagenu, eta, kasu horretan,  $e = 0,24$  izango balitz, bero-iturri hotzaren tenperatura  $208 \text{ K}$  ( $-65^\circ \text{C}$ ) izango litzateke. Kelvin tenperatura-eskala defintzeko uraren puntu hirukoitzaren hautua guztiz arbitrarioa da, baina, komenigarria, galaxiaren edozein puntutan horrela defintutako esakalaren erreplika egin baitaiteke, inolako anbiguetaterik gabe: uraren propietateak berberak dira edozein tokitan, parametro bat bera ere ez da doitu behar.

