



NEGATIIVISET LÄMPÖTILAT

Roni Husso



SISÄLTÖ

- Lämpötilan määritelmä
- Entropian määritelmät
 - Gibbsin entropia
 - Boltzmannin entropia
- Negatiivisten lämpötilojen ehdot
- Purcellin ja Poundin koe
- Argumentteja negatiivisten lämpötilojen olemassaoloa vastaan
- Argumentteja negatiivisten lämpötilojen puolesta
- Negatiivisten lämpötilojen hyödyntäminen
- Yhteenvedo



LÄMPÖTILAN MÄÄRITELMÄ

- Lämpötila määritellään kaavalla

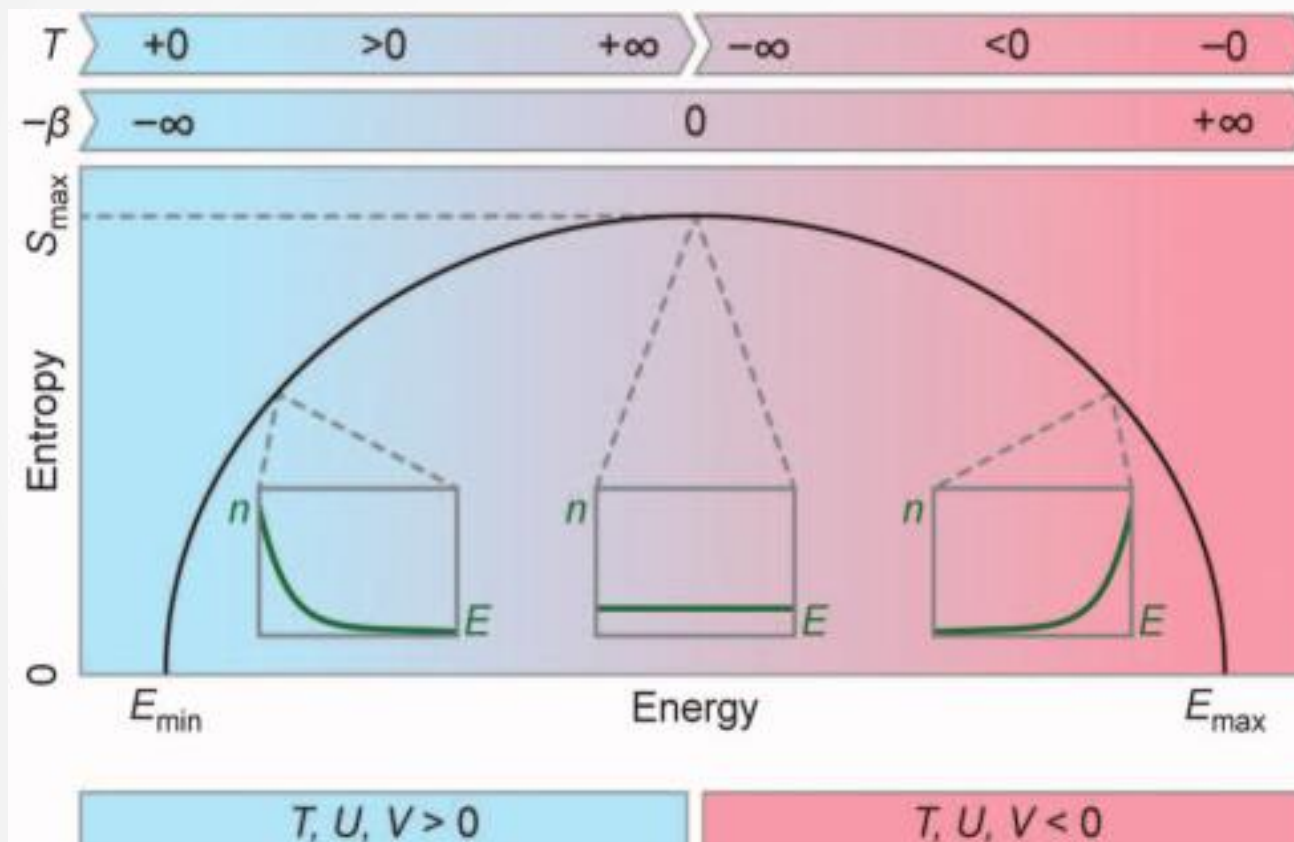
$$\beta = \frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_A ,$$

jossa T on lämpötila, S entropia, E energia ja A mielivaltainen tilamuuttuja

- Lämpötila on termodynaaminen suure, joka kertoo lämmönvirtauksen suunnan termodynaamisten systeemien välillä



NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN EHDOT



- Negatiivinen lämpötila syntyy kun energia ei ole entropian monotonisesti kasvava funktio
 - Tällöin entropia pienenee energian kasvaessa
- Siirtyminen negatiivisiin lämpötiloihin tapahtuu äärettömän positiivisen lämpötilan kautta
 - Kyseessä on lämpötilan määritelmän $1/\beta$ ominaisuus

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1227831>



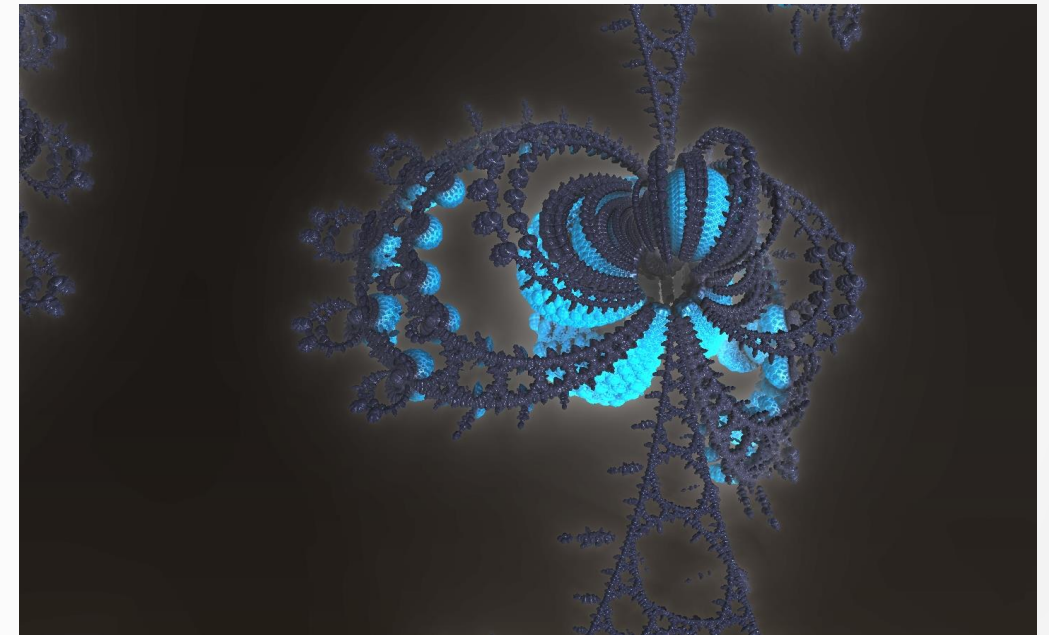
NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN EHDOT

- Systeemin täytyy toteuttaaseuraavat kolme ehtoa, jotta sen lämpötila on negatiivinen
 1. Systeemin osaset ovat sisäisessä tasapainossa keskenään
 2. Systeemin osasten energia on rajoitettu ylhäältäpäin
 3. Systeemi on eristetty kaikista muista systeemeistä, joiden lämpötila ei noudata kahta ensimmäistä ehtoa



ENTROPIAN MÄÄRITELMÄT

- Käsitellään Gibbsin ja Boltzmannin entropiaa
- Tarkastelu statistisen mekaniikan näkökulmasta
- Yleisesti entropiat yhtenevät, mutta tämä ei kuitenkaan päde lähellä termodynaamista rajaa.



<https://www.deviantart.com/tobaal/art/entropy-231406053>



GIBBSIN ENTROPIA

- Gibbsin entropia lasketaan kaavalla

$$S_B (E) = k_B \ln[\Omega (E)]$$

k_B on Boltzmannin vakio ja Ω kuvaa systeemin mikrotiloja

- Gibbsin sisältää kaikki faasiavaruuden pisteet joiden energia on pienempi tai yhtä suuri kuin energia E
- Käytetään yleisesti kanonisessa tilastollisessa joukossa



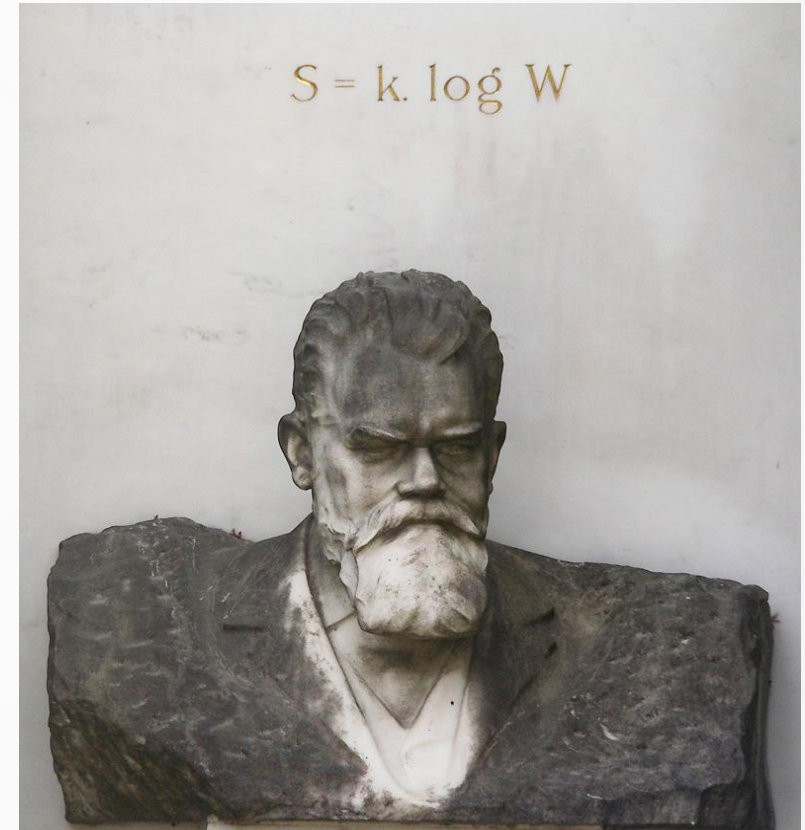
BOLTZMANNIN ENTROPIA

- Boltzmannin entropia lasketaan kaavalla

$$S_B(E) = k_B \ln[W(E)]$$

k_B on Boltzmannin vakio ja W kuvaa systeemin mikrotiloja

- Boltzmannin sisältää kaikki faasiavaruuden pisteet joilla on energia $[E, \Delta E]$
- Käytetään erityisesti mikrokanonisessa joukossa



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e6/Boltzmann_%28427167382%29.jpg



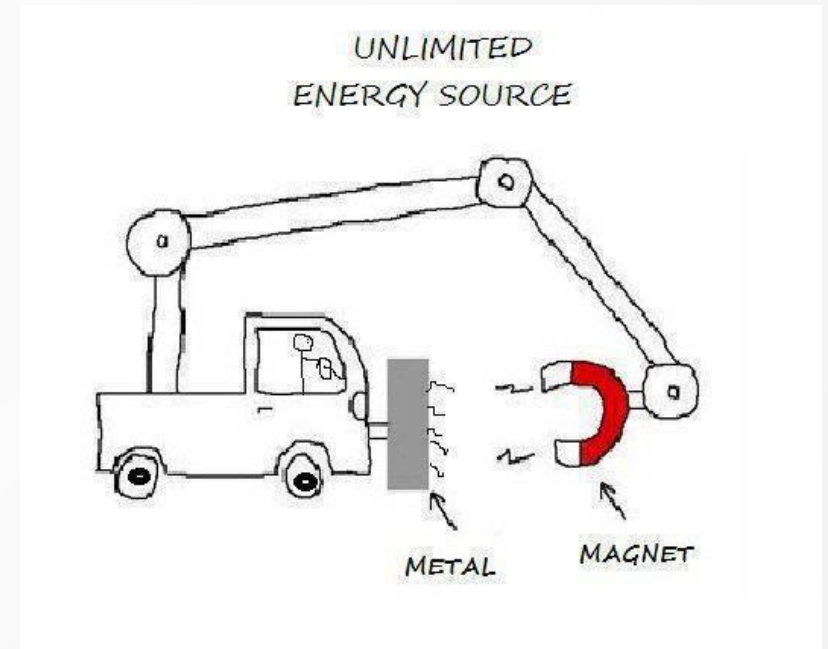
PURCELLIN JA POUNDIN KOE

- 1950 Purcell ja Pound loivat ensimmäisen negatiivisen lämpötilan omaavan systeemin
- Kokeessa litiumfluoridihile asetettiin voimakkaaseen magneettikenttään, jonka suuntaa muutettiin nopeasti
- Suurempi osa spineistä korkeamman kuin matalan energian tiloissa
- Systeemi palautui positiiviseen lämpötilaan muutaman minuutin kuluessa



ARGUMENTTEJA NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN OLEMASSAOLOA VASTAAN

- Merkittävin kritiikki negatiivisia lämpötiloja kohtaan koskee Boltzmannin entropiaa
 - Boltzmannin entropia ei toteuta kaikkia matemaattisia identiteettejä, joita Gibbsin entropia toteuttaa
 - Negatiiviset lämpötilat vaikuttavan luovan lämpövoimakoneita, joiden teho on yli 1.
 - Termodynamiikan toinen pääsääntö rikkoutuu



<https://physics.stackexchange.com/questions/72447/why-this-perpetuum-mobile-cant-be-possible>



ARGUMENTTEJA NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN OLEMASSAOLOA VASTAAN

- Toisiksi laajin kritiikki koskee termodynaamista tasapainoa
- Useat eri fyysikot ovat esittäneet, että negatiivisen lämpötilan omaavat systeemit eivät tosiasiallisesti ole tasapainossa



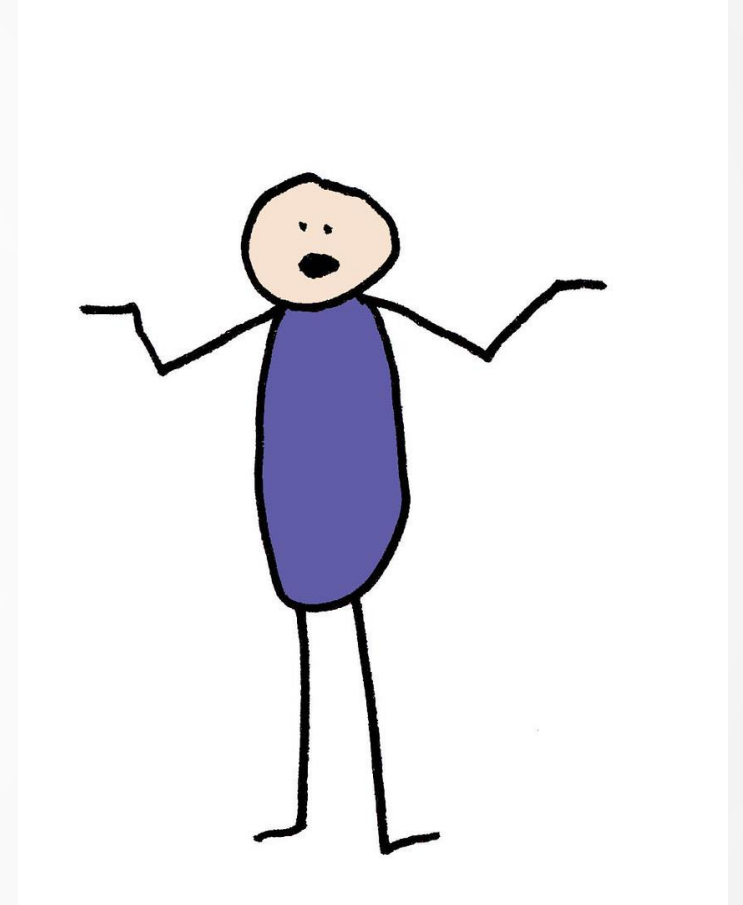
ARGUMENTTEJA NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN PUOLESTA

- Negatiivisten lämpötilojen puolustajat tuovat esiin vastakritiikkiä Gibbsin entropiaa kohtaan
 - Gibbsin entropia rikkoo termodynamiikan nollatta pääsääntöä
 - Termodynamiikan toinen pääsääntö voidaan säilyttää pienellä muutoksella
 - Argumentti tasapainosta vaatii nollannen pääsäännön muuttamista
 - Boltzmannin entropia vastaa kokeellisia tuloksia paremmin tietyillä systeemeillä



NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN HYÖDYNTÄMINEN

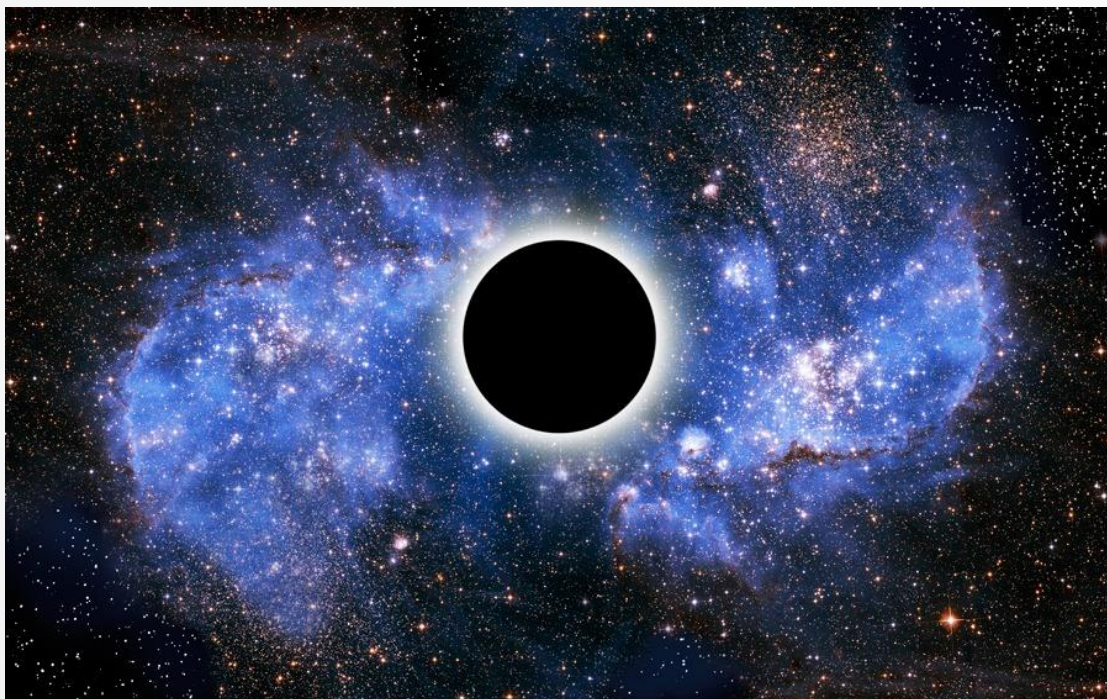
- Negatiivisen lämpötilan omaavat systeemit ovat harvinaisia
- Ei esiinny luonnossa
- Ei ole monia käyttötarkoituksia



<https://www.flickr.com/photos/90155358@N02/29327655248>



NEGATIIVISTEN LÄMPÖTILOJEN HYÖDYNTÄMINEN



<https://www.universetoday.com/141724/using-black-holes-to-conquer-space-the-halo-drive/>

- Negatiivisten lämpötilojen avulla voidaan tarkastella termodynamiikan perusoletuksia ja yhtenäisyyttä
- Näiden avulla voidaan kenties mallintaa pimeää energiaa
- On teorioita, joiden mukaan mustat aukot sisältävät negatiivisia lämpötiloja



YHTEENVETO

- Negatiivinen lämpötila syntyy kun entropia pienenee energian lisäytyessä
- Asiantuntijat yhä erimielisiä negatiivisten lämpötilojen olemassaolosta
- Nostaa esiin aivan olennaisia kysymyksiä termodynamiikan perusasioista



LÄHTEET

1. Marco Baldovin, Stefano Iubini, Roberto Livi, and Angelo Vulpiani. Statistical mechanics of systems with negative temperature. *Physics Reports*, 923:1–50, 2021. Statistical mechanics of systems with negative temperature
2. N. F. Ramsey. Thermodynamics and statistical mechanics at negative absolute temperatures. *Physical Review*, 103(1):20–28, July 1956.
3. R. V. Pound E. M. Purcell. A nuclear spin system at negative temperature. *Physical Review*, 81(2):278–279, 1951
4. S. Hilbert J. Dunkel. Consistent thermostatics forbids negative absolute temperatures. *Nature Physics*, 10:67–72, December 2013
5. Víctor Romero-Rochín. Nonexistence of equilibrium states at absolute negative temperatures. *Physical Review E*, 88:022144, Aug 2013.
6. Daan Frenkel and Patrick B. Warren. Gibbs, Boltzmann, and negative temperatures. *American Journal of Physics*, 83(2):163–170, 02 2015.



NEGATIIVISET LÄMPÖTILAT

Roni Husso