

ПІТЕР ЕТКІНЗ

ЧОТИРИ
ЗАКОНИ,
ЩО РУХАЮТЬ
ВСЕСВІТ

ВИДАВНИЦТВО

Ф А Б У Л А
#PRO

[Купити книгу на сайті kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

УДК 536:53.02
E88

ВИДАВНИЦТВО
Ф А Б У Л А
#PRO

Оригінальна назва твору:
FOUR LAWS THAT DRIVE THE UNIVERSE

FOUR LAWS THAT DRIVE THE UNIVERSE was originally published in English in 2007. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Publishing House «RANOK» is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

«Чотири закони, що рухають Всесвіт» уперше було опубліковано англійською мовою в 2007 р. Даний переклад опублікований за домовленістю з Оксфорд Юніверсіті Прес.

Видавництво «Ранок» несе одноособову відповідальність за даний переклад з оригінального твору і Оксфорд Юніверсіті Прес не несе відповідальності за будь-які помилки, пропуски або неточності чи невизначеності в такому перекладі або будь-яку шкоду, заподіяну цим.

Усі права збережено.

Жодна частина цієї книжки не може бути відтворена в будь-якій формі без письмового дозволу власників авторських прав.

Еткінз Пітер

E88 Чотири закони, що рухають Всесвіт / пер. з англ. М. Мунтянова. — Харків : Вид-во «Ранок» : Фабула, 2020. — 176 с.

ISBN 978-617-09-6496-0

Закони термодинаміки надають руху всьому, що відбувається у Всесвіті. Від раптового розширення хмари газу до охолодження гарячого металу, від розгортання листка до перебігу самого життя — усе рухається або гальмується цими законами.

Ця коротка, але дотепна книжка знайомить читачів з одним із наріжних каменів сучасної науки — чотирма законами термодинаміки, що встановлюють фундаментальні поняття, як-от температура й тепло, виявляють стрілу часу й навіть саму природу енергії. Автор, Пітер Еткінз, один з найбільших авторитетів у галузі термодинаміки, простою мовою й майже не застосовуючи математики, пояснює суть цих законів і те, як вони функціонують.

УДК 536:53.02

© Peter Atkins 2007

© М. Мунтянова, пер. з англ., 2020

© «Фабула», макет, 2020

© Видавництво «Ранок», 2020

ISBN 978-617-09-6496-0

Купити книгу на сайті kniga.biz.ua >>>

ЗМІСТ

Передмова	4
1 НУЛЬОВИЙ ЗАКОН	9
<i>Поняття температури</i>	
2 ПЕРШИЙ ЗАКОН	33
<i>Збереження енергії</i>	
3 ДРУГИЙ ЗАКОН	67
<i>Зростання ентропії</i>	
4 ВІЛЬНА ЕНЕРГІЯ	111
<i>Доступність роботи</i>	
5 ТРЕТІЙ ЗАКОН	137
<i>Недосяжність нуля</i>	
Висновок	163
Термінологічний покажчик	165
Покажчик символів та одиниць	173
Про автора	175

[>>>](http://kniga.biz.ua) Купити книгу на сайті kniga.biz.ua >>>

ПЕРЕДМОВА

Серед сотень тих законів, які описують Всесвіт, причаїлася могутня горстка. Це закони термодинаміки, що підсумовують властивості енергії та її перетворення з однієї форми в іншу. Я вагався, чи варто згадувати слово «термодинаміка» в назві цього невеличкого вступу до такого безмежно важливого й захопливого аспекту природи. Сподіваюся, що, вилучивши з назви цей термін, я заохочу вас дочитати принаймні до цього моменту, адже слово «термодинаміка» не налякає на легке читво. Тож не вдаватиму, ніби мою працю можна потрактувати як розважальну літературу. Однак, коли дочитаєте цю тоненьку книжечку до кінця, ваш мозок буде загартованіший і вправніший, а ви самі глибше розумітимете роль енергії у світі. Коротко кажучи, ви знатимете, що саме рухає Всесвіт.

Вам може здаватися, ніби термодинаміка стосується лише парових двигунів, однак насправді вона стосується майже всього, що нас оточує. Безперечно, перші концепції цієї науки з'явилися в ХІХ столітті, коли пара була як ніколи актуальною, проте в міру формування чітких законів термодинаміки науковці почали детальніше вивчати їхні наслідки. Тоді стало зрозуміло, що цей предмет може охопити надзвичайно широкий спектр явищ — починаючи з ККД теплових двигунів, теплових pomp і холодильників та закінчуючи хімією і навіть біологічними процесами. На дальших сторінках ми з вами помандруємо цим широким спектром.

Могутня горстка складається з чотирьох законів, нумерація яких досить незручно починається з нуля і закінчується на цифрі «три». Перші два закони («нульовий» і «перший») познайомлять нас із двома звичними, але все ж загадковими властивостями — температурою та енергією. Третій із четвірки («другий закон») описує ентропію, що її багато хто вважає невлливою властивістю. А втім, я сподіваюся наочно показати, що вона легша для розуміння, ніж начебто звичніші властивості температури й енергії. Другий закон — це один із найвеличніших

законів усієї науки, адже він пояснює, чому щось узагалі відбувається: від охолодження гарячої речовини до висловлення думки. Четвертий із законів («третій закон») грає переважно технічну роль. Він доповнює і завершує структуру предмета, а також уможливорює або унеможливорює його застосування. Хоча третій закон і встановлює бар'єр, який заважає нам досягти абсолютного температурного нуля (тобто зробити що-небудь абсолютно холодним), та ми побачимо, що нижче від нуля все ж існує химерний і досяжний дзеркальний світ.


Як наука термодинаміка виросла зі спостережень за об'ємною матерією (інколи у формі таких громіздких об'єктів, як парові двигуни) і сформувалася ще до того, як більшість науковців переконалися, що атоми — це щось більше, ніж просто засоби обліку. Однак предмет цієї дисципліни незмірно розширяється, якщо здобуті на основі спостережень формулювання термодинаміки тлумачити в контексті атомів і молекул. Зважаючи на цей нюанс, ми спершу обговоримо спостережні аспекти кожного закону, і лише потім зануримось у глибокі аспекти об'ємної матерії й розкриємо ті тлумачення, які впливають з інтерпретації

законів з погляду концепцій, притаманних світу атомів.

І насамкінець, перед тим як ви вигострите розум і візьметесь за пізнання принципів функціонування Всесвіту, я мушу подякувати серові Джону Ровлінсону за детальне вивчення і коментування двох робочих версій рукопису — його академічні поради були надзвичайно корисні. А втім, якщо якісь помилки й залишилися, то вони, без сумніву, стосуватимуться тільки тих моментів, де я не погодився з ним.



[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)



1 Нульовий закон

Поняття температури

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

[Купити книгу на сайті kniga.biz.ua >>>](#)

Нульовий закон — це свого роду запізніла думка. Хоча давно було відомо, що такий закон істотно важливий для логічної структури термодинаміки, але до початку ХХ століття він не мав ані сталого номера, ані назви. На той час перший і другий закони вже так укорінилися, що годі було й думати про те, щоб перенумерувати їх наново. Далі стане очевидно, що кожен закон забезпечує експериментальну основу для запровадження певної термодинамічної властивості. Нульовий закон визначає зміст, мабуть, найвідомішої, але насправді найзагадковішої із цих властивостей — температури.

Термодинаміка, як і більшість наукових дисциплін, бере (дехто сказав би «викрадає») терміни з повсякденним значенням і поліпшує їх так, щоб вони набули точного й однозначного змісту. Ми спостерігатимемо за цим процесом протягом усього цього вступу до термодинаміки. Усе починається, щойно ми ступаємо на поріг цієї наукової дисципліни. Ту частину Всесвіту, яка перебуває в центрі уваги термодинаміки, називають *системою*. Системою може бути шматок заліза, склянка води, двигун, тіло людини. Це може бути навіть окремо взята частина будь-якого із цих об'єктів. Решту Всесвіту

називають *довкіллям*. Довкілля — це те місце, звідки ми спостерігаємо за системою і визначаємо її властивості. Досить часто фактичне довкілля складається з водяного купелю, підтримуваного за постійної температури, але це значно контрольованіше наближення до справжнього довкілля, решти світу. Система разом зі своїм довкіллям утворює *Всесвіт*. Тоді як більшість людей вважає Всесвітом буквально все навколо, для ошадливих термодинамістів (науковців у галузі термодинаміки) Всесвіт може складатися зі склянки води (системи), зануреної у водяний купіль (довкілля).

Система визначається її межами. Систему вважають *відкритою*, якщо до неї можна додати або ж вилучити з неї матерію. Приклад такої системи — відро або відкрита пляшка, бо ми можемо досить легко додати туди певну речовину. Якщо ж система має непроникні для матерії межі, то її вважають *закритою*. Герметична пляшка — це закрыта система. А якщо межі системи непроникні для всього — у тому сенсі, що система залишається незмінною попри те, що відбувається в довкіллі,— то її вважають *ізолюваною*. Приблизним прикладом ізолюваної системи може бути термос із гарячою кавою.

Властивості системи залежать від доміантних умов. Наприклад, тиск газу залежить від того об'єму, який він займає. Ми можемо спостерігати ефект зміни цього об'єму, якщо система має гнучкі стінки.

Під «гнучкими стінками» найкраще мати на увазі те, що межі системи жорсткі з усіх боків, крім перемички або поршня, який може переміщатися всередину й назовні. Як приклад можна навести велосипедну помпу, чиє сопло ви затуляєте пальцем.

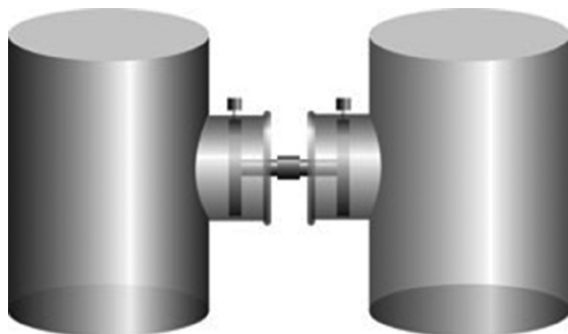
Властивості ділять на два класи. *Екстенсивна властивість* залежить від кількості речовини в системі, її обсягу. Маса й об'єм системи — це екстенсивні властивості. Наприклад, 2 кг заліза займають удвічі більше об'єму, ніж 1 кг заліза. *Інтенсивна властивість* не залежить від кількості матерії, що міститься в системі. Приклади таких властивостей — температура (будь-яка) і густина. Температура ретельно перемішаної гарячої води в посудині не залежить від її розмірів. Густина заліза становить $8,9 \text{ г/см}^3$ незалежно від ваги наявного шматка (чи то 1 кг, чи то 2 кг). Під час ознайомлення з різними аспектами термодинаміки ми стикнемося з багатьма прикладами властивостей обох видів, тому важливо пам'ятати їхні відмінності.

* * *

Утім, досить із нас цих нудних і припорошених означень. Тепер ми використовуватимемо поршень (рухома перемичку в межах системи), щоб трохи детальніше познайомитися з одним важливим поняттям,

яке пізніше стане основою для ліпшого розуміння загадки температури й самого нульового закону.

Припустімо, ми маємо дві закриті системи. Кожна з них оснащена поршнем з одного боку й закріплена так, щоб перетворитися на жорсткий контейнер (рис. 1).



1 Якщо гази в цих двох контейнерах перебувають під різним тиском, то після виймання стримувальних штифтів поршні рухатимуться в той чи інший бік, поки тиск в обох системах не вирівняється. Тоді обидві системи опиняться в механічній рівновазі. Якщо тиск в обох системах від самого початку однаковий, то після виймання штифтів ми не спостерігатимемо руху поршнів, адже дві системи вже перебувають у стані механічної рівноваги.

Два поршні з'єднані між собою жорстким стрижнем таким способом, що коли один рухається назовні, то інший рухається всередину. Тепер виймімо з поршнів стримувальні штифти. Якщо поршень

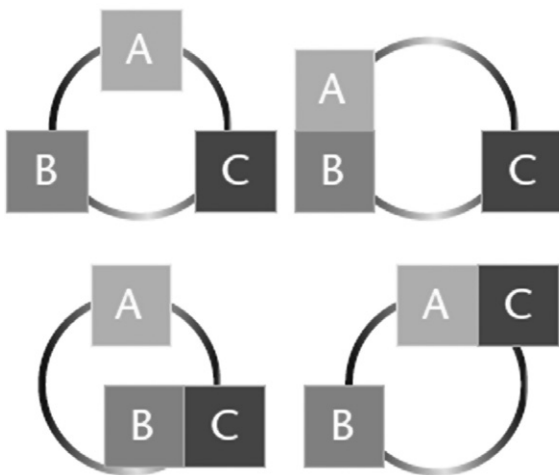
ліворуч зрушить поршень праворуч і змусить його рухатися всередину системи, то можна виснувати, що тиск ліворуч був вищий, ніж праворуч, хоча ми навіть не вимірювали тиск у системах. Якби в цьому своєрідному змаганні переміг поршень праворуч, ми могли б виснувати, що тиск у ньому був вищий, ніж ліворуч. Якби після виймання штифта нічого не сталося, то ми б виснували, що тиск у двох системах був однаковий, попри його фактичне значення. Умову, що виникає внаслідок рівності тиску, у науці називають *механічною рівновагою*. Термодинамістів зазвичай дуже цікавить ситуація, коли нічого не відбувається. З перебігом нашого подальшого знайомства з законами термодинаміки ця умова рівноваги набуватиме дедалі більшого значення.

Розгляньмо ще один аспект механічної рівноваги. Поки що він може видаватися тривіальним, але завдяки йому ми зможемо встановити аналогію, яка дозволить ввести поняття температури. Припустімо, ми маємо дві з'єднані системи (назвімо їх А і В) із вийнятими штифтами. Системи перебувають у механічній рівновазі, тобто тиск усередині них однаковий. Тепер припустімо, що ми роз'єднуємо їх і так само з'єднуємо систему А з третьою системою (С), оснащеною поршнем. Припустімо, що ми не спостерігаємо ніяких змін і на підставі цього висновуємо, що системи А і С перебувають у механічній рівновазі. Із цього випливає, що вони мають однаковий

тиск. Тепер припустімо, що ми роз'єднуємо їх і таким самим механічним способом з'єднуємо систему С із системою В. Навіть без експерименту ми знаємо, що нічого не станеться. Через те що системи А і В, як і системи А і С, мають однаковий тиск, ми можемо бути впевнені, що системи С і В також мають однаковий тиск. У цьому прикладі тиск виступає універсальним показником механічної рівноваги.

Тепер перейдімо від механіки до термодинаміки та світу нульового закону. Припустімо, що системи А і В мають жорсткі металеві стінки. Після того як ми з'єднаємо ці дві системи, вони можуть зазнати певних фізичних змін. Наприклад, їхній тиск може змінитися або через спостерігальне вічко ми побачимо зміну кольору. Повсякденною мовою ми б сказали, що «теплота перейшла з однієї системи до іншої» і відповідно змінилися їхні властивості. Але навіть не тіште себе думкою, ніби ми знаємо, що таке насправді теплота. Це таємничий аспект першого закону, а ми ще навіть не розібралися з нульовим законом.

Може статися так, що після з'єднання двох систем не відбувається ніяких змін, навіть якщо системи виготовлені з металу. У такому разі ми кажемо, що дві системи перебувають у *тепловій рівновазі*. Тепер розгляньмо три системи (рис. 2), як ми це робили, коли обговорювали механічну рівновагу. З'ясовано, що коли А приєднати до В і вони опиняться в тепловій рівновазі, а В приєднати до С, що також опи-



2 Представлення нульового закону із залученням (вгорі ліворуч) трьох систем, що можуть бути приведені в тепловий контакт. Якщо А перебуває в тепловій рівновазі з В (угорі праворуч), а В у тепловій рівновазі з С (унизу ліворуч), то коли потім приєднати С до А, то ми можемо бути впевнені, що С також опиниться в тепловій рівновазі з А, якщо їх з'єднати (унизу праворуч).

няться в тепловій рівновазі, то коли потім приєднати С до А, ми завжди спостерігатимемо, що вони перебувають у тепловій рівновазі. Це досить банальне спостереження розкриває суть *нульового закону термодинаміки*:

якщо А перебуває в тепловій рівновазі з В, а В перебуває в тепловій рівновазі з С, то С буде в тепловій рівновазі з А.

З нульового закону випливає, що так само як тиск виступає фізичною властивістю, яка дозволяє нам передбачити, коли системи (попри їхній склад і розмір) опиняться в механічній рівновазі під час з'єднання, так само є властивість, що дозволяє нам передбачити, коли дві системи (попри їхній склад і розмір) опиняться в термічній рівновазі. Цю універсальну властивість ми називаємо *температурою*. Тепер ми можемо узагальнити твердження про взаємну тепло-ву рівновагу трьох систем, просто сказавши, що всі вони мають однакову температуру.

Ми ще не стверджуємо, ніби точно знаємо, що таке температура. Ми лише визнаємо, що нульовий закон передбачає наявність критерію теплової рівноваги — якщо температури двох систем однакові, то, будучи зістиковані через діатермічні стінки, вони опиняться в тепловій рівновазі, а спостерігач захоплено зазначить, що в системах нічого не змінюється.

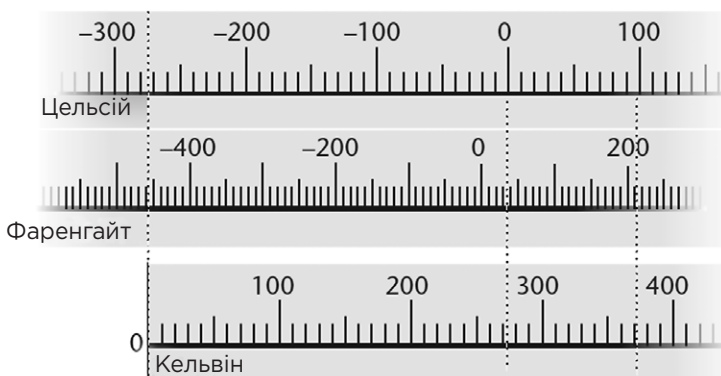
Тепер ми можемо додати ще два поняття до термінологічного словника термодинаміки. Жорсткі стінки, що дозволяють змінювати стан закритих систем під час їхнього контакту (тобто мовою другого розділу — дозволяють проводити тепло), називають *діатермічними* (від грецьких слів «через» і «тепло»). Зазвичай діатермічні стінки виготовляють із металу, але цю функцію може виконувати будь-який провідний матеріал. Каструлі — це діа-

термічні посудини. Якщо не відбувається ніяких змін, то або температури однакові, або — якщо ми знаємо, що вони різні,— стінки можна класифікувати як *адіабатні* («непроникні»). Ми можемо припустити, що стінки адіабатні, коли вони теплоізовані, як-от у термосі, або коли система вмонтована в пінополістирол.

Нульовий закон закладає основу для створення *термометра*, приладу для вимірювання температури. Термометр — це лише окремий випадок конфігурації системи *B*, про яку ми розповідали раніше. Це система з властивістю, що може змінюватися в разі взаємодії із системою з діатермічними стінками. У типовому термометрі використовують термічне розширення ртуті або зміну електричних властивостей матеріалу. Отже, якщо показники системи *B* («термометр») не зміняться після теплового контакту із системою *A*, а також і після теплового контакту із системою *C*, то ми зможемо стверджувати, що системи *A* і *C* мають однакову температуру.

Є кілька температурних шкал. Спосіб їх впровадження — це принципово сфера другого закону (див. розділ 3). А втім, допоки ми не дійдемо до третього розділу, нам буде доволі обтяжливо не посилатися на ці шкали, хоча формально це можна зробити, адже шкали Цельсія (стоградусна шкала) і Фаренгайта відомі всім. Шведський астро-

ном Андерс Цельсій (1701–1744) розробив шкалу, пізніше названу на його честь, за якою вода замерзала за $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а закипала за $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, протилежну їй теперішній версії ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно). Німецький виробник приладів Данієль Фаренгайт (1686–1736) уперше застосував ртуть у термометрі. Він установив позначку 0° для найнижчої температури, якої зумів досягти за допомогою суміші солі, льоду й води. За 100° Фаренгайт вибрав температуру свого тіла. Хоч це й легко пристосовуваний, проте ненадійний стандарт. За цією шкалою вода замерзає за $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ й закипає за $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ (рис. 3).



3 Тут зображено три найрозповсюдженіші температурні шкали та співвідношення між ними. Вертикальна пунктирна лінія ліворуч показує найнижчу досяжну температуру; дві пунктирні лінії праворуч показують точки замерзання і кипіння води за нормальних умов.

Тимчасовою перевагою шкали Фаренгейта було те, що за тодішніх примітивних технологій від'ємні величини були майже непотрібні. Однак, як ми побачимо, такі є абсолютний нуль температури. Той нуль, який неможливо перетнути й після якого від'ємні температури не мають ніякого, крім певного формального, значення. Він не залежить від рівня технології (див. розділ 5). Тому природно вимірювати температуру через встановлення позначки «0» на цьому найнижчому з можливих досяжних рівнів і посилатися на такі абсолютні температури, як на *термодинамічну температуру*. Термодинамічні температури позначають літерою T . Щоразу, коли в цій книжці використовуватиметься цей символ, він позначатиме абсолютну температуру ($T = 0$), що відповідає найменшій можливій температурі.

Найпоширеніша шкала термодинамічних температур — *шкала Кельвіна*, яка використовує градуси («кельвіни», К) тієї ж величини, що й шкала Цельсія. За цією шкалою вода замерзає за 273 К (тобто за температури на 273 градуси вище від абсолютного нуля; у шкалі Кельвіна знак градуса не використовують) і кипить за 373 К. Інакше кажучи, абсолютний нуль температури становить $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зрідка можна натрапити на *шкалу Ренкіна*, за якою абсолютні температури виражають за допомогою градусів тієї ж величини, що й за шкалою Фаренгейта.

У кожному з перших трьох розділів я ознайомлю вас із певною властивістю системи, якщо розглядати її з погляду зовнішнього спостерігача. Потім я розширю наше розуміння явищ за допомогою практичних ілюстрацій тієї чи іншої властивості на прикладі аналізу того, що відбувається *всередині* системи. Для класичної термодинаміки не властиво говорити про «середину» системи, її структуру з погляду атомів і молекул, але це поглиблює розуміння суті речей, а науку насамперед цікавить розуміння.

Класична термодинаміка — це розділ термодинаміки, що виник протягом ХІХ сторіччя, ще до того, як усі переконалися в реальності атомної будови речовини. Вона ґрунтується на вивченні взаємозв'язків між об'ємними (макроскопічними) властивостями матерії. Класичною термодинамікою можна займатися, навіть якщо ви не вірите в існування атомів. Наприкінці ХІХ сторіччя, коли більшість науковців визнали, що атоми — це реальне явище, а не просто засоби обліку, виникла версія термодинаміки під назвою *статистична термодинаміка*. Її завданням було вивчати об'ємні властивості речовини з погляду атомів, з яких вона складається. Слово «статистична» у назві цієї дисципліни пов'язане з тим, що під час обговорення об'ємних властивостей потрібно враховувати поведінку не окремих атомів, а варто розмірковувати

про усереднену поведінку мільярдів атомів. Наприклад, створюваний газом тиск виникає внаслідок впливу його молекул на стінки контейнера. Однак, щоб проаналізувати й вирахувати цей тиск, нам не потрібно обчислювати вплив кожної окремої молекули. Ми можемо просто подивитися на середнє значення цього впливу. Коротко кажучи, тоді як динаміка займається вивченням поведінки окремих тіл, *термодинаміка* вивчає усереднену поведінку їхньої величезної кількості.

Основну концепцію статистичної термодинаміки — об'єкт нашого інтересу в цьому розділі сформулював Людвіг Больцманн (1844–1906) наприкінці XIX сторіччя. Це було незадовго до того, як він покінчив життя самогубством, через те що більше не зміг терпіти тягар незносного протистояння своїм ідеям із боку колег, які вважали ідею атомної будови речовини непереконливою. Нульовий закон вводить поняття температури з погляду об'ємних властивостей, а створене Больцманном формулювання вводить його з погляду атомів і тлумачить його значення.

Щоб зрозуміти природу формулювання Больцманна, потрібно пам'ятати, що атом може існувати лише з певними енергіями. Це вже сфера квантової механіки, але нам не доведеться детально занурюватися у цю дисципліну, нам вистачить тільки цього одного висновку. За певної температури (в об'ємному

сенсі) вся сукупність атомів складається з деяких, що перебувають у найнижчому енергетичному стані («основному стані»), деяких — у наступному вищому енергетичному стані і так далі, із заселеностями, що дедалі меншають зі зростанням енергії. Коли заселеності станів досягають своєї «рівноваги», хоча атоми й далі стрибають між енергетичними рівнями (однак це не впливає на сумарне значення заселеності), то виявляється, що ці заселеності можна обчислити на підставі даних про енергії станів і єдиного параметра β (бета).

Цю проблему можна розглянути за допомогою іншого способу. Уявімо багато полиць, розміщених на стіні на різній висоті. Полиці — це дозволені енергетичні рівні, а їхня висота — дозволені енергії. Природа цих енергій неважлива. Вони можуть відповідати, наприклад, поступному, обертовому чи коливному рухові молекул. Тепер уявімо, ніби ми кидаємо на полиці кульки (вони представляють молекули) і спостерігаємо за тим, куди вони приземляться. За умови, що загальна енергія має конкретне значення, найімовірніший розподіл частинок (кількості кульок, що приземляться на кожній полиці) після великої кількості кидків можна виразити цим одним параметром β .

Точну форму розподілу молекул за всіма їхніми дозволеними рівнями (за нашою аналогією це розподіл кульок по полицях) називають *розподілом*

Больцманна. Цей розподіл такий важливий, що нам потрібно побачити його у вигляді конкретної форми. Заради спрощення виразимо його через співвідношення між заселеністю енергетичного рівня E і заселеністю енергетичного рівня, де енергія дорівнює 0:

$$\frac{\text{Заселеність енергетичного рівня } E}{\text{Заселеність енергетичного рівня } 0} = e^{-\beta E}$$

Ми бачимо, що заселеність станів з дедалі вищою енергією меншає експоненційно — на вищих полицях опиняється менше кульок, ніж на нижніх. Ми також бачимо, що зі збільшенням параметра β відносна заселеність певного енергетичного рівня меншає і кульки опускаються на нижні полиці. Експоненційний розподіл, за якого на верхніх рівнях менше кульок, зберігається, але зі збільшенням енергії заселеність зменшується швидше.

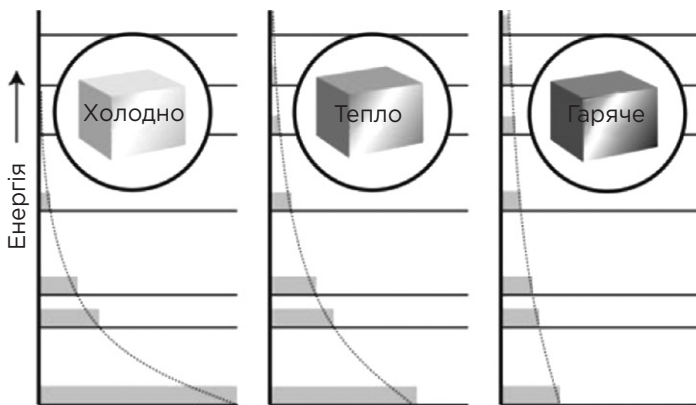
Коли розподіл Больцманна використовують для обчислення властивостей сукупності молекул, таких як тиск газового зразка, то виявляється, що його можна визначити за оберненою величиною (абсолютної) температури. А саме, $\beta = \frac{1}{kT}$, де k — фундаментальна константа, яку називають *константою (сталю) Больцманна*. Узгодьмо β із температурною шкалою Кельвіна, де k матиме значення

$1,38 \times 10^{-23}$ джоуля на кельвін*. Не забуваймо, коли β пропорційна до $1/T$, то з підвищенням температури бета (β) меншає, і навпаки.

Тут варто звернути увагу на кілька моментів. Насамперед розподіл Больцманна має таке величезне значення, бо він підкреслює молекулярну значущість температури. *Температура — це параметр, що повідомляє нас про найімовірніший розподіл заселеностей молекул за наявними станами рівноважної системи.* Коли температура висока (β низька), то багато станів мають високі заселеності. Коли ж температура низька (β висока), то істотні заселеності мають лише стани, близькі до найнижчого (рис. 4).

Незалежно від фактичних значень заселеності, вони незмінно дотримуються експоненційного розподілу, згідно з формулюванням Больцманна. За аналогією до наших кульок на полицях, низькі температури (висока β) можна порівняти з тим, наче ми так слабо кидаємо кульки, що вони потрапляють лише на найнижчі полиці. Висока температура (низька β) відповідає сильним кидкам, так що значно більше кульок потрапляє навіть на високі полиці. Отже, температура — це лише *параметр, що підсумовує відносні заселеності енергетичних рівнів у рівноважній системі.*

* Енергію виражають у джоулях (J, Дж): $1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$. Можна трактувати 1 Дж як енергію двокілограмової кулі, що рухається зі швидкістю 1 м/с. На кожен удар людського серця витрачається близько 1 Дж енергії.



4 Розподіл Больцманна — це експоненційно спадна функція енергії. З підвищенням температури заселеність мігрує від нижчих до вищих енергетичних рівнів. За абсолютного нуля зайнятий лише найнижчий рівень; за нескінченної температури всі стани однаково заселені.

По-друге, β — це природніший параметр для представлення температури, ніж навіть T . Пізніше ми побачимо, що абсолютний нуль температури ($T = 0$) недосяжний за скінченне число етапів, і це може збивати з пантелику. Але значно менше дивує те, що нескінченне значення β (значення β , коли $T = 0$) недосяжне за скінченну кількість етапів. Однак, хоча β і природніший спосіб представлення температури, воно малоприматне для повсякденного використання. Наприклад, вода замерзає за $0\text{ }^\circ\text{C}$ (273 K), що відповідає $\beta = 2,65 \times 10^{20}\text{ Дж}^{-1}$, і кипить за $100\text{ }^\circ\text{C}$ (373 K), що відповідає $\beta = 1,94 \times 10^{20}\text{ Дж}^{-1}$. Такі громіздкі вели-

чини відразу й не вимовиш. А уявіть собі, як важко буде в повсякденній розмові описати прохолодний день ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає $2,56 \times 10^{20}\text{ Дж}^{-1}$) чи порівняти його з теплішим ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає $2,47 \times 10^{20}\text{ Дж}^{-1}$).

По-третє, наявність і значення фундаментальної константи k — це просто наслідок того, що ми наполягаємо на використанні звичайної температурної шкали, а не по-справжньому фундаментальної шкали, що базується на β . Шкали Фаренгейта, Цельсія і Кельвіна хибні — величина, обернена до температури, тобто β , має більше сенсу й природніша, аніж міра температури. Однак можна навіть і не сподіватися на те, що її коли-небудь визнають. Історично сформована звичка й сила таких простих чисел, як 0 і 100, чи навіть 32 і 212, занадто глибоко вкоренилися в нашій культурі, і до того ж вони зручніші для повсякденного використання.

Хоча константу Больцманна k часто згадують як фундаментальну константу, це насправді лише спроба вибачитися за історичну помилку. Якби Людвіг Больцманн провів свої дослідження до появи наукових праць Фаренгейта й Цельсія, тоді всім нам було б очевидно, що це — найприродніша система для вимірювання температури. Ми могли б звикнути до того, що температура виражається в одиницях обернених джоулів. Нас би не дивувало те, що теп-

ліші системи мають менше значення β , а холодніші системи показують вище значення β .

Однак у нашому світі вже ustaliliся норми, за якими тепліші системи мають вищу температуру, ніж холодніші. А коли ввели константу k , то її вже довелося виражати через $k\beta = 1/T$, щоб якось узгодити природну шкалу температури на основі β із прийнятою раніше й глибоко вкоріненою шкалою на основі T . Отже, константа Больцманна — це не що інше, як коефіцієнт переходу між усталеною загальноприйнятою шкалою і тією, яку, озираючись у минуле, повинно було б прийняти суспільство. Якби бету (β) затвердили мірою температури, то константа Больцманна була б не потрібна.

Завершімо цей розділ на веселішій ноті. Ми встановили, що температура, а конкретно β — це параметр, що виражає рівноважний розподіл молекул системи за їхніми наявними енергетичними рівнями.

Одна з найпростіших систем, яку можна уявити в цьому контексті,— це досконалий (або так званий ідеальний) газ. Молекули в ньому утворюють хаотичний рій. Деякі рухаються швидко, інші повільно, літаючи по прямих траєкторіях, поки одна молекула не зіткнеться з іншою. Унаслідок цього вони відскакують у різних напрямках і з різними швидкостями, шквалом ударів бомбардують

стілки і тим самим породжують те, що ми трактуємо як тиск. Газ — це хаотичне зібрання молекул (насправді, слова «газ» і «хаос» походять від одного кореня), воно хаотичне як з погляду просторового розподілу, так і з погляду розподілу молекулярних швидкостей.

Кожна швидкість відповідає певній кінетичній енергії, і тому розподіл Больцманна можна використовувати для представлення розподілу молекулярних швидкостей через розподіл молекул за їхніми можливими перехідними енергетичними рівнями, а також щоб пов'язати цей розподіл швидкостей з температурою.

Остаточно сформульований вираз називають *розподілом Максвелла—Больцманна* за швидкостями. Він отримав таку назву через те, що першим вивів його Джеймз Клерк Максвелл (1831–1879), хоч і трішки іншим способом. Якщо виконати потрібні розрахунки, то виявляється, що середня швидкість молекул зростає як квадратний корінь абсолютної температури. Середня швидкість молекул у повітрі в теплий день (25 °С, 298 К) на 4% більша за їхню середню швидкість у холодний день (0 °С, 273 К). Отже, ми можемо трактувати температуру як показник середньої швидкості молекул у газі. Високі температури відповідають високим середнім швидкостям, а низькі — нижчим середнім швидкостям (рис. 5).