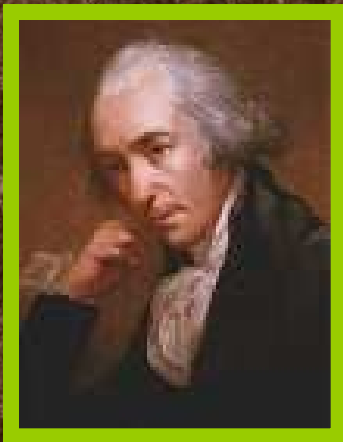
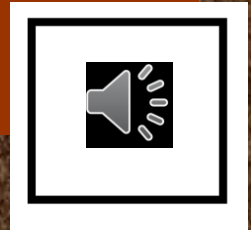
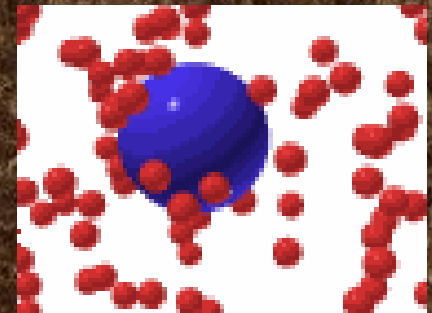
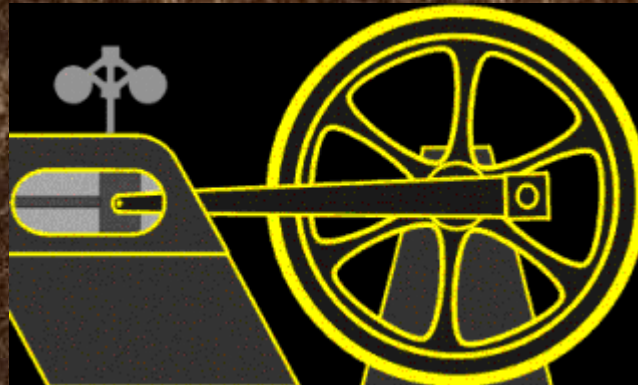


Přednášky z lékařské biofyziky

Biofyzikální ústav Lékařské fakulty
Masarykovy univerzity, Brno

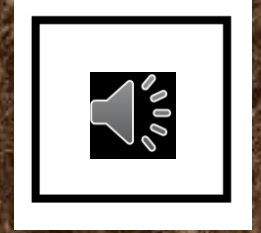


JAMES WATT
19.1.1736 - 19.8.1819



**Termodynamika – principy,
které vládnou přírodě**

Obsah přednášky



- Vysvětlení základních pojmů termodynamiky, práce a teplo
- 1. a 2. termodynamický zákon
- Vysvětlení vztahu mezi entropií a neuspořádaností termodynamického systému, Boltzmannův princip

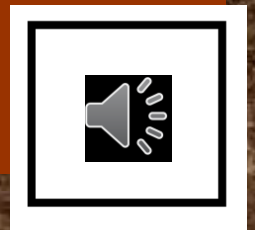
Termodynamika - fyzikální obor, zabývající se přeměnami energie v makroskopických systémech.

- Rozvoj: 19. století - parní stroje, výbušné motory, turbíny.
- Začátkem 20. století - základ fyzikální chemie
- Klíč k pochopení zvláštností života - nerovnovážná termodynamika

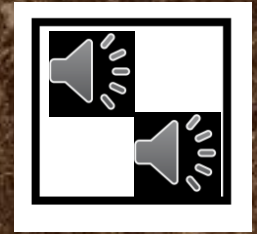


TERMODYNAMICKÝ SYSTÉM - jakékoliv makroskopické těleso (statistický soubor částic, ještě v 19. stol. však spojité prostředí - kontinuum)

- Izolovaný systém nemůže se svým okolím vyměňovat energii a částice.
- Uzavřený systém nemůže vyměňovat částice, energii ano.
- Otevřený systém vyměňuje částice i energii.
- Izolovaný termodynamický systém musí dospět do rovnovážného stavu, v němž se makroskopicky nemění.
- Existence živých systémů je neslučitelná se stavem termodynamické rovnováhy.
- **ŽIVÉ SYSTÉMY JSOU SYSTÉMY OTEVŘENÉ**



Základní pojmy

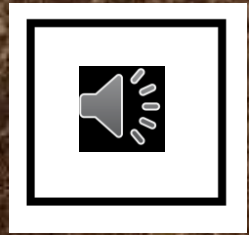


- Veličiny, které popisují termodynamický systém v rovnovážném stavu, se nazývají stavové.
- K úplnému popisu stavu termodynamického systému je nutný určitý soubor stavových veličin.
- Tyto veličiny jsou uváděny do vzájemného vztahu ve stavových rovnicích.
- Nejjednodušší tmd. systém: ideální plyn.
- Stavová rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT$$

$$[\text{Pa}, \text{m}^3, \text{mol}, \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}, \text{K}]$$

Reverzibilní (vratný) děj

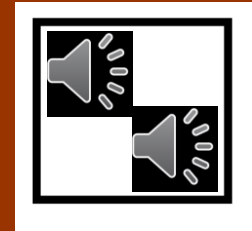


- Prochází-li systém posloupností rovnovážných stavů, které se od sebe liší pouze nekonečně malými rozdíly hodnot stavových veličin, hovoříme o reverzibilním (vratném) ději, protože při “změně znaménka” těchto rozdílů se může posloupnost těchto rovnovážných stavů realizovat v opačném sledu.
- Ireverzibilní (nevratný) děj
- Kruhový děj: počáteční a konečný stav systému jsou totožné
- Znaménková konvence: Teplo i práci přijímanou systémem považujeme za veličiny kladné, teplo systémem odevzdávané a práci systémem konanou považujeme za veličiny záporné.

Práce termodynamického systému

Objemová, též mechanická práce tmd. systému (“práce pístu”):

$$W = p \Delta V$$



Elektrická práce:

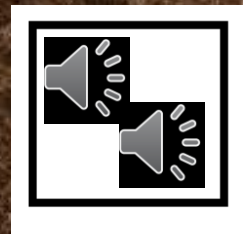
$$W = QU$$

- Práce nutná pro přenos elektrického náboje Q mezi místy o potenciálovém rozdílu U

Chemická práce:

$$W = \Delta G$$

- Práce potřebná k tomu, aby se zvětšilo nebo zmenšilo množství chemické látky o Δn při chemické reakci. ΔG je chemický potenciál.



Další důležité veličiny:

Termodynamická (Kelvinova, absolutní) teplota je veličina úměrná střední kinetické energii jedné částice ideálního *jednoatomového* plynu, definovaná vztahem:

$$T = \frac{2}{3k} \cdot W_{KS}$$

pak ale platí:

$$W_{KS} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

Vnitřní energie systému je součet kinetických energií všech částic, které tvoří systém, a potenciálních energií vzájemných interakcí těchto částic.

Teplo (tepelná energie) je ta část vnitřní energie systému, kterou si mohou vyměnit tmd. systémy s různými teplotami a která se přitom nemění v práci.

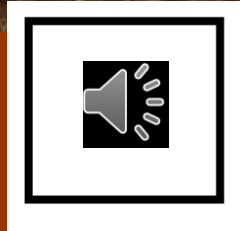
1. TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

(formulace zákona zachování energie
užívaná v termodynamice):

$$\Delta U = W + Q \quad dU = dW + dQ$$

Čteme např.: Vnitřní energie systému se zvýší o práci, kterou vykonalo okolí na systému, a o teplo, které systém z okolí přijal.

Vnitřní energie je stavovou veličinou, teplo a práce nejsou



2. TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

2. Termodynamický zákon (definice entropie S):

Lze ukázat, že pro systémy, které mohou vyměňovat teplo se svým okolím, platí:

$$dS \geq dQ/T \quad (T \text{ je teplota})$$

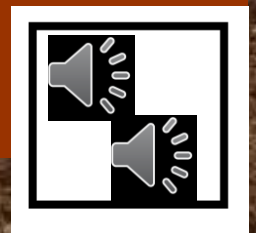
*Celková entropie jakéhokoliv **izolovaného** termodynamického systému ($dQ = 0$) má tendenci růst v čase, dokud nedosáhne maximální hodnoty, tj.*

$$dS \geq 0.$$

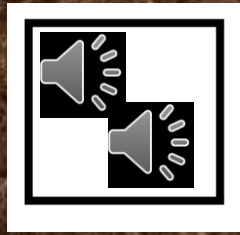
Tento zákon určuje “směr” procesů probíhajících v přírodě a je jedním z nejdůležitějších přírodních zákonů.

Pouze pro vratné procesy (rovnovážné stavy) platí:

$$dS = 0$$



Entropie a neuspořádanost



Entropie S termodynamického systému závisí na počtu různých možných *mikroskopických* uspořádání částic (mikrostavů), které vedou k témuž pozorovanému makroskopickému stavu termodynamického systému. Entropie systému je vyšší, je-li mikroskopické uspořádání systému více neuspořádané a nepravidelné.

Ludwig Boltzmann odvodil tuto skutečnost vyjadřující vzorec (Boltzmannův princip):

$$S = k \ln W$$

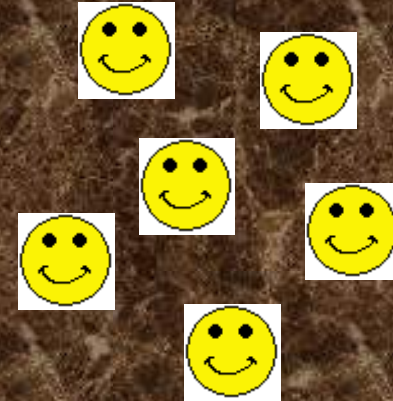
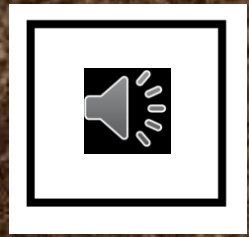
Kde W je počet mikrostavů, které mohou vytvořit daný makrostav
 k je Boltzmannova konstanta ($k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, N_A je Avogadrova konstanta)

S je stavovou funkcí.

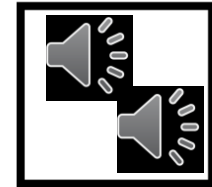
Odvození výše uvedeného vzorce je zdlouhavé a relativně obtížné. Dále bude podáno poněkud zjednodušené kvalitativní vysvětlení.

Předpoklad dalších úvah: **celková energie částic a jejich počet v systému se nemění.**

„Pokus s kuličkami“



- Kuličky mohou být rozlišeny pomocí písmen nebo zůstat nerozlišeny.
- V krabici od bot narýsuje čáru, rozdělující její dno na dvě stejné poloviny.
- Krabicí zatřepeme, a pak zaznamenáme rozmístění kuliček.
- *Zjednodušení: zabýváme se pouze polohami kuliček, jejich hybnost nebo energii nebereme v úvahu.*



MAKROSTAV 1:

●●●●●●	
--------	--

Počet mikrostavů: 1

ABCDEF	
--------	--

MAKROSTAV 2:

●●●●●●	●
--------	---

Počet mikrostavů: 6

ABCDE	F
-------	---

ABCDF	E
-------	---

ABCEF	D
-------	---

ABDEF	C
-------	---

ACDEF	B
-------	---

BCDEF	A
-------	---

MAKROSTAV 3:

●●●●●	●●
-------	----

Počet mikrostavů: 15

ABCD	EF
------	----

ABCE	DF
------	----

ABDE	CF
------	----

ACDE	BF
------	----

BCDE	AF
------	----

ABCF	DE
------	----

ABDF	CE
------	----

ACDF	BE
------	----

BCDF	AE
------	----

ABEF	CD
------	----

ACEF	BD
------	----

BCEF	AD
------	----

ADEF	BC
------	----

BDEF	AC
------	----

CDEF	AB
------	----

MAKROSTAV 4:

●●●	●●●
-----	-----

Počet mikrostavů: 20

ABC	DEF
-----	-----

ABD	CEF
-----	-----

ABE	CDF
-----	-----

ABF	CDE
-----	-----

ACD	BEF
-----	-----

ACE	BDF
-----	-----

ACF	BDE
-----	-----

ADE	BCF
-----	-----

ADF	BCE
-----	-----

AEF	BCD
-----	-----

BCD	AEF
-----	-----

BCE	ADF
-----	-----

BCF	ADE
-----	-----

BDE	ACF
-----	-----

BDF	ACE
-----	-----

BEF	ACD
-----	-----

CDE	ABF
-----	-----

CDF	ABE
-----	-----

CEF	ABD
-----	-----

DEF	ABC
-----	-----

MAKROSTAV 5:

●●	●●●●
----	------

Počet mikrostavů: 15

MAKROSTAV 6:

●	●●●●●
---	-------

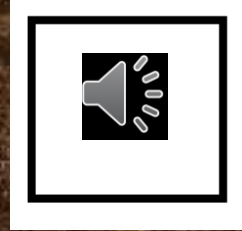
Počet mikrostavů: 6

MAKROSTAV 7:

	●●●●●●
--	--------

Počet mikrostavů: 1

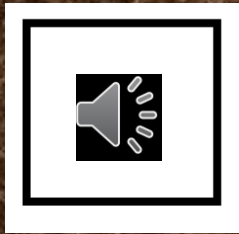
Několik termínů ze statistické fyziky:



- fázový prostor („dno krabice“ 😊)
- buňka fázového prostoru („polovina dna krabice“ 😊)
- obsazovací čísla („počty kuliček v jedné nebo druhé polovině“ 😊)
- rozdělovací funkce
- mikrostav a makrostav

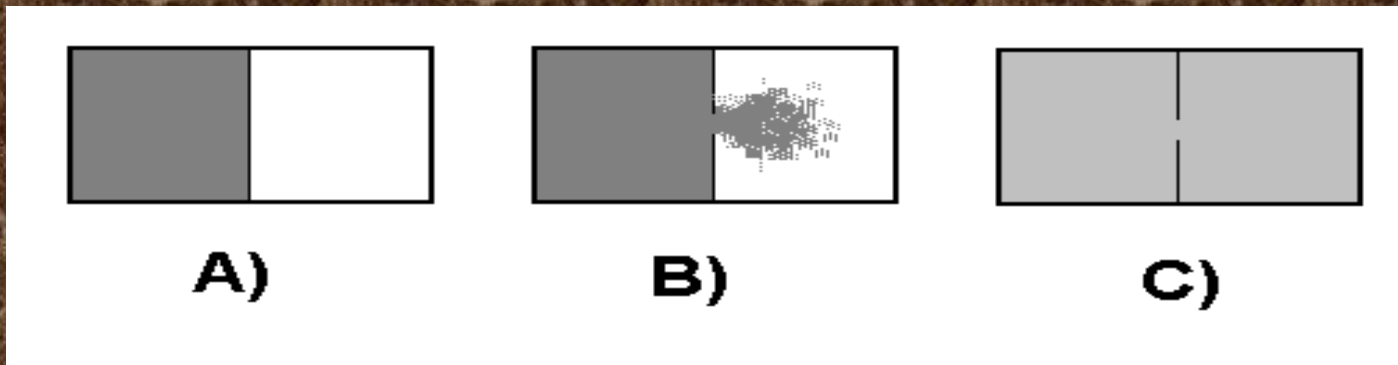
Věty, jejichž pravdivost je předpokládána a ověřena praxí:

- Pravděpodobnost vzniku kteréhokoliv ze všech možných mikrostavů je stejná.
- V izolovaných systémech se s největší pravděpodobností realizuje makrostav, který je tvořen největším počtem mikrostavů.
- Počet mikrostavů, které realizují tentýž makrostav, se nazývá **statistická pravděpodobnost (P či W)**.
- Makrostavy se od sebe liší svými obsazovacími čísly.



Gay-Lussacův pokus:

(průběh nevratného děje v ideálním plynu)



A) Nádoba je rozdělena na dvě části. V jedné z nich se nachází stlačený ideální plyn v rovnovážném stavu.

B) Do přepážky uděláme otvor, plyn expanduje do druhé části nádoby - probíhá nevratný děj.

C) Po uplynutí (relaxačního) času se v obou částech nádoby ustaluje tmd. rovnováha.

Mezi oběma myšlenými pokusy existuje analogie:

Soubor částic

Ideální plyn

probíhá přechod z makrostavu 1 do makrostavu 4



probíhá přechod z poč. stavu (A) do konečného stavu (C)

roste statistická pravděpodobnost



proces je nevratný

uspořádanost se snižuje-
-roste neuspořádanost



roste ENTROPIE



Autor:
Vojtěch Mornstein

Grafika:

- - -

Poslední revize a ozvučení: říjen 2020