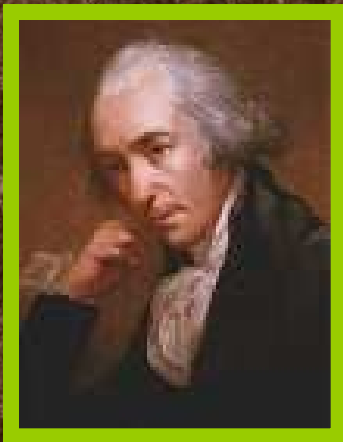
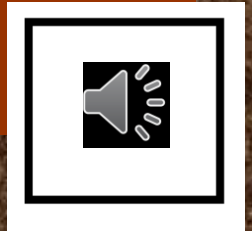
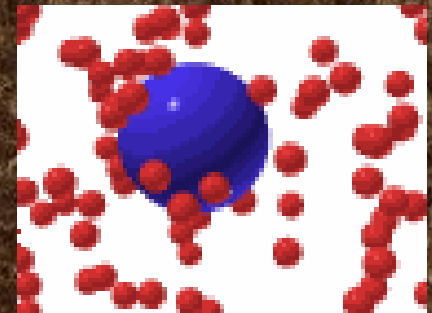
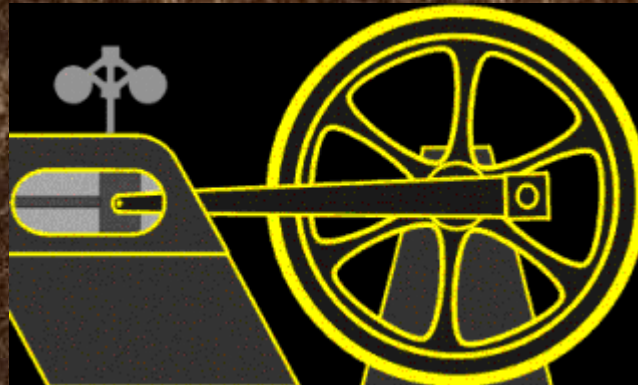


# Přednášky z lékařské biofyziky

Biofyzikální ústav Lékařské fakulty  
Masarykovy univerzity, Brno

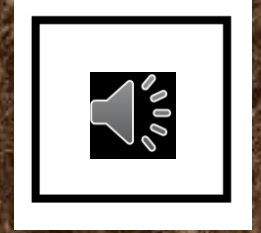


JAMES WATT  
19.1.1736 - 19.8.1819



**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

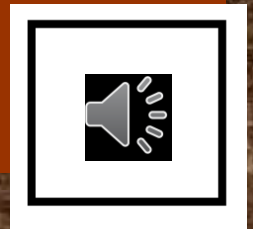
# Termodynamika - fyzikální obor, zabývající se přeměnami energie v makroskopických systémech.

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



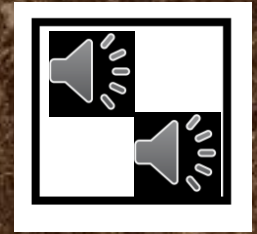
# TERMODYNAMICKÝ SYSTÉM - jakékoliv makroskopické těleso (statistický soubor částic, ještě v 19. stol. však spojité prostředí - kontinuum)

- 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

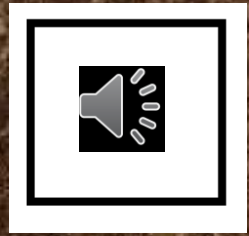


- Veličiny, které popisují termodynamický systém v rovnovážném stavu, se nazývají stavové.
- K úplnému popisu stavu termodynamického systému je nutný určitý soubor stavových veličin.
- Tyto veličiny jsou uváděny do vzájemného vztahu ve stavových rovnicích.
- Nejjednodušší tmd. systém: ideální plyn.
-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

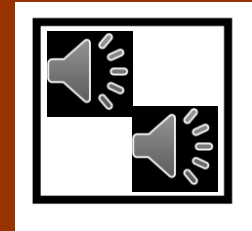


- Prochází-li systém posloupností rovnovážných stavů, které se od sebe liší pouze nekonečně malými rozdíly hodnot stavových veličin, hovoříme o reverzibilním (vratném) ději, protože při “změně znaménka” těchto rozdílů se může posloupnost těchto rovnovážných stavů realizovat v opačném sledu.
- Ireverzibilní (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:

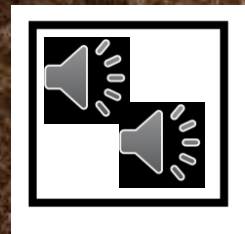
$$W = QU$$

- 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  $\Delta n$  při chemické reakci.  $\Delta G$  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.



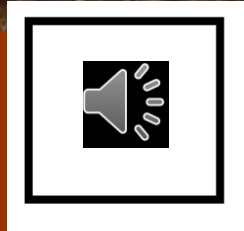
# 1. TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

(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:

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

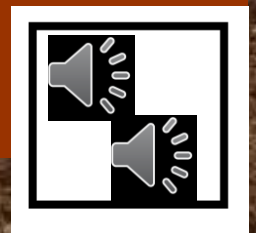
*Celková entropie jakéhokoliv **izolovaného** termodynamického systému ( $dQ = 0$ ) má tendenci růst v čase, dokud nedosáhne maximální hodnoty, tj.*

$$dS \geq 0.$$

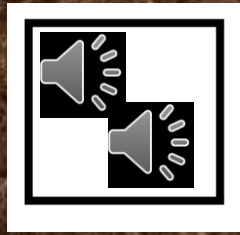
Tento zákon určuje “směr” procesů probíhajících v přírodě a je jedním z nejdůležitějších přírodních zákonů.

*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):

$$S = k \ln W$$

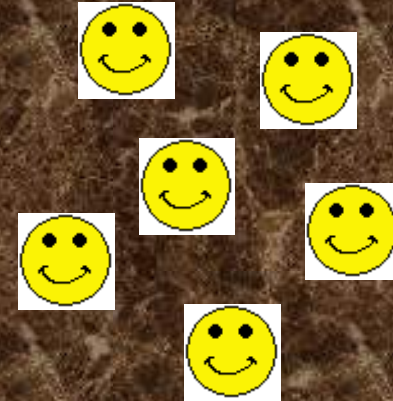
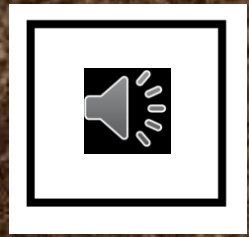
Kde  $W$  je počet mikrostavů, které mohou vytvořit daný makrostav  
 $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $N_A$  je Avogadrova konstanta)

$S$  je stavovou funkcí.

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

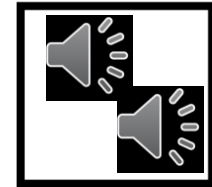
Předpoklad dalších úvah: **celková energie částic a jejich počet v systému se nemění.**

# „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:**

●	●●●●●
---	-------

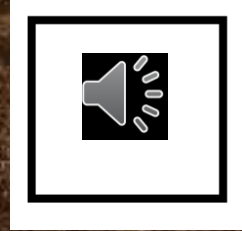
**Počet mikrostavů: 6**

**MAKROSTAV 7:**

	●●●●●●
--	--------

**Počet mikrostavů: 1**

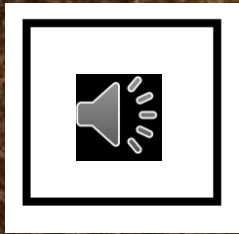
# Několik termínů ze statistické fyziky:



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

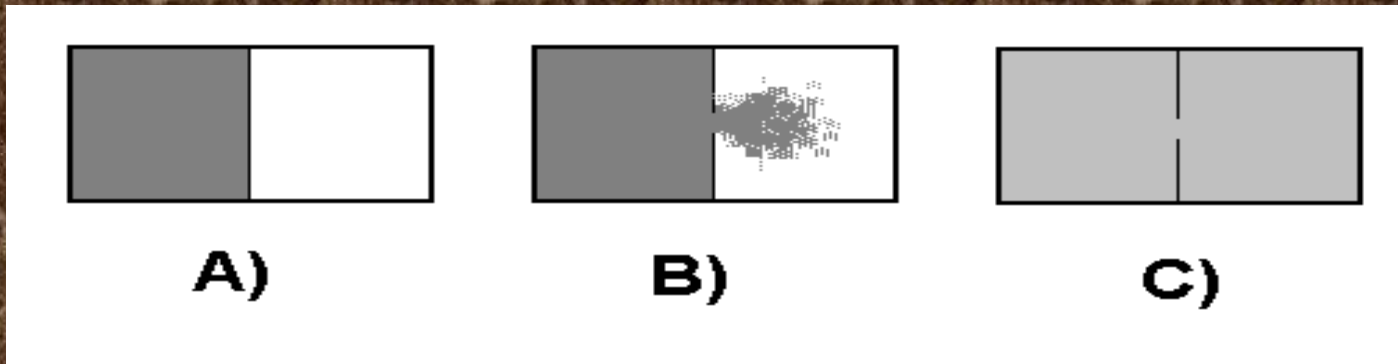
Věty, jejichž pravdivost je předpokládána a ověřena praxí:

- 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