

# Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček

email: [ps94@sci.muni.cz](mailto:ps94@sci.muni.cz)

## Osnova:

- Úvod a historický vývoj
- Volné plyny
- Získávání vakua
- Měření vakua
- Navazující přednášky:
  - Vakuová fyzika 2
    - \* Vázané plyny
    - \* Sorpční vývěvy
    - \* Měření ve vakuové fyzice
    - \* Konstrukční prvky vakuových zařízení
  - Experimentální metody a speciální praktikum A 1

## Literatura

- J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981
- L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968
- V. Sítko: Vakuová technika, SNTL, Praha 1966
- V. Dubravcová: Vákuová a ultravákuová technika, Alfa, Bratislava 1992
- A. Roth: Vacuum technology, Elsevier, 1990
- Zpravodaje CVS
- Firemní katalogy

- Vakuum je označení pro stav systému, který obsahuje plyny, nebo páry, pokud je jejich tlak menší než tlak atmosférický.
- Jednotky tlaku:
- $Pa[Nm^{-2}]$  - jednotka v soustavě SI
- $1\ bar = 10^5\ Pa$
- $1\ mbar = 100\ Pa$
- $1\ torr = 133,322\ Pa$
- $1\ atm = 101325\ Pa = 760\ torr$

## Historický vývoj

- 1643 - E.Torricelli, první vakuum
- 1654 - O. von Guericke, magdeburské polokoule
- 1855 - Geissler, výboje v plynech
- 1874 - H.G.Mac-Leod, kompresní manometr
- 1906 - Pirani, tepelný manometr
- 1912 - W. Gaede, molekulární vývěva
- 1913 - W. Gaede, difúzní vývěva
- 1916 - Buckley, ionizační manometr
- 1936 - Pennig, výbojový manometr s magnetickým polem
- 1958 - Becker, turbomolekulární vývěva

## Využití vakua

- Věda a výzkum
  - diagnostické metody
  - plazmochemické reaktory
  - urychlovače částic
  - termojaderné reaktory
- Průmyslové aplikace
  - vytváření tenkých vrstev
  - výroba elektronických součástek
  - osvětlovací technika

## Závislost tlaku na nadmořské výšce

výška [km]	tlak [mbar]	tlak [Pa]
0	$10^3$	$10^5$
11	$10^2$	$10^4$
50	$10^{-2}$	$10^0$
100	$10^{-3}$	$10^{-1}$
200	$10^{-6}$	$10^{-4}$
1000	$10^{-10}$	$10^{-8}$
2000	$10^{-15}$	$10^{-13}$

## Rozdělení vakua

vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké hrubé, technické	$10^3 - 10^0$	$10^5 - 10^2$
střední	$10^0 - 10^{-3}$	$10^2 - 10^{-1}$
vysoké	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-1} - 10^{-5}$
extrémně vysoké	$< 10^{-7}$	$< 10^{-5}$

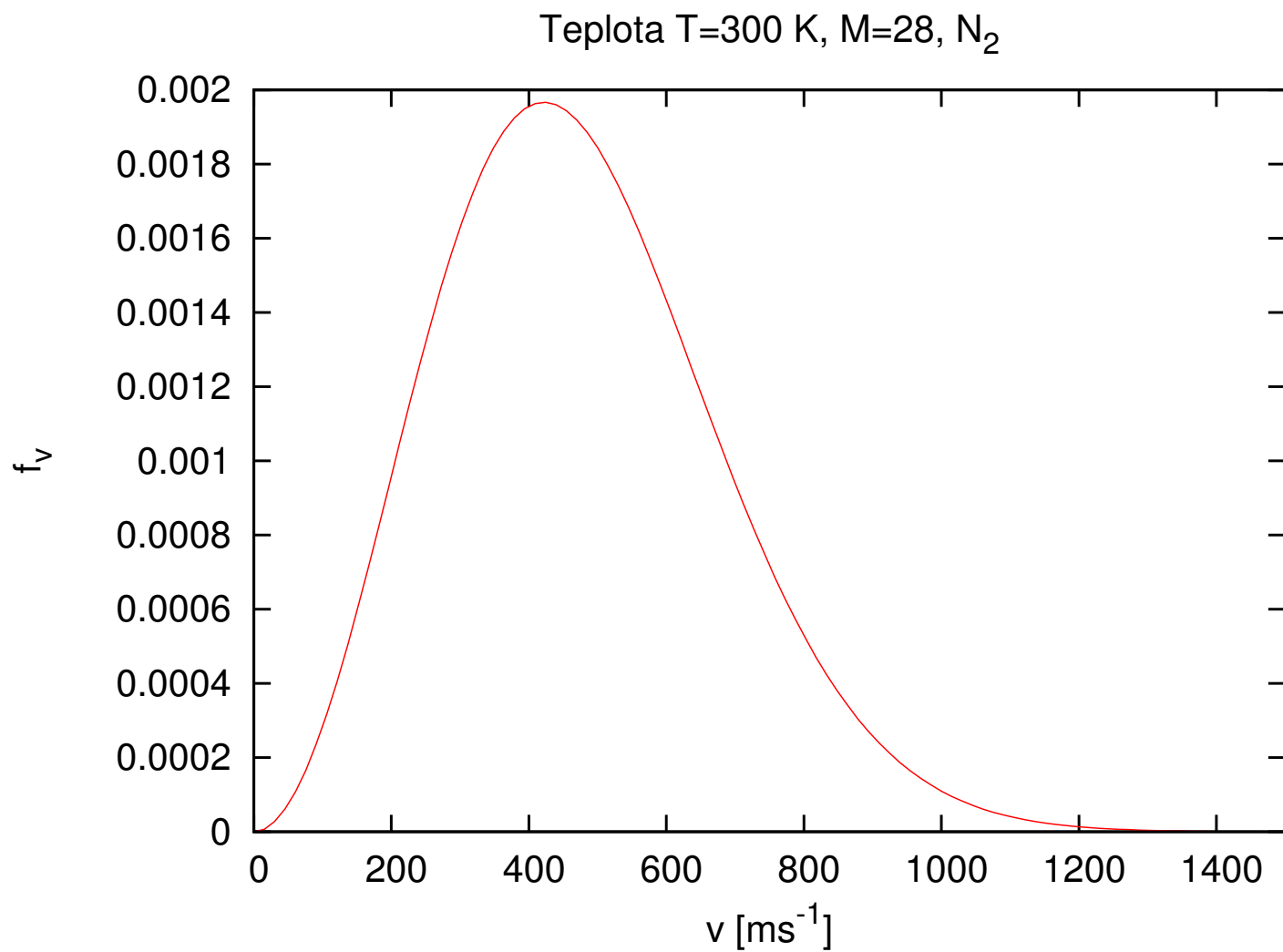


## Vlastnosti plynů

- Plyny volné
  - plyny v statickém stavu
  - plyny v dynamickém stavu
- Plyny vázané
  - plyny vázané na povrchu, nebo v objemu pevné látky

## Volné plyny v statickém stavu

- Avogadrův zákon: Stejné objemy různých plynů obsahují při téže tlaku a teplotě stejný počet molekul.
- Mol je počet gramů stejnorodé látky číselně rovný molekulové hmotnosti
- Jeden mol různých plynů má při stejném tlaku a teplotě vždy týž objem, za tzv. normálních podmínek  $V_m = 22415 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ .
- Avogadrovo číslo určuje počet molekul v jednom molu  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ , tento počet je pro všechny látky stejný.
- Loschmidtovo číslo je podíl Avogadrova čísla a objemu molu  $N_L = \frac{N_A}{V_m} = 2,69 \cdot 10^{19}$  (za normálních podmínek), udává počet molekul v objemu  $1 \text{ cm}^{-3}$ .
- normální podmínky : *tlak*  $p = 101324 \text{ Pa}$ ; *teplota*  $T = 273 \text{ K}$



Maxwellův rozdělovací zákon

$$f_v = \frac{1}{N} \frac{dN}{dv}$$

$$f_v = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left( -\frac{m_0 v^2}{2kT} \right)$$

nejpravděpodobnější rychlost

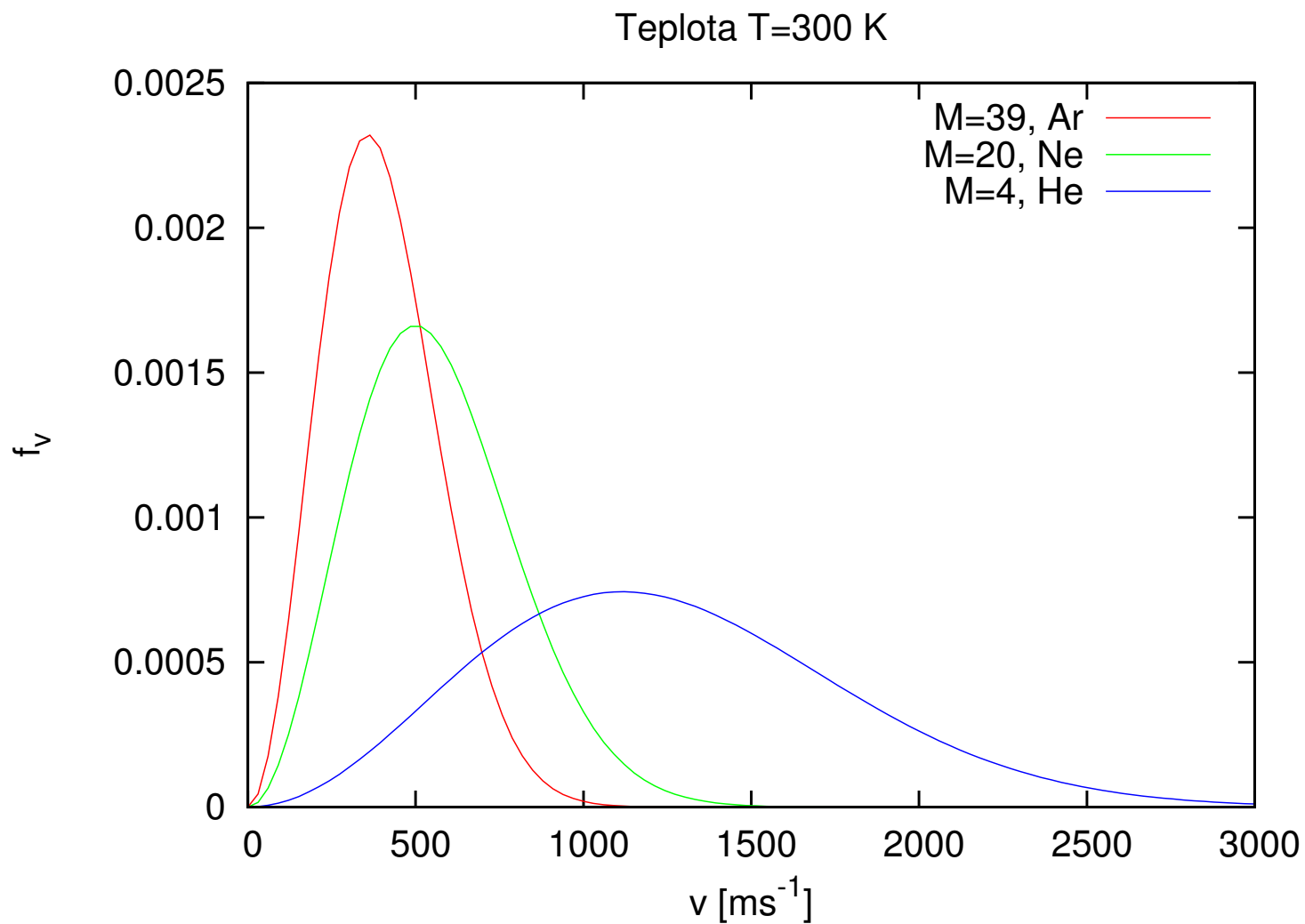
$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

střední kvadratická rychlost

$$v_e = \sqrt{\frac{3}{2}} v_p = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

střední aritmetická rychlost

$$v_a = \sqrt{\frac{4}{\pi}} v_p = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$



Maxwellův rozdělovací zákon - různé plyny

střední kinetická energie molekul

$$\frac{1}{2}m_0v_{ef}^2 = \frac{3}{2}kT$$

vztah mezi tlakem, koncentrací a teplotou

$$p = nkT$$

střední volná dráha molekul

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2}$$

$n$  - je koncentrace,  $d$  - efektivní průměr molekuly

stavová rovnice pro ideální plyn

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0}$$

stavová rovnice pro ideální plyn, látkové množství  $m$  molů

$$\frac{pV}{T} = mR$$

$R$  - je univerzální plynová konstanta,  $R = kN_a$

Daltonův zákon parciálních tlaků

$$p = \sum_{i=1}^j p_i$$

počet srážek molekul se stěnou o ploše  $1 \text{ cm}^2$  za dobu  $1 \text{ s}$

$$\nu_1 = \frac{1}{4} n v_a$$

$v_a$  je střední aritmetická rychlost

## Volné plyny v dynamickém stavu

ve vakuovém systému jsou různé teploty, nebo tlaky, dochází k přenosu energie, nebo k proudění plynů

### Proudění plynů

- turbulentní (vířivé)
- laminární (viskózní)
- molekulární

Knudsenovo číslo

$$K_n = \frac{X}{\lambda}$$

- $K_n > 100$  turbulentní nebo laminární proudění
- $1 < K_n < 100$  přechodová oblast, Knudsenovo proudění
- $K_n < 1$  molekulární proudění



- laminární proudění - nízké vakuum
- Knudsenovo proudění - střední vakuum
- molekulární proudění - vysoké a extrémně vysoké vakuum

Proud plynu je množství plynu procházející za 1 s určitým průřezem

$$I = p \left( \frac{dV}{d\tau} \right)_p$$

Tok plynu

$$S = \left( \frac{dV}{d\tau} \right)_p$$

tok plynu na hrdle vývěvy se označuje jako čerpací rychlost vývěvy

$$I = pS$$

**Vakuová vodivost** [ $cm^3 s^{-1}$ ,  $m^3 s^{-1}$ ]

$$G = \frac{I}{p_2 - p_1}$$

Vodivost kruhového potrubí

- pro molekulární proudění  $G_M = A \frac{D^3}{L}$
- pro laminární proudění  $G_L = A p_s \frac{D^4}{L}$
- pro Knudsenovo proudění  $G = G_L + a G_M$ 
  - $D$  - průměr potrubí
  - $L$  - délka potrubí
  - $A$  - číselná konstanta závislá na zvolených jednotkách a proudícím plynu
  - $a$  - koeficient, pro vzduch a teplotu 300 K,  $a \doteq 0,9$

Příklad:

Vývěva připojená trubicí s vodivostí  $G$ , pak platí:

$$I = G(p_2 - p_1), \quad I = p_1 S_1, \quad I = p_2 S_2$$

můžeme vyjádřit  $S_2$

$$S_2 = S_1 \frac{1}{1 + \frac{S_1}{G}} \Rightarrow S_2 < S_1$$

pokud  $S_1$  je čerpací rychlost vývěvy, pak čerpací rychlost na konci trubice  $S_2$  je vždy menší.

Závěr: Vývěvu musíme spojovat s čerpaným systémem trubicí s co největší vodivostí.

## Vázané plyny

- adsorpce - proces ulpívání molekul na povrchu
  - fyziadsorpce
  - chemiadsorpce
- absorpce - proces pronikání molekul do pevné látky
- koeficient ulpění -  $\gamma = \frac{\nu_{1ef}}{\nu_1}$ 
  - $\nu_{1ef}$  - počet efektivních srážek
  - $\nu_1$  - počet všech srážek
- stupeň pokrytí -  $S = \frac{N_1}{N_{1p}}$ 
  - $N_1$  - počet adsorbovaných molekul na jednotce povrchu
  - $N_{1p}$  - počet volných míst na jednotce povrchu pro monomolekulární vrstvu
- orientační hodnota  $N_{1p} = 0.5 * 10^{15} cm^{-2}$

doba pobytu molekul na povrchu

$$t_p = t_{p0} \exp\left(\frac{W_{des}}{RT_s}\right)$$

doba úplného pokrytí povrchu monomolekulární vrstvou

$$t_p = \frac{N_{1p}}{\nu_{1ef}} = N_{1p} \sqrt{\frac{2k\pi}{Na}} \frac{\sqrt{TM_0}}{\gamma} \frac{1}{p}$$

počet desorbovaných molekul plynu z povrchu  $1 \text{ cm}^2$  za  $1 \text{ s}$

$$\nu_{des} = \frac{N}{t_{p0}} \exp\left(-\frac{W_{des}}{RT_s}\right)$$

vakuum	nízke	střední	vysoké	extrémně vysoké
tlak [ <i>mbar</i> ]	$10^3 - 10^0$	$10^0 - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	$< 10^{-7}$
koncentrace [ $cm^{-3}$ ]	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
střední dráha $\lambda$ [ <i>cm</i> ]	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
monovrstva $\tau$ [ <i>s</i> ]	$< 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
typ proudění	viskózní	Knudsenovo	molekulární	molekulární

## Rozdělení vývěv

- Transportní vývěvy
- Sorpční vývěvy

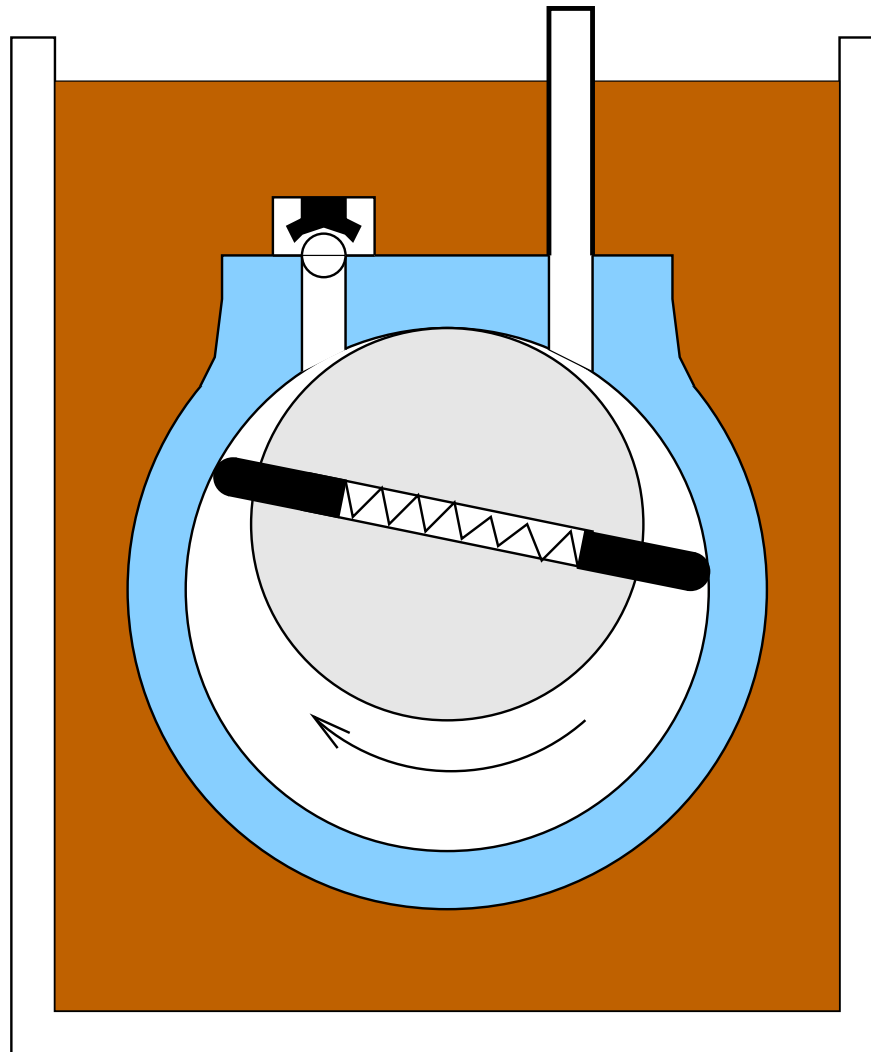
## Základní parametry vývěv

- Mezní tlak
- Rozsah pracovních tlaků
- Čerpací rychlost
- Maximální výstupní tlak

## Transportní vývěvy

- Mechanické vývěvy
  - S periodicky se měnícím pracovním prostorem
    - \* Pístové
    - \* Membránové
    - \* Rotační olejové
  - S neproměnným pracovním prostorem
    - \* Rootsovy
    - \* Molekulární
    - \* Turbomolekulární
- Paroproudové vývěvy
  - Vodní vývěvy
  - Ejektorové
  - Difúzní
- Založené na tepelné transpiraci, nebo ionizaci molekul

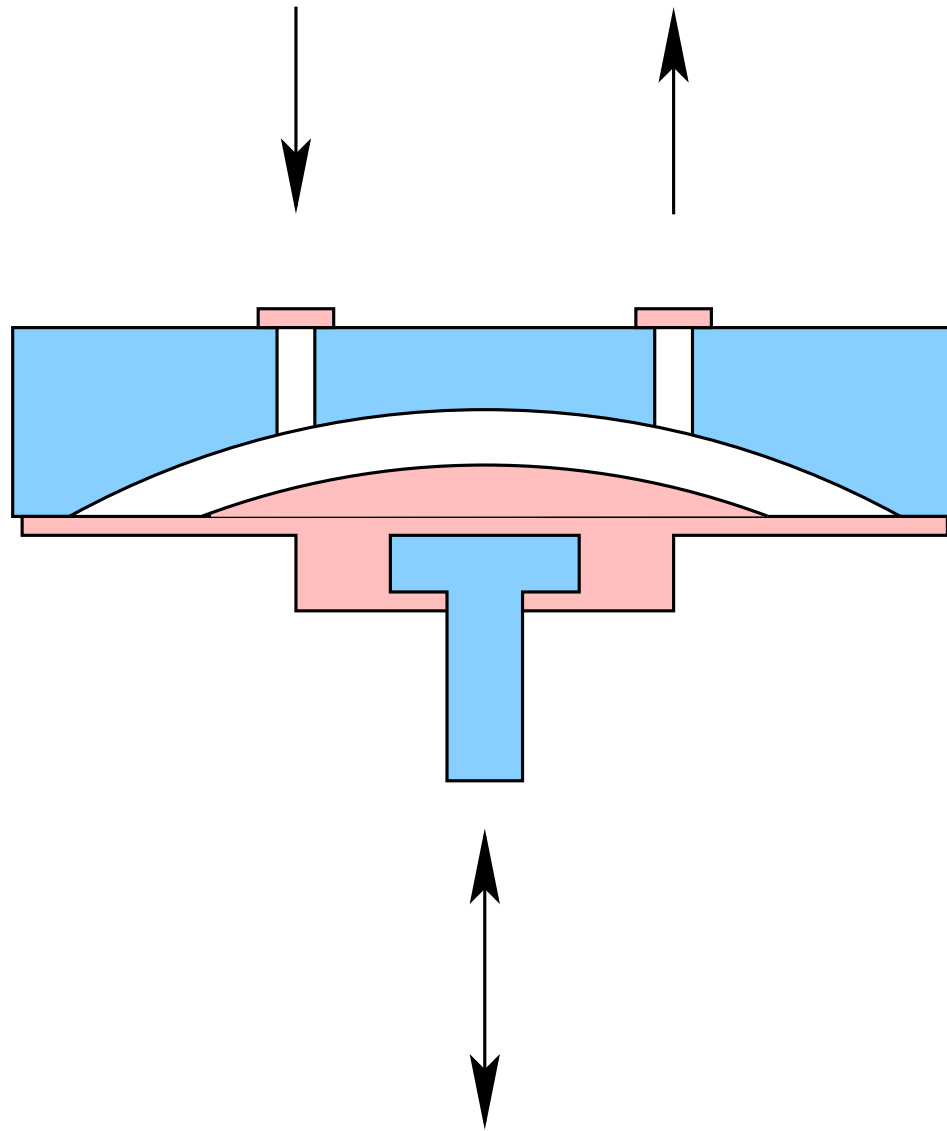




Rotační vývěva

## Rotační vývěva

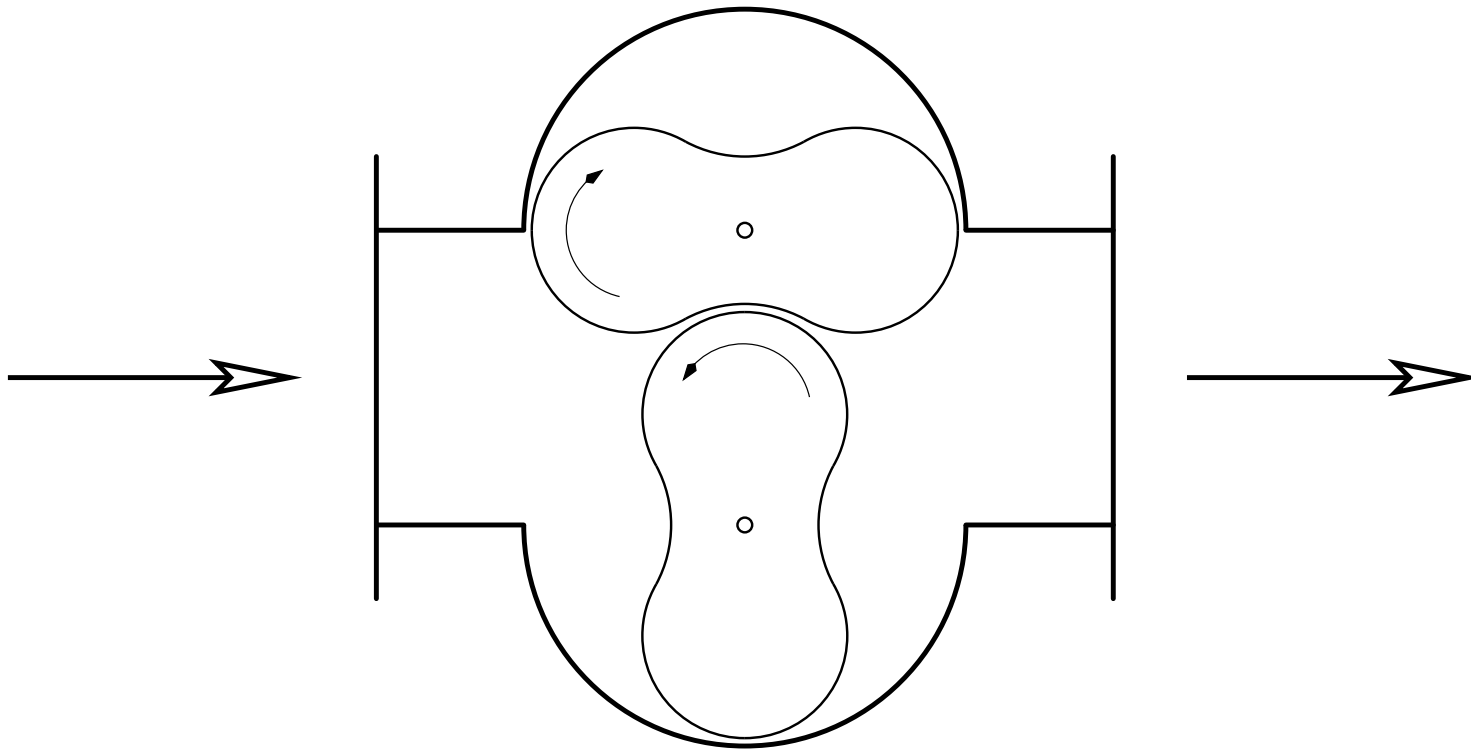
- pracuje od atmosférického tlaku
- mezní tlak kolem  $10^{-2} Pa$
- počet otáček  $300 - 600 min^{-1}$
- do čerpaného prostoru se dostávají páry oleje
- vibrace
- olej
  - utěsňuje a vyrovnává nerovnosti povrchu ve vývěvě
  - zmenšuje tření, zlepšuje chlazení
  - vyplňuje škodlivý prostor
- požadavky na olej
  - nízká tenze par  $\sim 10^{-3} Pa$
  - vhodné mazací vlastnosti
  - stálost proti štěpení a oxidaci



Membránová vývěva

## Membránová vývěva

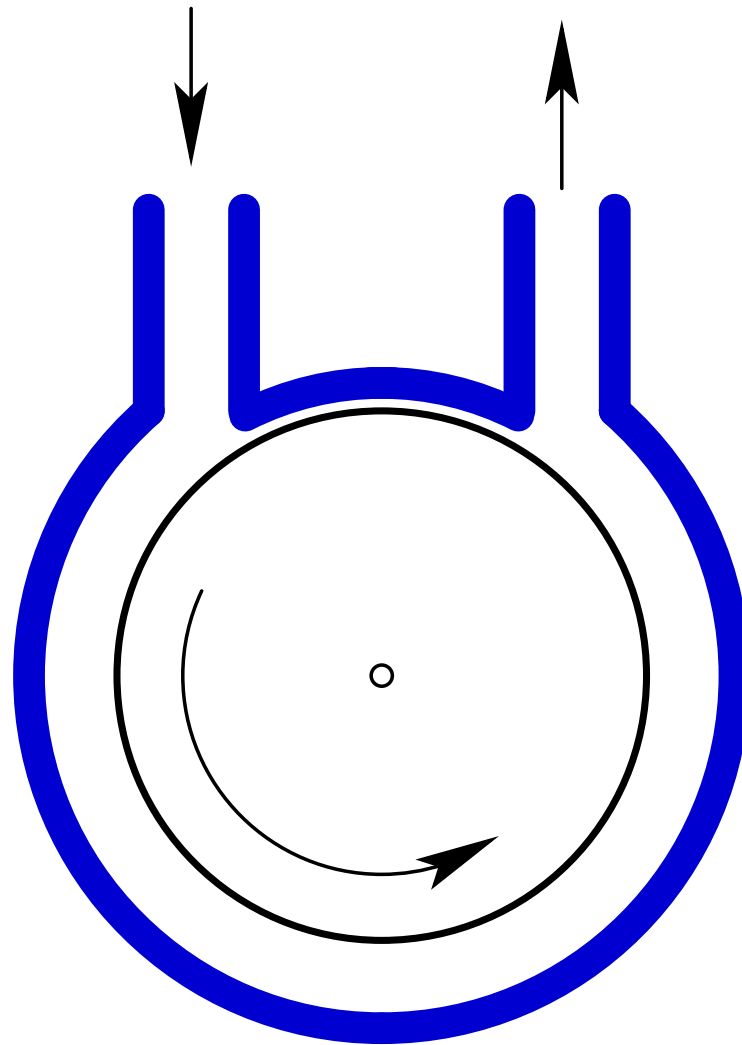
- pracuje od atmosférického tlaku
- mezní tlak  $\sim 10^2 Pa$
- suchá vývěva, bez oleje
- zpravidla více komor
  - řazení sériové - nižší mezní tlak
  - řazení paralelní - větší čerpací rychlost



Rootsova vývěva

## Rootsova vývěva

- potřebuje předčerpat na tlak asi  $10^2 Pa$
- mezní tlak  $\sim 10^{-3} Pa$
- počet otáček  $\sim 1000 min^{-1}$
- suchá vývěva, bez oleje
- velká čerpací rychlost
- mezera mezi rotory  $\sim 10^{-1} mm$
- vícestupňové provedení pracuje i od atmosférického tlaku

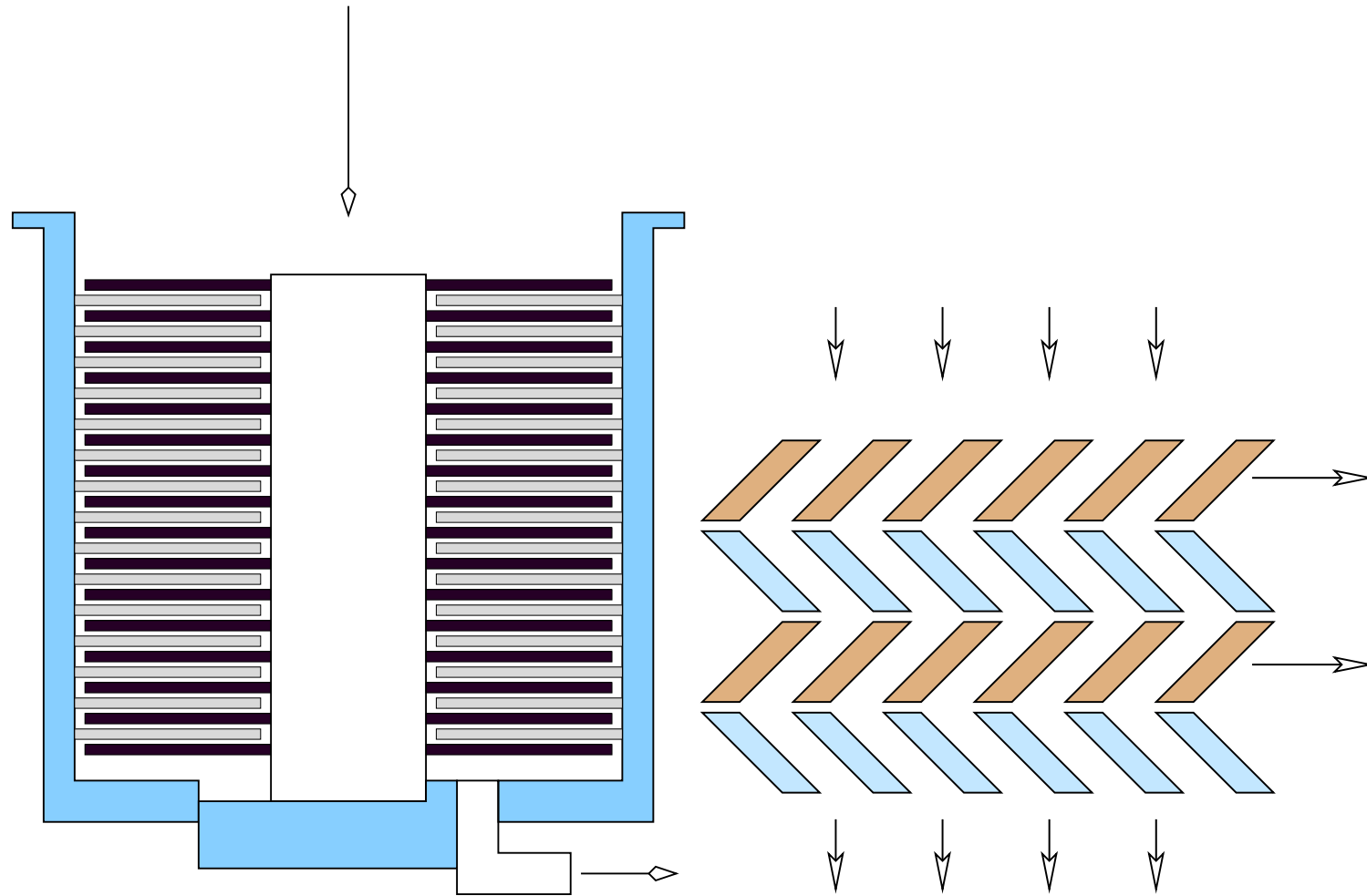


Molekulární vývěva

## Molekulární vývěva

- potřebuje předčerpat na tlak asi  $10^1 Pa$
- mezní tlak  $\sim 10^{-4} Pa$
- počet otáček  $\sim 10000 min^{-1}$
- suchá vývěva, bez oleje
- mezera mezi rotorem a tělem vývěvy  $\sim 10^{-1} mm$

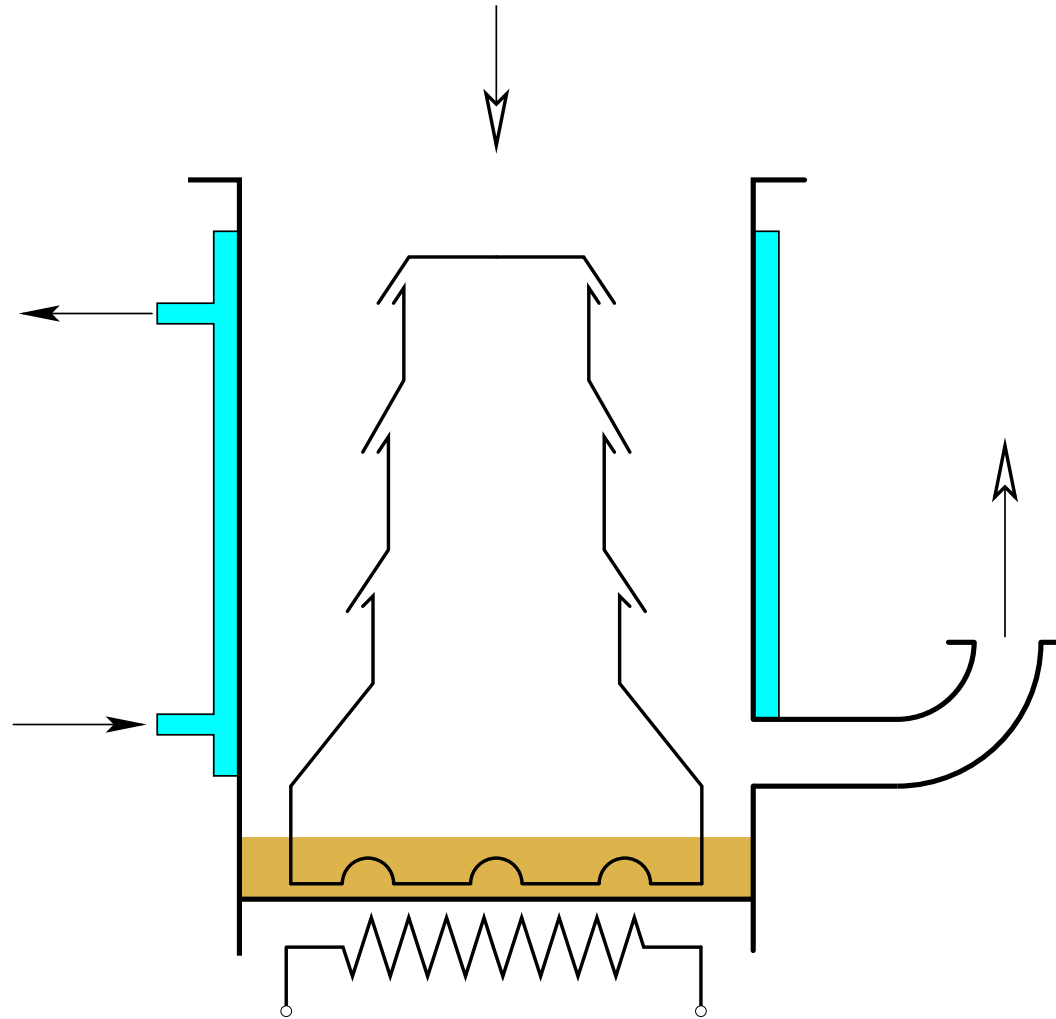




Turbomolekulární vývěva

## Turbomolekulární vývěva

- potřebuje předčerpát nejčastěji membránovou, nebo rotační vývěvou
- mezní tlak  $\sim 10^{-9} Pa$
- počet otáček až  $90000 min^{-1}$
- suchá vývěva, bez oleje
- mezera mezi rotorem a statorem  $\sim 10^0 mm$
- čerpá selektivně, lépe čerpá těžší molekuly



Difúzní vývěva

## Difúzní vývěva

- potřebuje předčerpát nejčastěji rotační vývěvou
- mezní tlak  $\sim 10^{-7} Pa$
- pracovní kapalina Hg, parafín, nejčastěji olej
- požadavky na pracovní kapalinu
  - nízká tenze par
  - stálost při provozu - odolnost proti štěpení
  - odolnost proti oxidaci
- jednoduchá konstrukce; jedno, nebo vícestupňové provedení

---

K zamezení vniku olejových par do čerpaného prostoru se používají:

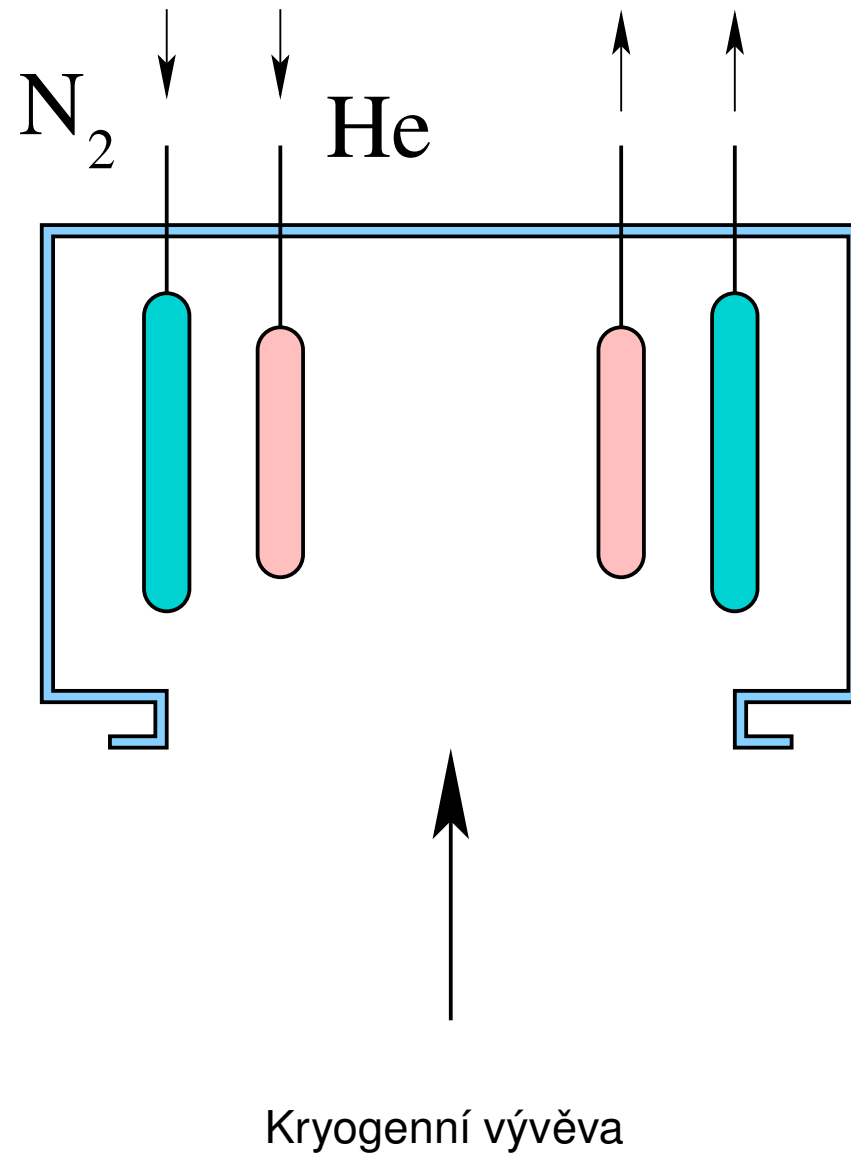
- lapače par - zpravidla chlazené vodou
- vymrazovačky - nejčastěji chlazené tekutým dusíkem

Použití těchto zařízení snižuje čerpací rychlost vývěvy.

V současné době je trend nahradit rotační olejové vývěvy suchými vývěvami (membránové, scroll,... ), které nepoužívají při čerpání olej, nebo jiné kapaliny a nahradit difúzní vývěvy turbomolekulárními vývěvami.

## Sorpční vývěvy

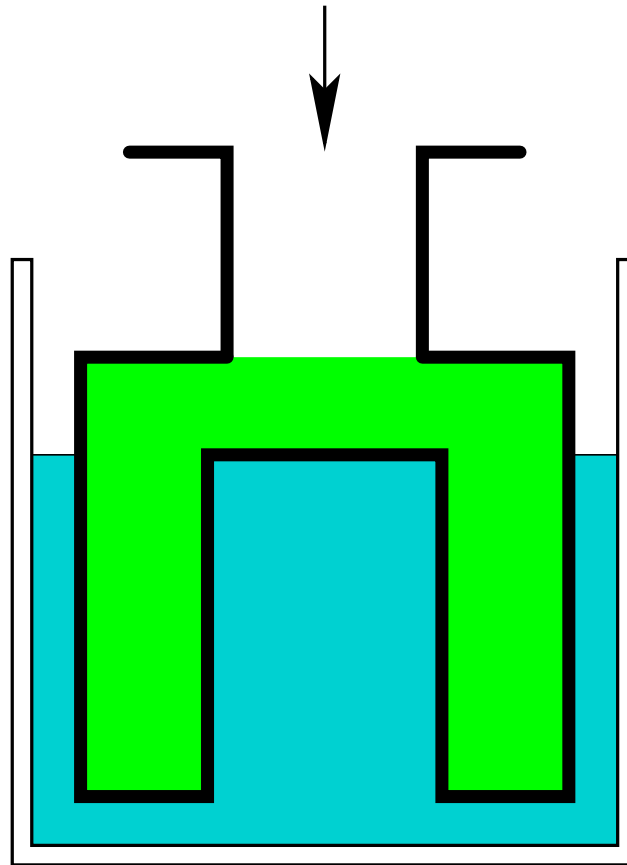
- Kryogenní vývěvy
- Zeolitové vývěvy
- Sublimační vývěvy
- Iontové vývěvy
- Getrové vývěvy



## Kryogenní vývěva

- dominantní proces je kondenzace
- dobře čerpá všechny plyny, které při dané teplotě kondenzují
- většina plynu - kryokondenzace
- $Ne, H_2, He$  - kryosorbce
- chlazení kapalně  $He - 4K, H_2 - 20K, N_2 - 77K$ , pracuje od  $\sim 10^5 Pa$
- získávání vysokého a extrémně vysokého vakua
- velká čerpací rychlost

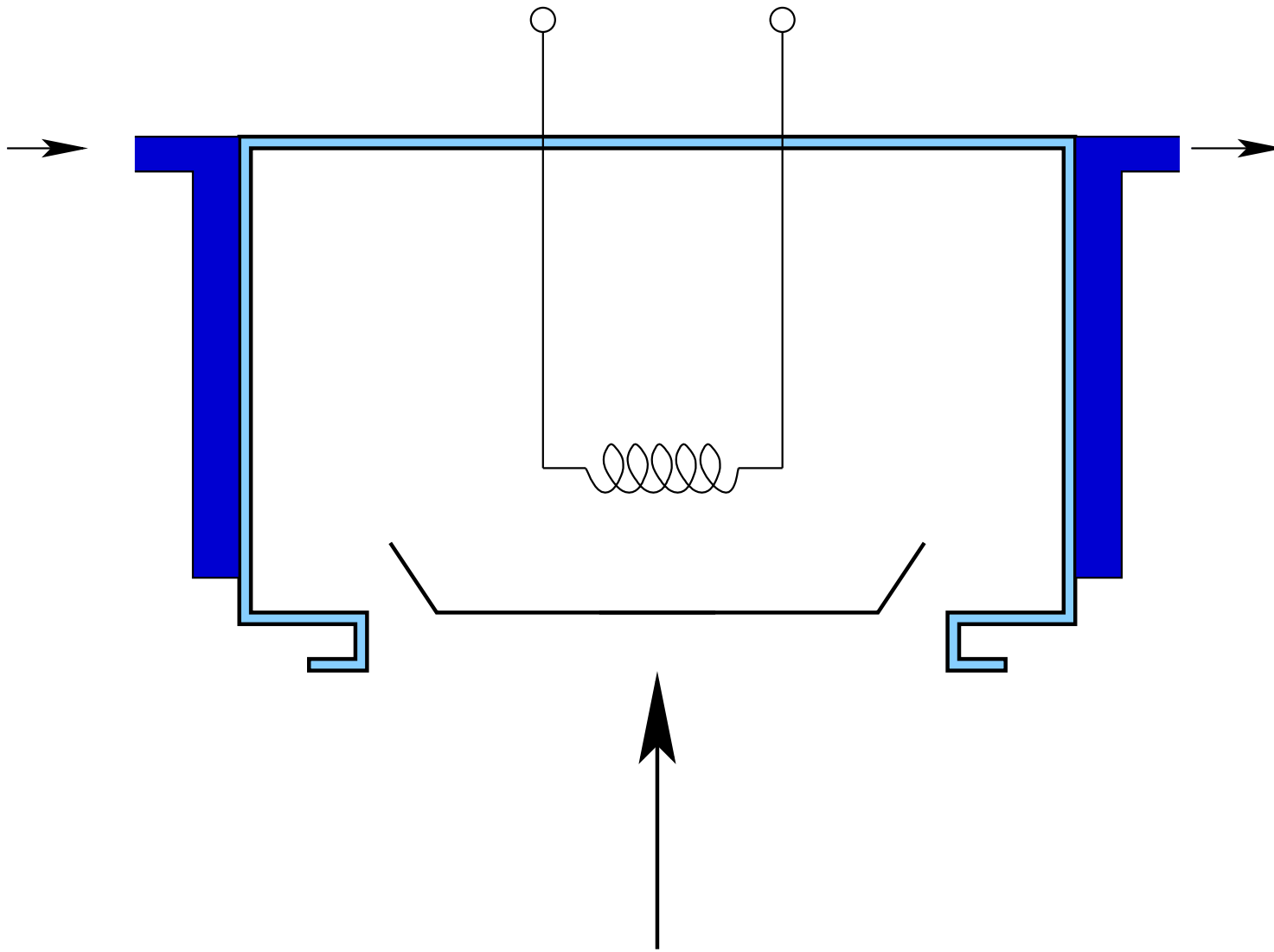




Zeolitová vývěva

## Zeolitová vývěva

- dominantní proces je fyzisorpce
- dobře čerpá  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ , uhlovodíky
- špatně čerpá plyny např.  $Ne$ ,  $He$ ,  $H_2$ , ...
- velký povrch,  $1g \sim 1000m^2$ , pracuje od  $\sim 10^5 Pa$
- dutiny a kanálky  $\sim 1nm$
- dá se regenerovat při vysoké teplotě
- zvětšení účinnosti snížením teploty zeolitu (tekutý dusík 77 K)

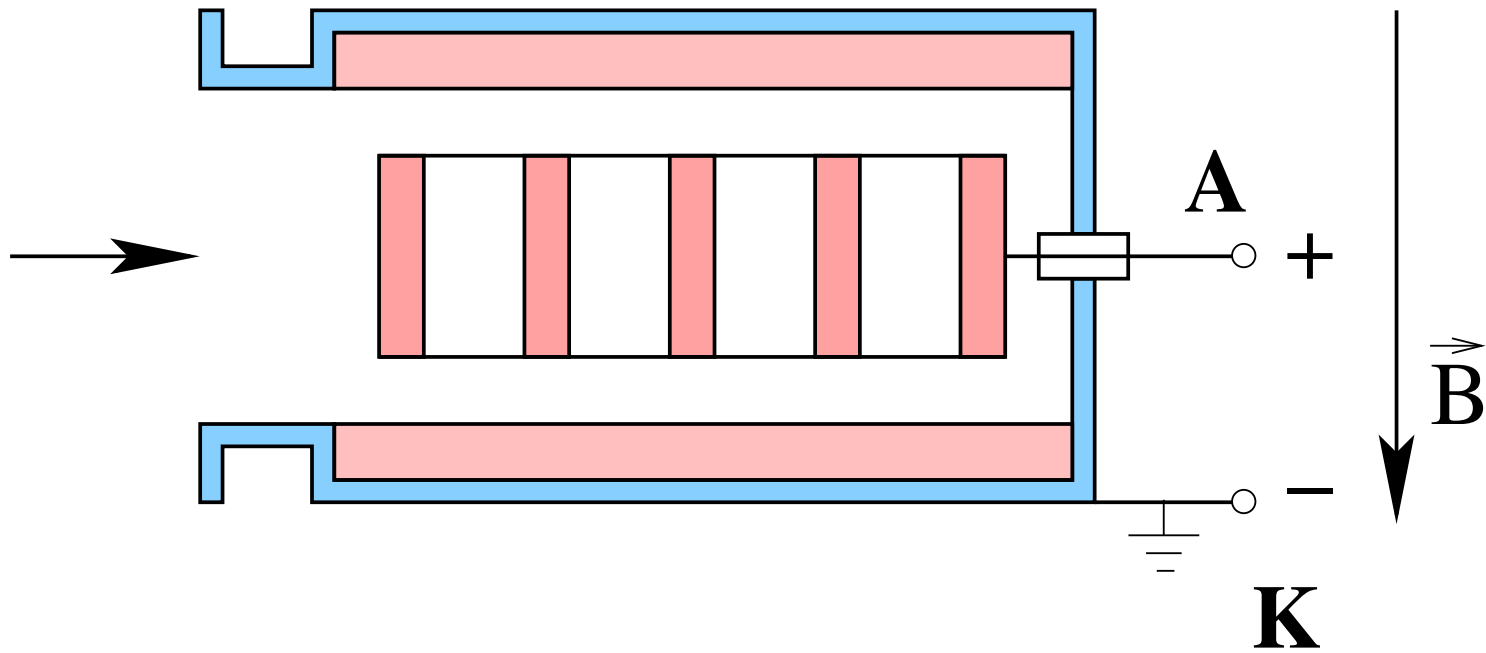


Sublimační vývěva

## Sublimační vývěva

- dominantní proces je chemisorpce
- dobře čerpá  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$
- nečerpá inertní plyny např.  $Ne$ ,  $Ar$ , ...
- opakované vytváření čistého povrchu kovu, pracuje od  $\sim 10^{-4} Pa$
- získávání vysokého a extrémně vysokého vakua
- zvětšení účinnosti snížením teploty pohlcujícího povrchu

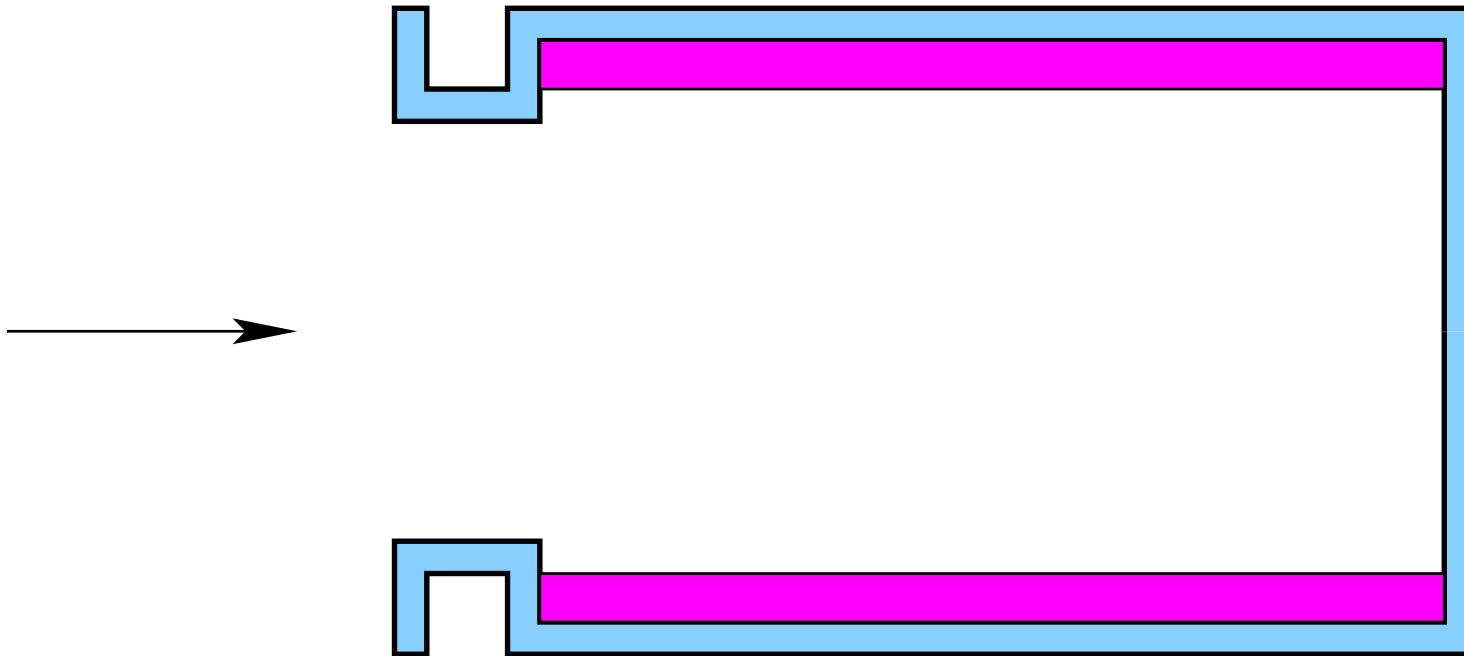
Prodleva při rozprašování titanu (90s puls)					
tlak [Pa]	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
prodleva	5min	15min	30min	1h	8h



Iontová vývěva

## Iontová vývěva

- procesy chemisorpce, difúze do objemu, ionizace a následná implantace iontů, trapping částic
- dobře čerpá  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$
- čerpá i inertní plyny např.  $Ne$ ,  $Ar$ , ...
- čistý povrch kovu, rozprašování Ti katody, doutnavý výboj v magnetickém poli , pracuje od  $\sim 10^{-4} Pa$
- získávání vysokého a extrémně vysokého vakua
- různé konstrukční provedení
  - se studenou katodou
  - se žhavenou katodou



Getrová vývěva

## Getrová vývěva

- dominantní proces je chemisorpce a difúze do objemu
- dobře čerpá  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$
- nečerpá inertní plyny např.  $Ne$ ,  $Ar$ , ...
- čistý povrch kovu, aktivace vyšší teplotou, pracuje od  $\sim 10^{-4} Pa$
- získávání vysokého a extrémně vysokého vakua
- složení kovu
  - jedna složka - Ti, Zr
  - dvě složky - ZrFe,..., aktivace 700 – 900 °C
  - tři složky - ZrVFe( $\sim 450$  °C), TiZrV( $\sim 200$  °C)