F4160

Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček

email: ps94@sci.muni.cz

Osnova:

- Úvod a historický vývoj
- Volné plyny
  - statický stav plynů
  - dynamický stav plynů
- Získávání vakua - vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru
  - vývěvy s periodicky se měnícím prostorem
  - vyvěvy s nepromĕnným pracovním prostorem
  - paroproudové vývěvy
- Měření vakua
  - měření celkových tlaků
  - měření parciálních tlaků
  - hledání netěsností ve vakuových systémech

Navazující přednášky:

- **Vakuová fyzika 2 - F6450**
  - **Vázané plyny**
  - **Sorpční vývěvy**
  - **Měření ve vakuové fyzice**
    - **měření proudu plynu**
    - **měrění tenze par**
  - **Konstrukční prvky vakuových zařízení**
- **Experimentální metody a speciální praktikum A 1 - F7541**

Literatura

- **J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981**
- **L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968**
- **V. Sítko: Vakuová technika, SNTL, Praha 1966**
- **Jaroslav Král: Cvičení z vakuové techniky, ČVUT Praha 1996**
- **V. Dubravcová: Vákuová a ultravákuová technika, Alfa, Bratislava 1992**
- **A. Roth: Vacuum technology, Elsevier, 1990**
- **W.Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, Slovenská akadémia vied, Bratislava 1960**
- **Zpravodaje CVS**
- **Firemní katalogy**
- **internet, www - stránky výrobců vakuové techniky, ...**

Úvod

- **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**
- $1\,bar\ =\ 10^5\,Pa$
- $1\,mbar\ =\ 100\,Pa$
- $1\,torr\ =\ 133,322\,Pa$
- $1\,atm\ =\ 101325\,Pa = 760\,torr$ **(fyzikální atmosféra)**

Historický vývoj

- **1643 - E.Torricelli, první vakuum**
- **1654 - O. von Guericke, magdeburské polokoule**
- **1855 - Geissler, výboje v plynech, rtuťová vývěva**
- **1874 - H.G.Mac-Leod, kompresní manometr**
- **1892 - Fleussova pístová vývěva, průmyslova výroba žárovek**
- **1906 - Pirani, tepelný manometr**
- **1912 - W. Gaede, molekulární vývěva**

- **1913 - W. Gaede, difúzní vývěva**
- **1916 - Buckley, ionizační manometr**
- **1925 - Fyzika nízkých tlaků, jako samostatný obor**
- **1936 - Penning, výbojový manometr s magnetickým polem**
- **1954 - Alpert - omegatron**
- **1958 - Becker, turbomolekulární vývěva**

Využití vakua

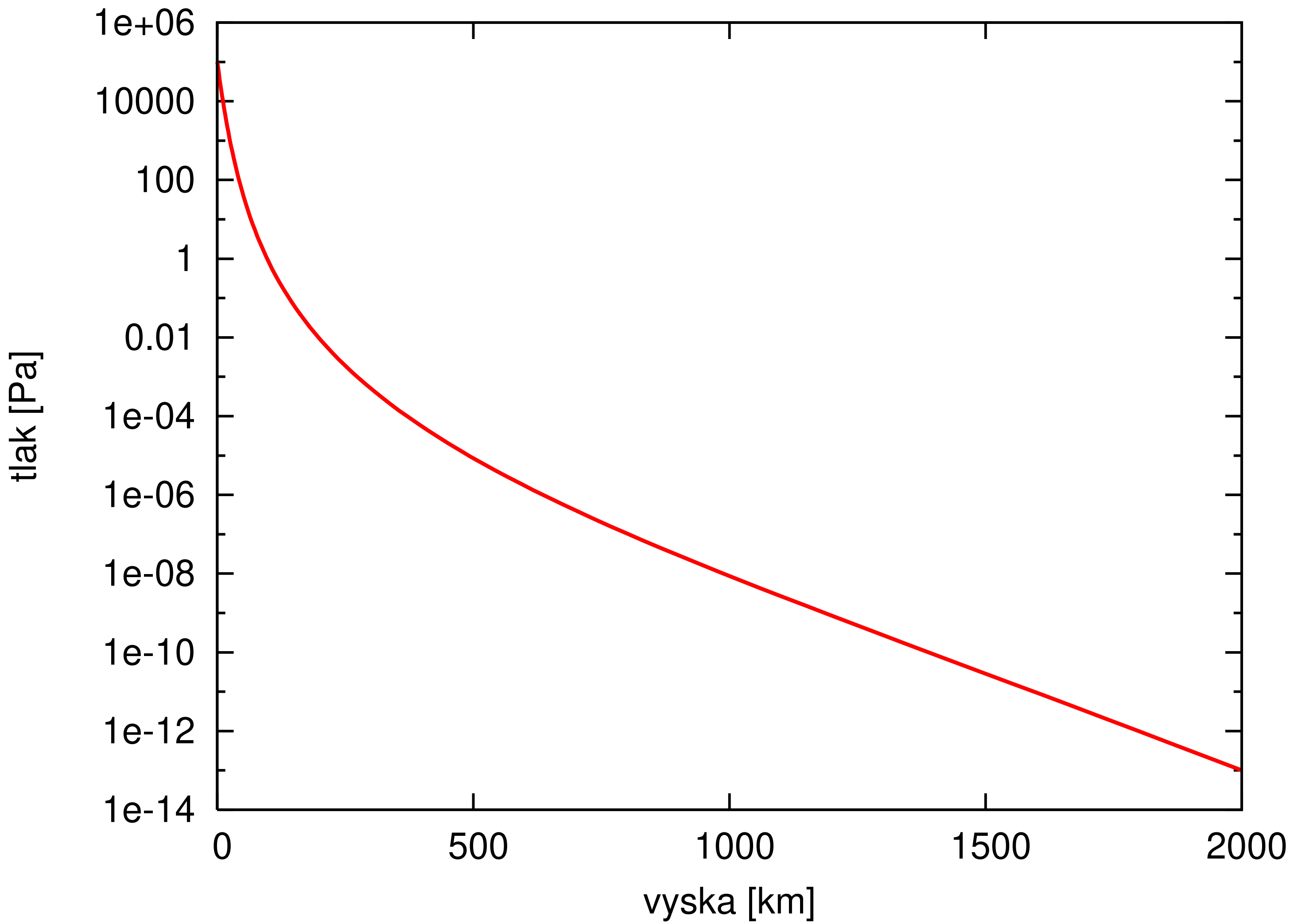
- **Věda a výzkum**
  - **diagnostické metody**
    - **elektronový mikroskop**
    - **hmotový spektrometr**
    - **optický vakuový spektrometr**
  - **plazmochemické reaktory**
  - **urychlovače částic - CERN, LHC délka $27km$**
  - **termojaderné reaktory - ITER, objem $834\,m^3$**

- **Průmyslové aplikace**
  - **vytváření tenkých vrstev**
  - **výroba elektronických součástek**
  - **osvětlovací technika - žárovky, zářivky**
  - **chemický průmysl - čisté látky**
  - **metalurgie**
- **přesně definované podmínky procesu, izolace studovaného procesu od okolí, velká střední volná dráha**

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}
500	10^{-8}	10^{-6}
1000	10^{-10}	10^{-8}
2000	10^{-15}	10^{-13}

Závislost tlaku na nadmořské výšce



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	$< 10^{-7}$	$< 10^{-5}$

Rozdělení vakua

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

Teoretické základy vakuové fyziky

Plyny

- **Plyny volné**
  - **plyny v statickém stavu, konstantní teplota a tlak v celém objemu**
  - **plyny v dynamickém stavu, různé teploty a tlak**
- **Plyny vázané**
  - **plyny vázané na povrchu, nebo v objemu pevné látky**

Volné plyny v statickém stavu

Ideální plyn, předpoklady:

- **molekuly a atomy plynu jsou velmi malé ve srovnání se vzdáleností mezi nimi**
- **molekuly a atomy plynu na sebe nepůsobí přitažlivými silami**
- **molekuly a atomy plynu jsou v neustálem náhodném pohybu**
- **molekuly a atomy plynu se neustále srážejí mezi sebou navzájem a se stěnami nádoby**
- **tyto srážky jsou dokonale pružné**

Základní pojmy a zákony

- **tlak plynu: nárazy molekul a atomů plynu na rovinnou stěnu o povrchu S se projevují, jako tlaková síla F na stěnu $p = \frac{F}{S}$**
- **molekulová (atomová) hmotnost M : poměr hmotnosti molekuly dané látky a $\frac{1}{12}$ hmotnosti atomu uhlíku $^{12}_{6}C$**
- **Avogadrův zákon: Stejné objemy různých plynů obsahují při témže tlaku a teplotě stejný počet molekul.**
- **Mol je počet gramů stejnorodé látky číselně rovný molekulové hmotnosti**
- **1 mol různých plynů má při stejném tlaku a teplotě vždy týž objem, za tzv. normálních podmínek $V_m = 22415 cm^3 mol^{-1}$.**
- **normální podmínky : $tlak\ \ p = 101324\ Pa; teplota\ \ T = 273\ K$**

- **Avogadrovo číslo určuje počet molekul v jednom molu** $N_A = 6,023.10^{23} mol^{-1}$**, tento počet je pro všechny látky stejný.**

- **Loschmidtovo číslo je podíl Avogadrova čísla a objemu molu** $N_L = \frac{N_A}{V_m} = 2,69.10^{19}$ **(za normálních podmínek), udává počet molekul v objemu** $1\ cm^3$**.**

- **Daltonův zákon parciálních tlaků** $p = \sum_{i=1}^{j} p_i$

Stavová rovnice plynu

stavová rovnice pro ideální plyn, látkové množství n kilomolů

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

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

$R = 8310\ [Jkmol^{-1}K^{-1}], k = 1.38.10^{-23}[JK^{-1}]$,

$N_A = 6,023.10^{26}[kmol^{-1}]$

$$\frac{pV}{T} = nR = \frac{m}{M}R$$

Maxwellův rozdělovací zákon

$$f_v(v, T, m_0) = \frac{1}{N}\frac{dN}{dv}$$

pravděpodobnost, že dN molekul má rychlost v intervalu $< v, v + dv >$

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

pravděpodobnost, že molekula má při dané teplotě

rychlost v intervalu $< 0, \infty >$

$$\int_0^\infty f_v(v)dv = 1$$

nejpravděpodobnější rychlost

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

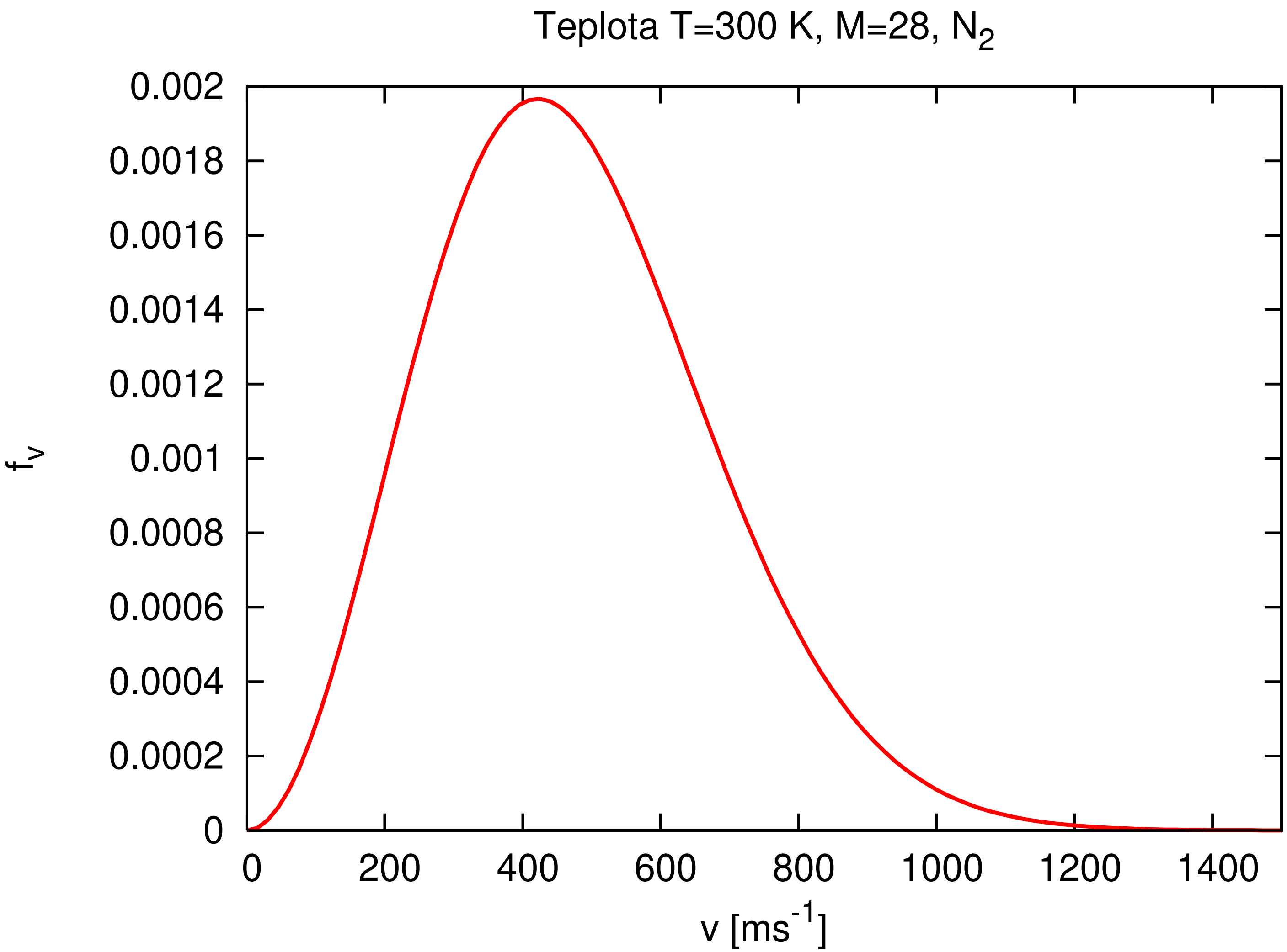
střední kvadratická rychlost

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

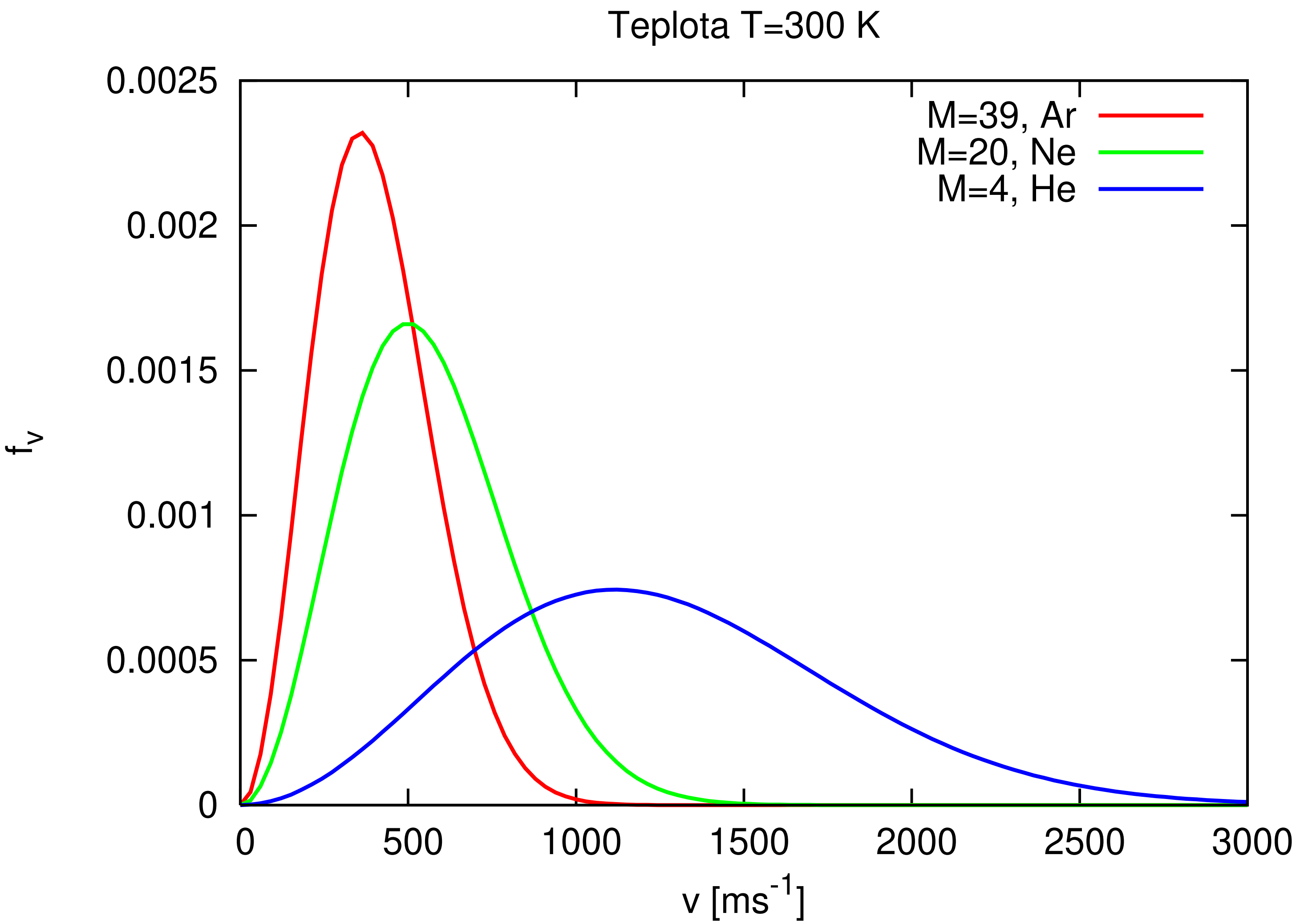
střední aritmetická rychlost

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

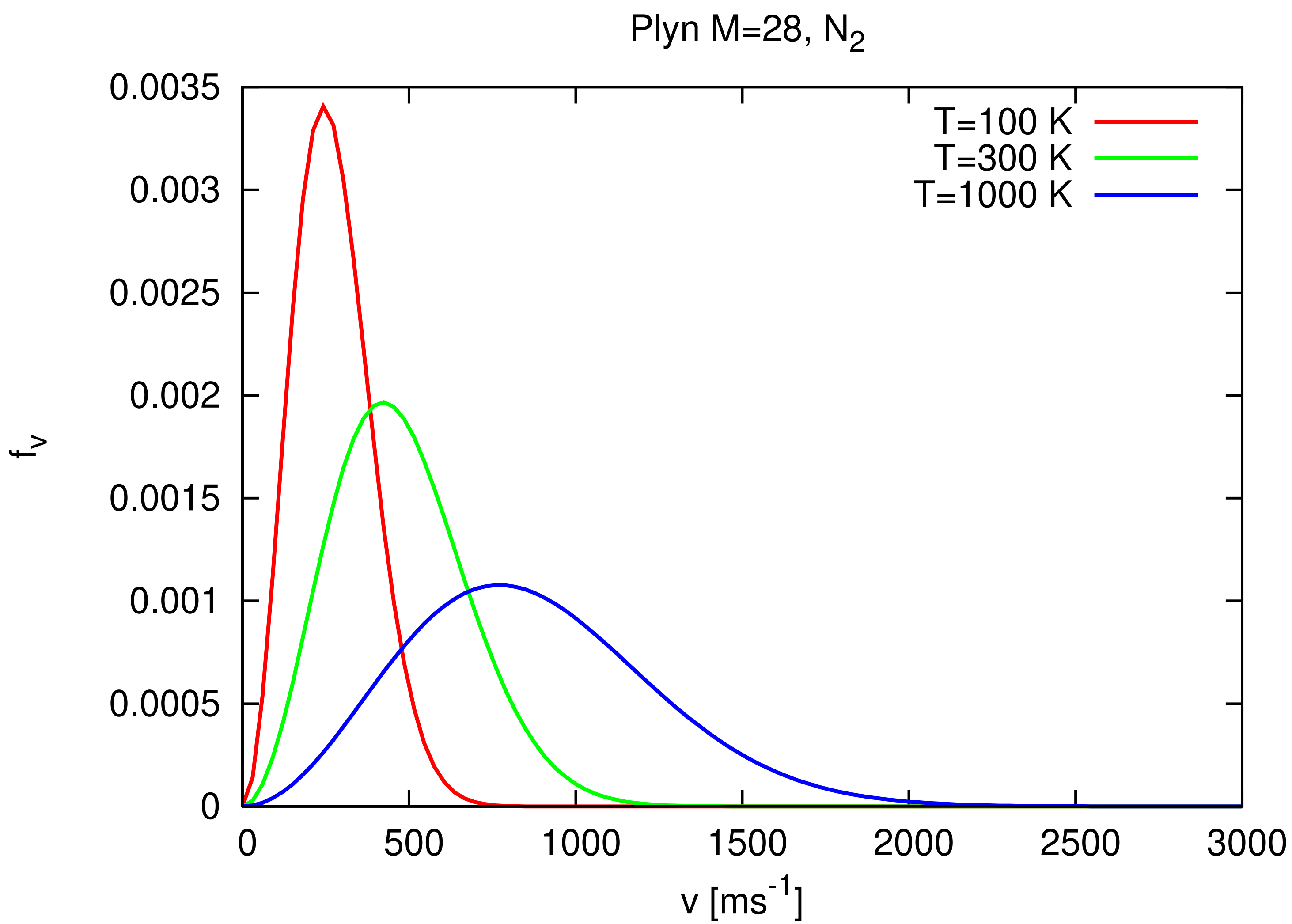
Maxwellův rozdělovací zákon



Maxwellův rozdělovací zákon - různé plyny



Maxwellův rozdělovací zákon - různé teploty



Střední volná dráha

je průměrná vzdálenost mezi dvěma po sobě následujícími srážkami molekul(atomů) plynu.

střední volná dráha molekul

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

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

zpřesnění

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2}\,\frac{1}{1+\frac{T_\lambda}{T}}$$

T_λ **je Sutherlandova konstanta pro daný plyn**

Střední volná dráha - Sutherlandova konstanta

Plyn	Ne	Ar	He	N_2	O_2	CO_2	H_2O
T_λ[K]	55	145	80	110	125	254	650