

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**
 - **vývěvy s neproměnným 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
 - * měření 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**
- **$1 \textit{ bar} = 10^5 \textit{ Pa}$**
- **$1 \textit{ mbar} = 100 \textit{ Pa}$**
- **$1 \textit{ torr} = 133,322 \textit{ Pa}$**
- **$1 \textit{ atm} = 101325 \textit{ Pa} = 760 \textit{ torr}$ (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 27 km**

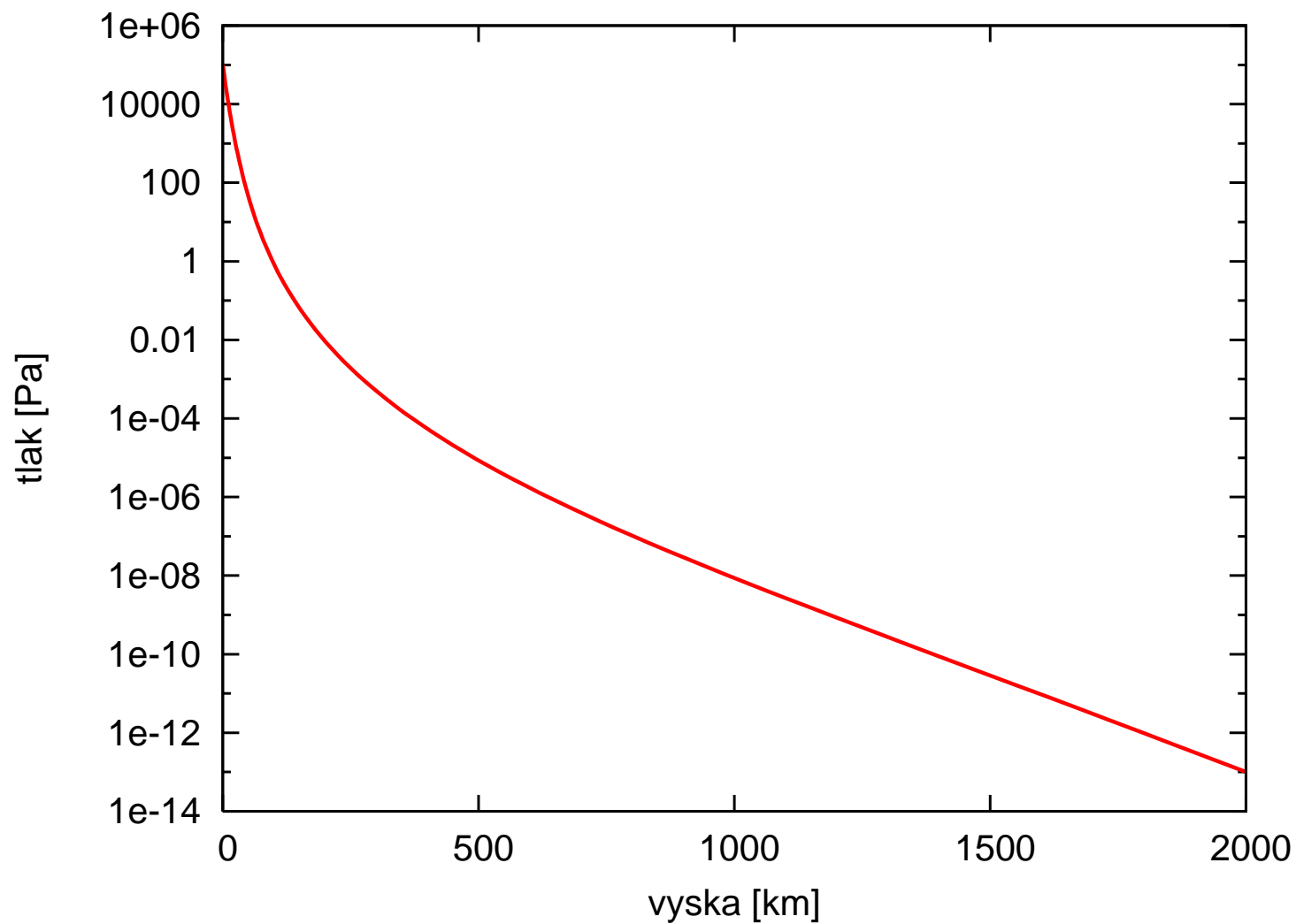
- **termojaderné reaktory - ITER, objem 834 m^3**

- **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 λ [cm]	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
monovrstva τ [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 ${}^{12}_6C$
- 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 $V_m = 22415 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$.
- normální podmínky : tlak $p = 101324 \text{ Pa}$; teplota $T = 273 \text{ K}$

- Avogadrovo číslo určuje počet molekul v jednom molu

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, tento počet je pro všechny látky stejný.

- Loschmidtovo číslo je podíl Avogadrova čísla a objemu molu

$N_L = \frac{N_A}{V_m} = 2,69 \cdot 10^{19}$ (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, $R = kN_A$

$$R = 8310 [Jkmol^{-1}K^{-1}], k = 1.38 \cdot 10^{-23} [JK^{-1}],$$

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{26} [kmol^{-1}]$$

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

Maxwellův rozdělovací zákon

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

pravděpodobnost, že dN molekul má rychlost v intervalu $\langle v, v + dv \rangle$

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

pravděpodobnost, že molekula má při dané teplotě rychlost v intervalu $\langle 0, \infty \rangle$

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

nejpravděpodobnější rychlost

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

střední kvadratická rychlost

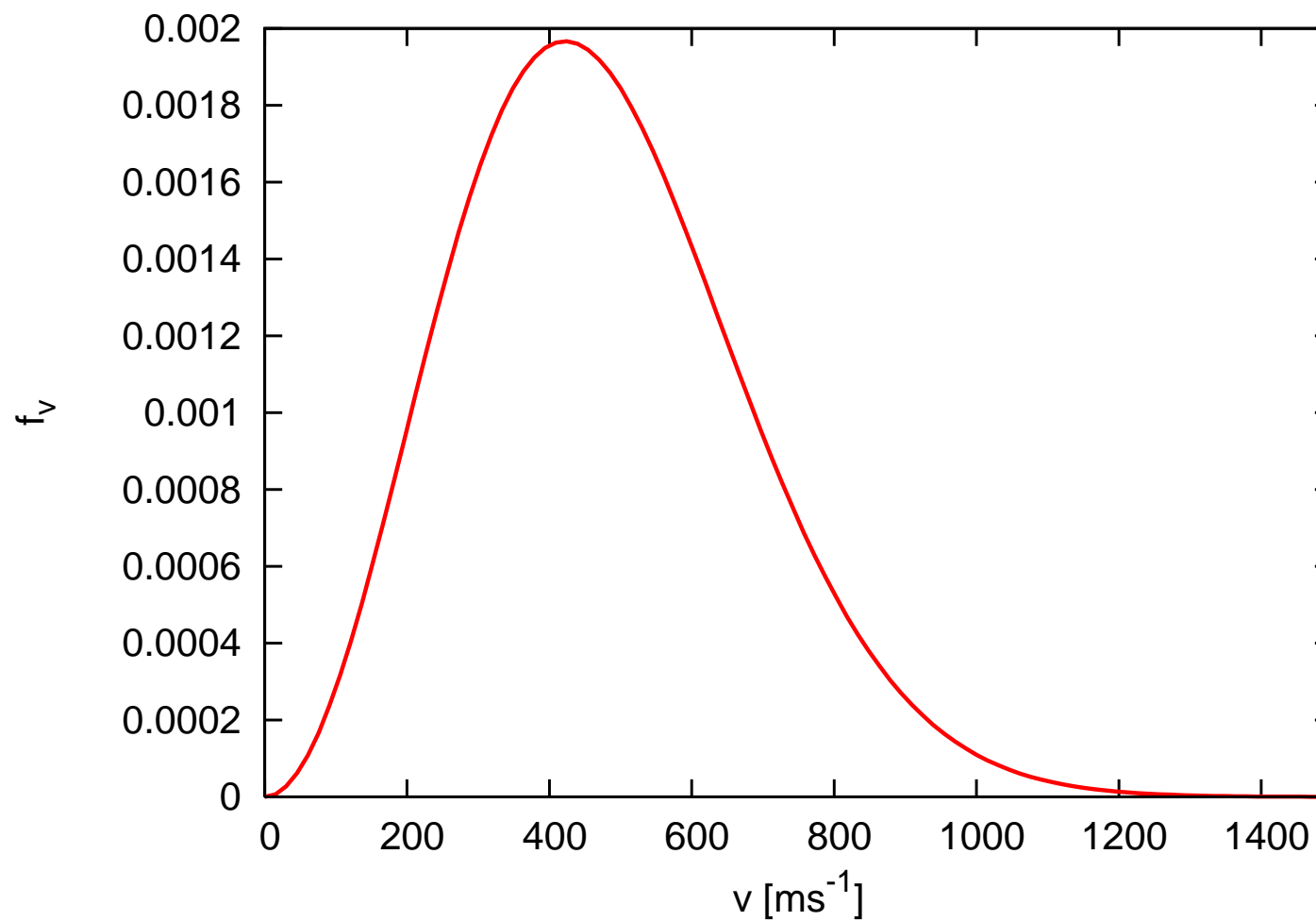
$$v_e = \sqrt{\frac{3}{2}} v_p = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

střední aritmetická rychlost

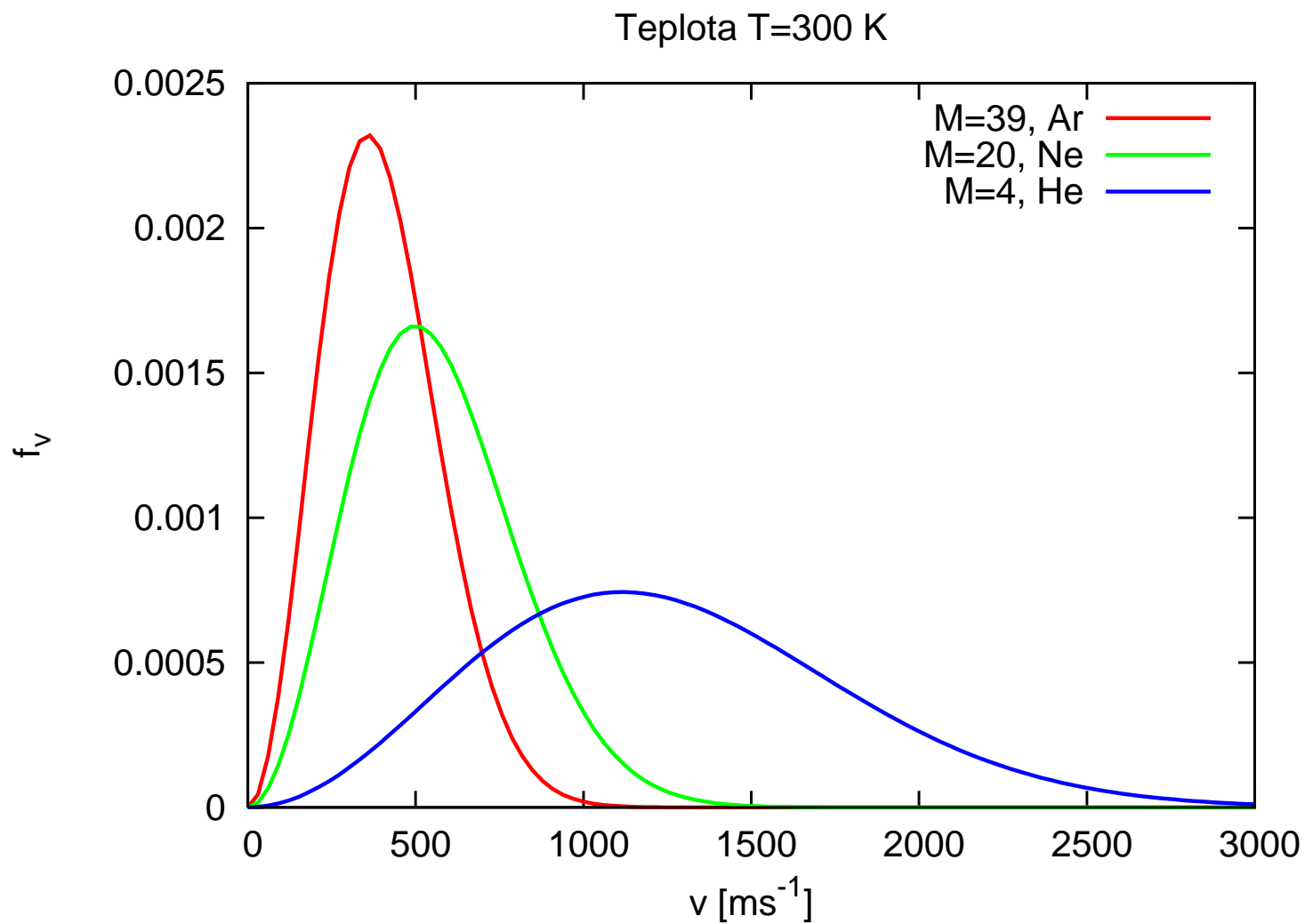
$$v_a = \sqrt{\frac{4}{\pi}} v_p = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

Maxwellův rozdělovací zákon

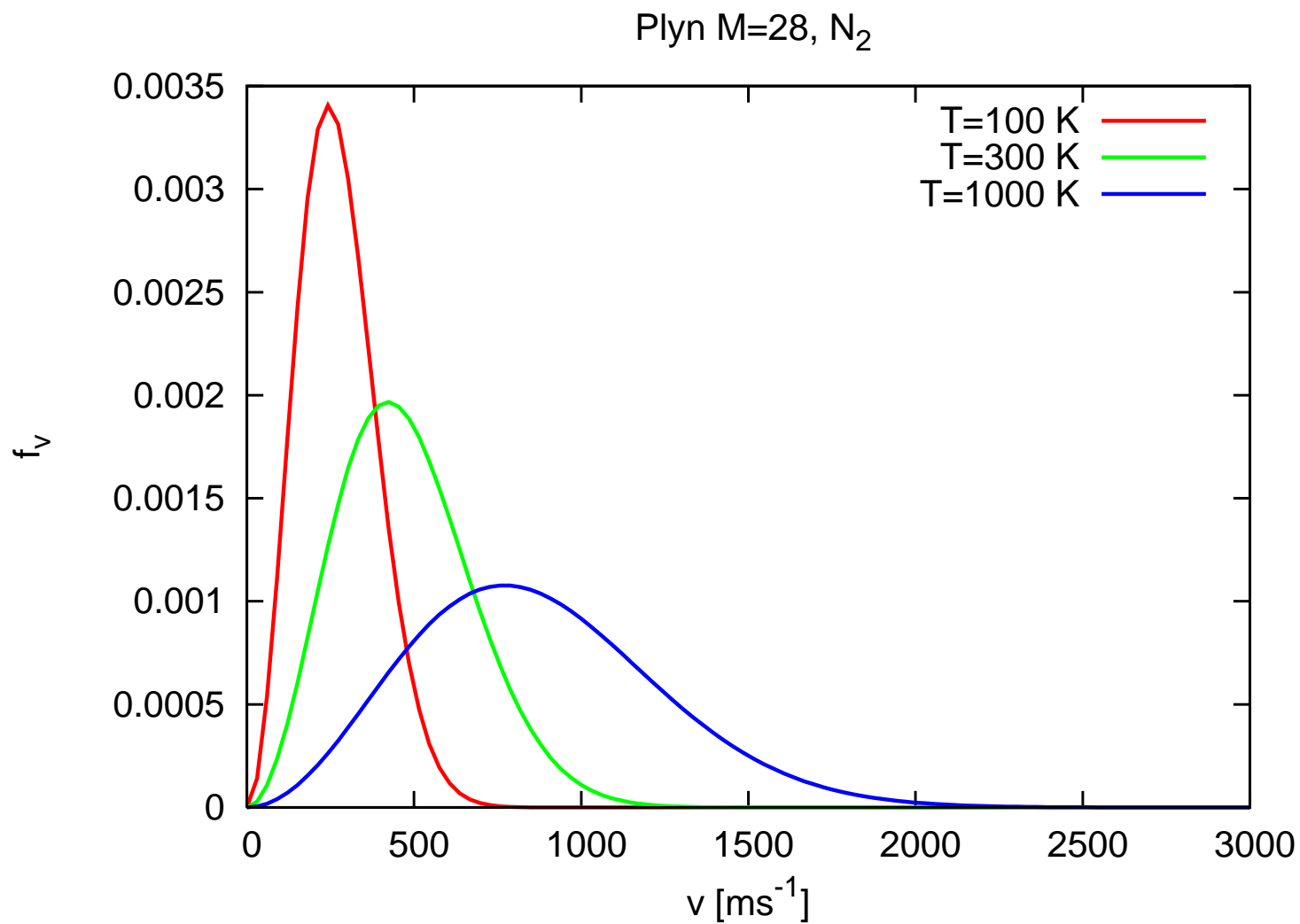
Teplota $T=300\text{ K}$, $M=28$, N_2



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	<i>Ne</i>	<i>Ar</i>	<i>He</i>	<i>N₂</i>	<i>O₂</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂O</i>
T_λ[K]	55	145	80	110	125	254	650