

F6450

Vakuová fyzika 2

Pavel Slaviček

email: ps94@physics.muni.cz

Osnova

- Vázané plyny
- Sorpční vývěvy
 - kryogenní
 - zeolitové
 - sublimační
 - iontové
 - getrové - vypařované, nevypařované (NEG)
- Měření ve vakuové fyzice
 - měření proudu plynu
 - měření tenze par plynu
- Konstrukční prvky vakuových zařízení - vhodné materiály, spoje (pevné, rozebíratelné), el.přechodky, přenos pohybu do vakua, ventily, ...
- Povlakování

Literatura

- B.Suurmeijer, T. Mulder, J. Verhoeven: Vacuum Science and Technology, 2016
- J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981
- L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968
- V. Sítko: Vakuová technika, SNTL, Praha 1966
- J. 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
- W. H. Kohl: Handbook of materials and techniques for vacuum devices, AIP Press, 1995

- T.A.Delchar: Vacuum Physics and Techniques, Chapman-Hall, 1993
- F.OHanlon: A Users Gaude to Vacuum Technology, Wiley (2003)
- J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982
- Zpravodaje CVS
- Firemní katalogy

Literatura - internet

- www.vakspol.cz
- www.svc.org
- www.fzu.cz
- www.shm-cz.cz
- lhc.web.cern.ch/lhc/
- en.wikipedia.org/wiki/main_page
- [www - stránky výrobců vakuové techniky](#)
- ...

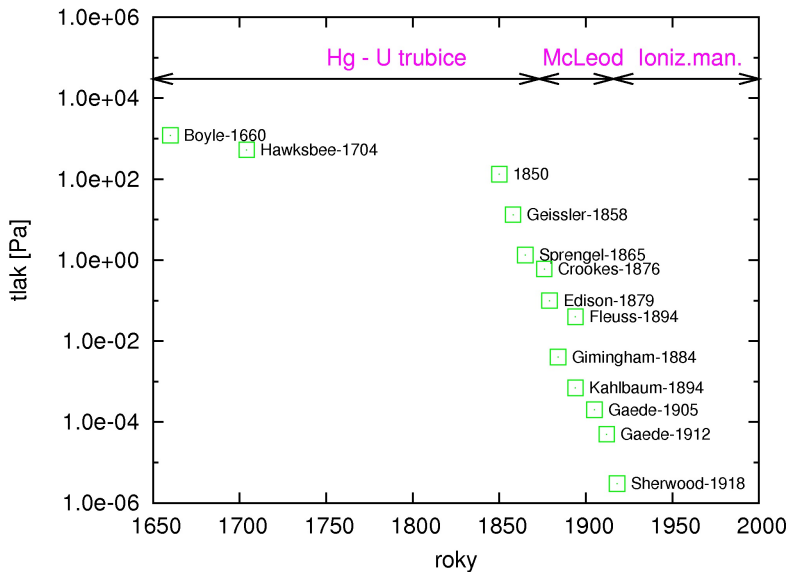
Rozdělení vakua

vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké (GV), hrubé, technické	$10^3 - 10^0$	$10^5 - 10^2$
střední (FV)	$10^0 - 10^{-3}$	$10^2 - 10^{-1}$
vysoké (HV)	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-1} - 10^{-5}$
velmi vysoké (UHV)	$10^{-7} - 10^{-10}$	$10^{-5} - 10^{-8}$
extrémně vysoké (XHV)	$< 10^{-10}$	$< 10^{-8}$

Rozdělení vakua

vakuum	střední (FV)	vysoké (HV)	(UHV) a (XHV)
tlak [Pa]	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
koncentrace [cm^{-3}]	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
střední dráha λ [cm]	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
monovrstva τ [s]	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
typ proudění	Knudsenovo	molekulární	molekulární

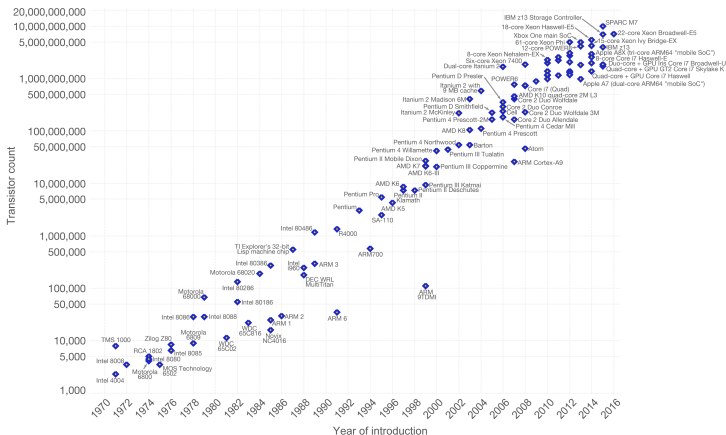
Proč UHV a XHV vakuum?



Aplikace v mikroelektronice

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971–2016)

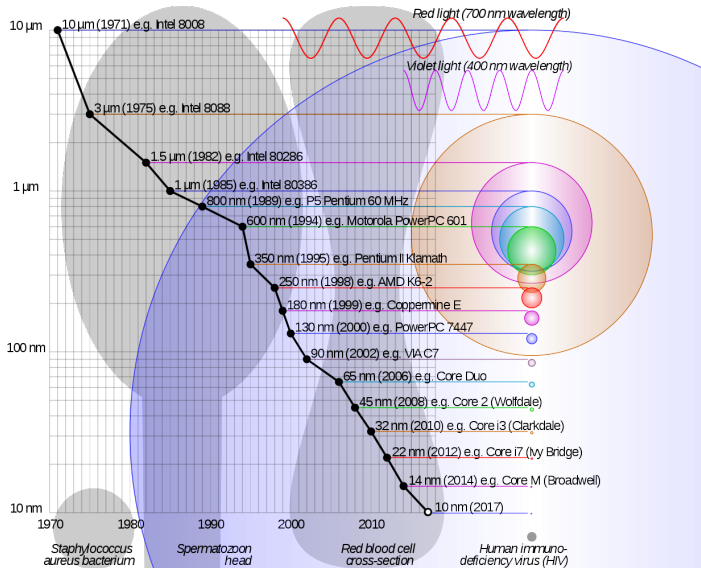
Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are strongly linked to Moore's law.



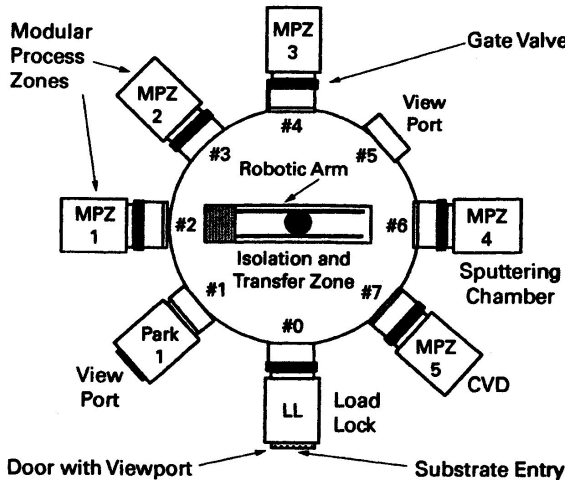
Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at [OurWorldInData.org](https://www.ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

<http://en.wikipedia.org/wiki/>



<http://en.wikipedia.org/wiki/>

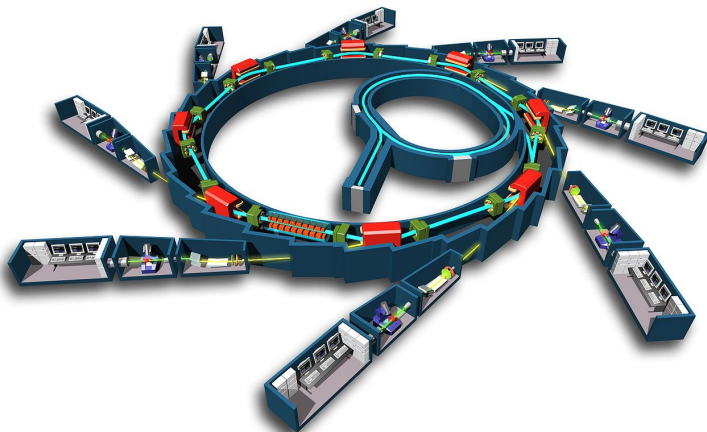


F.OHanlon: A Users Guide to Vacuum Technology, Wiley (2003)

Urychlovače částic

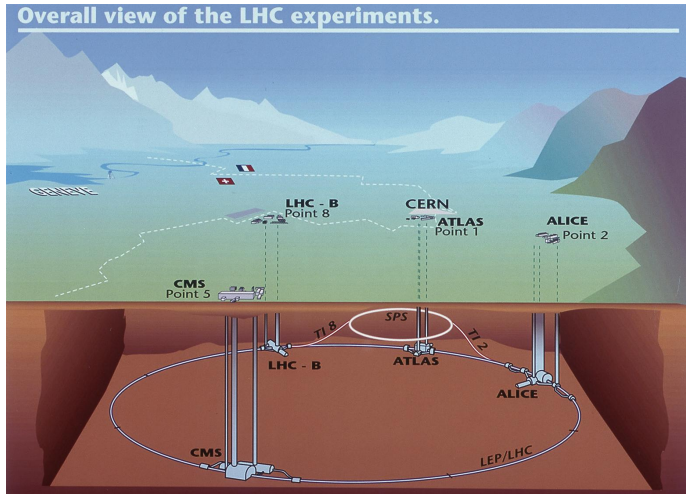
- velká střední volná dráha
- LHC, synchrotrony, ...
- základní výzkum - částicová fyzika, materiály, biologie, medicína
- farmaceutický průmysl
- léčení rakoviny
- v roce 2015 bylo v provozu asi 17 000 urychlovačů

Synchrotron



<http://en.wikipedia.org/>

Urychlovač LHC



50 – 150 m pod zemí, délka 27 km

home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider

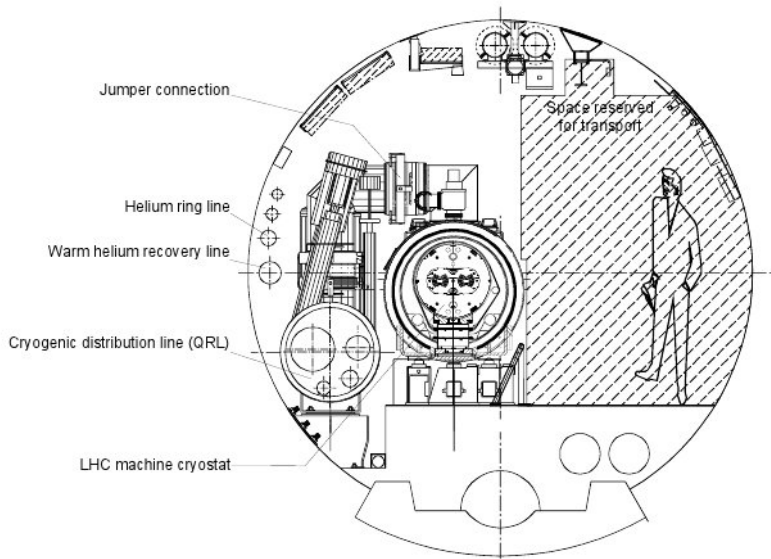


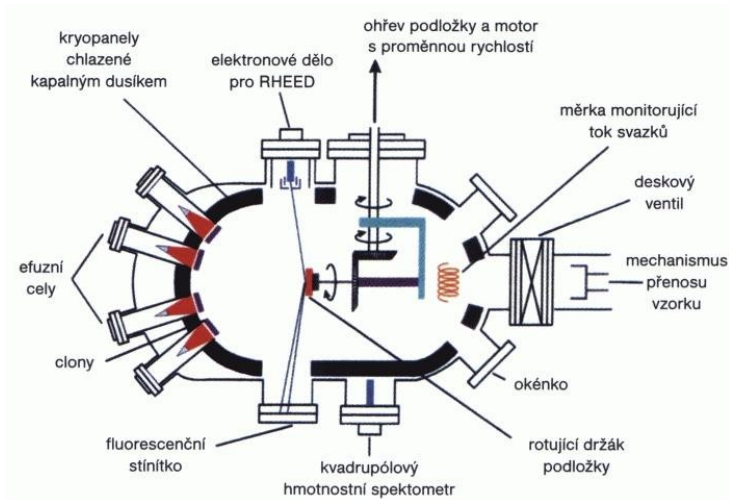
Figure 11.1: Transverse cross-section of the LHC tunnel

Elektronové mikroskopy

- katoda termoemisní $< 10^{-2}$ Pa
- katoda autoemisní studená emise $< 10^{-8}$ Pa
- Schottkyho katoda $< 10^{-6}$ Pa
- prodloužení životnosti, vyšší stabilita, užší svazek elektronů
- výhody autoemise - nižší rozptyl energií elektronů \implies menší stopa, větší rozlišení



Molecular Beam Epitaxy



<http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/index.html>

Experiment na orbitální dráze

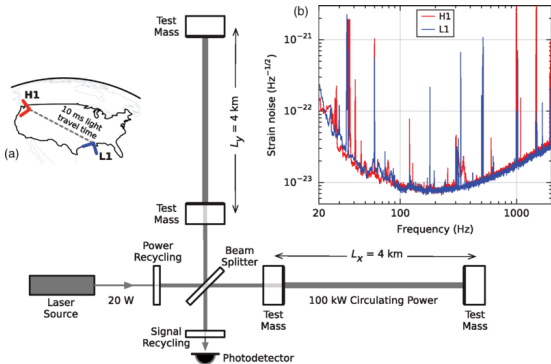
- tlak na oběžné dráze raketoplánu (500 km) 10^{-6} Pa
- za štítem o průměru 3,6 m , 10^{-12} Pa
- 1994 - WSF1 - porucha orientace, STS60
- 1995 - WSF2 - porucha MBE, STS69
- 1996 - WSF3 - úspěch 7 vrstev GaAs/AlGaAs, STS80



http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/sts/sts-60/index.htm

LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

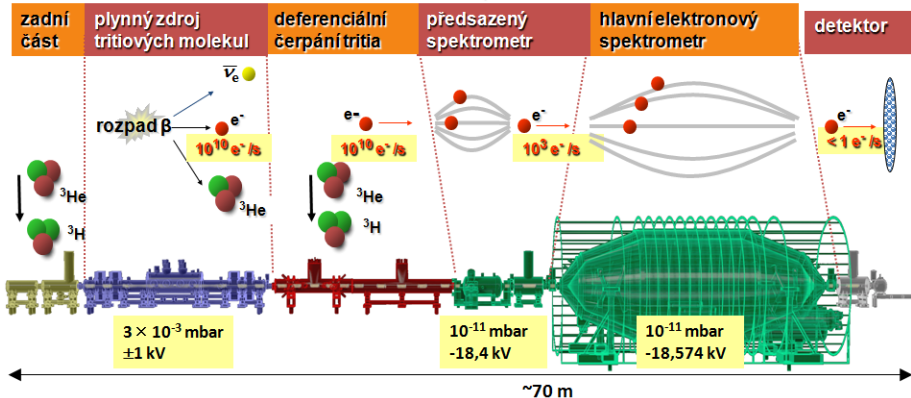
objem asi $10\,000\text{ m}^3$, tlak $\sim 10^{-7}\text{ Pa}$



Wikipedia

Experiment - KATRIN

parametry zdroje stabilní sloupcová hustota tritia transport částic β a odčerpání tritia zadržení nízkoenergetických částic β přesná energetická analýza částic β polohově citlivý detektor částic β



www.osel.cz

Experiment - KATRIN



www.symmetrymagazine.org

Vázané plyny

Plyny, které jsou na povrchu, nebo uvnitř pevné látky, nebo jsou uzavřeny v pórech a dutinách. Plyny se mohou v látkách rozpouštět a difundovat a tak pronikat z vnějšího prostředí stěnami do vakuového systému.

Sorpce:

- adsorpci - na povrchu
- absorpci - difuze do objemu

Příklad:

Vliv adsorbovaných plynů na vakuum.

Reaktor ve tvaru krychle o straně 10 cm je pokryt na vnitřních stěnách mono-molekulární vrstvou plynu. Je v něm plyn o tlaku 1×10^{-4} Pa a teplotě 300 K. Nějakým způsobem uvolníme všechny vázaný plyn ze stěn. Předpokládejme, že teplota plynu zůstane stejná. Jaký je výsledný tlak v reaktoru?

Řešení:

Počet molekul v objemu při tlaku $P = 1 \times 10^{-4}$ Pa:

$$N = nV = \frac{P}{kT}V = 2,4 \times 10^{13}$$

Počet molekul na stěnách:

$$N_1 = 6 \times S \times N_p$$

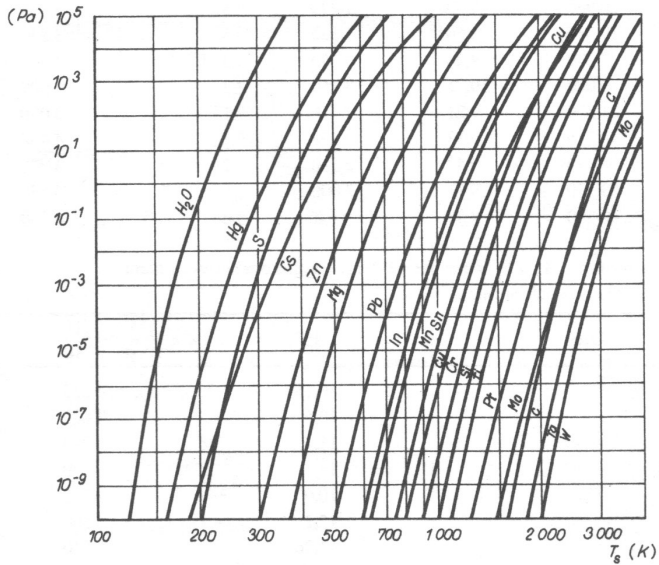
$$N_1 = 6 \times 100 \times 0,5 \times 10^{15} = 3 \times 10^{17}$$

tlak uvolněných molekul:

$$P_1 = n_1 kT = \frac{N_1}{V} kT = 1,24 \text{ Pa}$$

Požadavky na materiály používané ve vakuové technice:

- co možná nejmenší uvolňování plynů a par, nízká tenze par při pracovní teplotě
- malá schopnost pohlcovat a propouštět plyny
- dobré tepelné vlastnosti (4 – 700 K)
- dobré mechanické vlastnosti (pnutí, způsob opracování)
- vhodné elektrické a chemické vlastnosti (podle dané aplikace)



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Desorpce plynů ze stěn

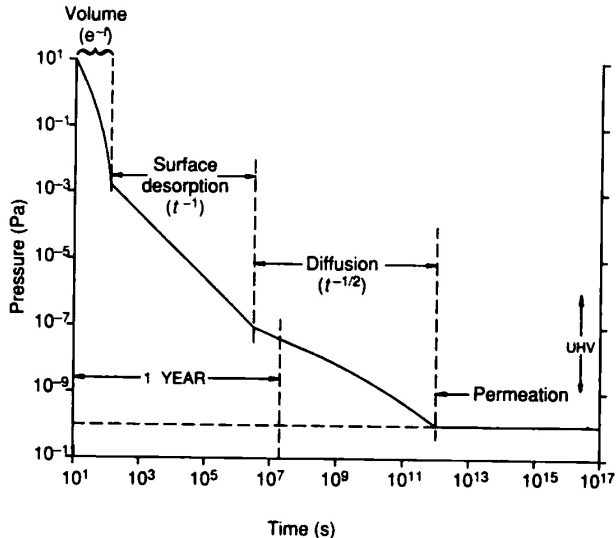
Důležitá je teplotní a vakuová historie vakuové aparatury.

Desorpční proud plynů ze stěny pro kovy a skla a pro $t > t_0$

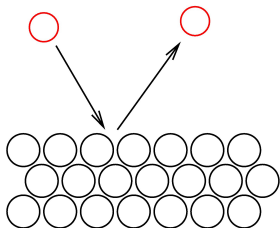
$$Q_{des} = q_{des} A \frac{t_0}{t}$$

mater.	oprac.	$q_{des} [\frac{\text{hPal}}{\text{scm}^2}] (1 \text{ h})$	$q_{des} [\frac{\text{hPal}}{\text{scm}^2}] (4 \text{ h})$	$q_{des} [\frac{\text{hPal}}{\text{scm}^2}] (10 \text{ h})$
nerez	leštěná	2×10^{-8}	4×10^{-9}	2×10^{-10}
nerez	pískovaná	3×10^{-10}	$6,5 \times 10^{-11}$	4×10^{-11}
dural		6×10^{-8}	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
sklo		$4,5 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-10}$
viton		$1,2 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-7}$
viton	zahřátí 4 h	$1,2 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-10}$

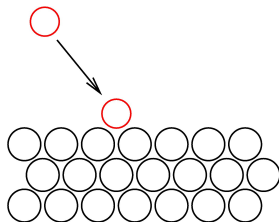
Typická křivka čerpání vakuové komory



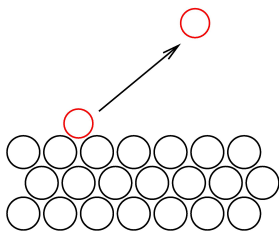
Základní procesy probíhající mezi plynem a povrchem pevné látky



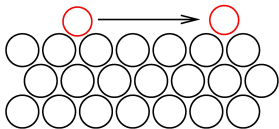
odraz molekuly



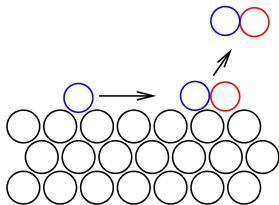
adsorpce



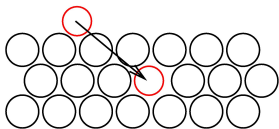
desorpce



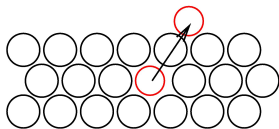
difuze po povrchu



chemická reakce na povrchu



difuze do objemu



difuze z objemu na povrch

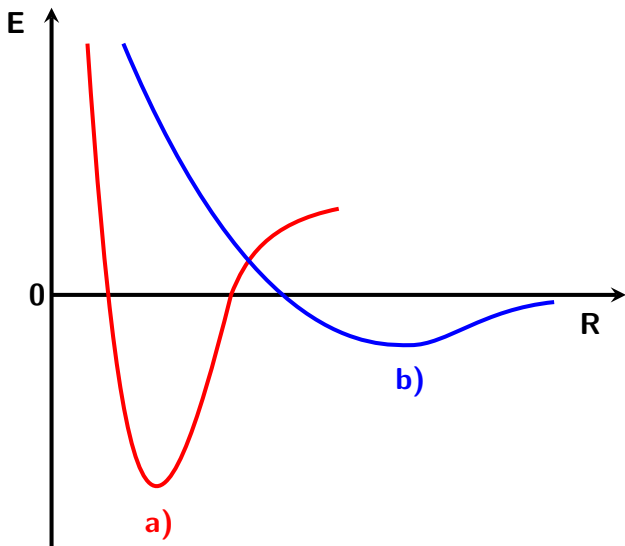
Plyny adsorbované na povrchu

- fyzisorpce - slabá vazba, Van der Waalsova vazba, dlouhý dosah
 $R_0 > 3 \times 10^{-10} \text{ m}$,

$$E = \frac{A}{R^9} - \frac{B}{R^3}$$

- chemisorpce - silné chemické vazby, krátký dosah,
 $1 \times 10^{-10} \text{ m} < R_0 < 3 \times 10^{-10} \text{ m}$

$$E = D_0(1 - \exp[-a(R - R_0)])^2$$



Koeficient ulpění

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

$$\nu_{1ef} = \gamma \nu_1 \Rightarrow \gamma = \frac{\nu_{1ef}}{\nu_1}$$

- $\gamma = 1$, adsorpce každé molekuly, která dopadne na povrch
- $\gamma = 0$, všechny molekuly se odrazí

Stupeň pokrytí

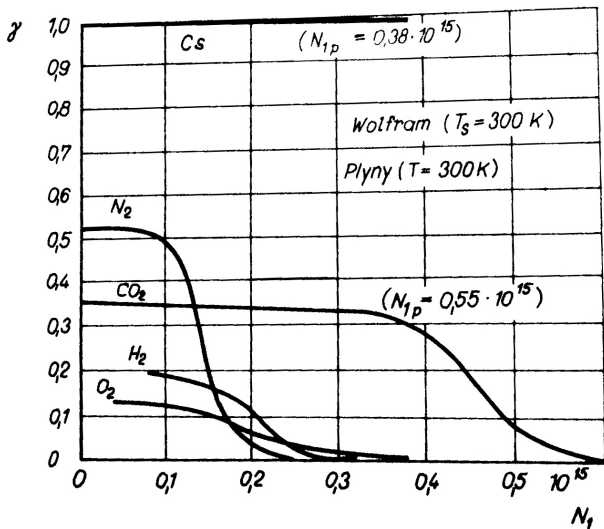
$$\vartheta = \frac{N_1}{N_{1p}}$$

N_1 - počet adsorbovaných atomů, N_{1p} - počet volných míst v mono-molekulární vrstvě, pro méně přesné výpočty se bere

$$N_{1p} = 0,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

- $\vartheta = 0$, čistý povrch
- $\vartheta = 1$, zcela pokrytý povrch

Koeficient ulpění



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Odhad na základě rozměrů molekul

plyn	He	Ne	H ₂	O ₂	Ar
$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	2,42	1,72	1,52	0,87	0,85

plyn	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄
$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	0,81	0,81	0,53	0,53	0,52

CO na wolframu

T_s [K]	300	500	700	900	1100
$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	0,56	0,44	0,42	0,33	0,19
γ	0,45	0,40	0,35	0,33	0,3

wolfram, 300 K

plyn	γ	$N_{1p}[10^{15} \text{ cm}^{-2}]$	ϑ
N_2	0,3-0,55	0,2-0,55	0,3-0,5
CO	0,2-0,6	0,5-0,65	0,3-0,6
O_2	0,2-0,3	0,87	0,7
H_2	0,2-0,3	0,4-0,7	0,4-0,5
Cs	1	0,38	1