

F4160

# Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček

email: ps94@physics.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
- Praktikum z vakuové fyziky - **F7541**
- Fyzika nízkých teplot - **F8450**

# Literatura

- 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
- J.F.O'Hanlon: A User's Guide to Vacuum Technology, Wiley, 2003
- W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, Slovenská akadémia vied, Bratislava 1960
- A.Tálský, J.Janča: Speciální praktikum z vysokofrekvenční elektroniky a fyziky plazmatu, skripta, Brno 1975
- J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

- Delchar: Vacuum Physics and Techniques, Chapman Hall, 1993
- L.Patý: Základní pojmy fyziky plynů, SPNP, Praha 1970
- P.Lukáč: Zbierka príkladov z vakuovej fyziky, UKB, Bratislava 1988
- P.Lukač, V.Martišovitš: Netěsnosti vakuových systémov, Alfa, Bratislava 1981
- P.Slavíček a kol.: Vakuová fyzika 1, Munipress 2016
- 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<sup>-2</sup>] - jednotka v soustavě SI**
  - 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa
  - 1 mbar = 100 Pa
  - 1 torr = 133,322 Pa
  - mmHg = 133,322 Pa
  - 1 atm = 101325 Pa = 760 torr (fyzikální atmosféra)
  - 1 at = 98066,5 Pa = 0,96784 atm (technická atmosféra)
  - 1 psi = 6890 Pa
  - 1 psf = 47,8 Pa

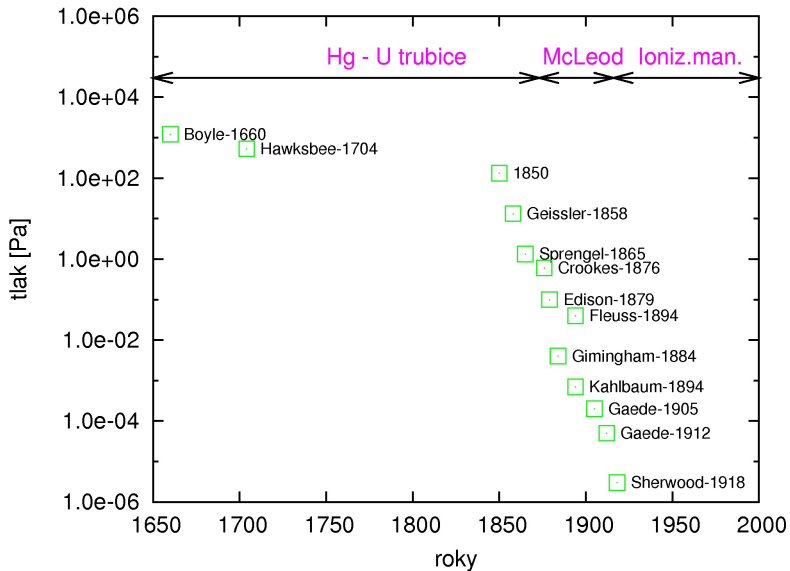
# Historický vývoj

- 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 - Fleusova pístová vývěva, průmyslová výroba žárovek
- 1892 - Dewarova nádoba
- 1906 - M. Pirani, Piraniho tepelný manometr
- 1912 - W. Gaede, molekulární vývěva
- 1913 - W. Gaede, difúzní vývěva
- 1916 - Buckley, ionizační manometr
- 1925 - Fyzika nízkých tlaků, jako samostatný obor
- 1926 - olejová difúzní vývěva

<http://www.svc.org/HistoryofVacuumCoating/History-of-Vacuum-Coating.cfm>

- 1929 - kapacitní manometr
- 1933 - neopren
- 1936 - Penning, výbojový manometr s magnetickým polem
- 1950 - Bayard-Alpert - ionizační manometr se žhavenou katodou
- 1958 - Becker, turbomolekulární vývěva
- 1967 - komerční kvadrupólový spektrometr
- 1973 - Scroll vývěva
- 1982 - viskózní manometr s rotující kuličkou

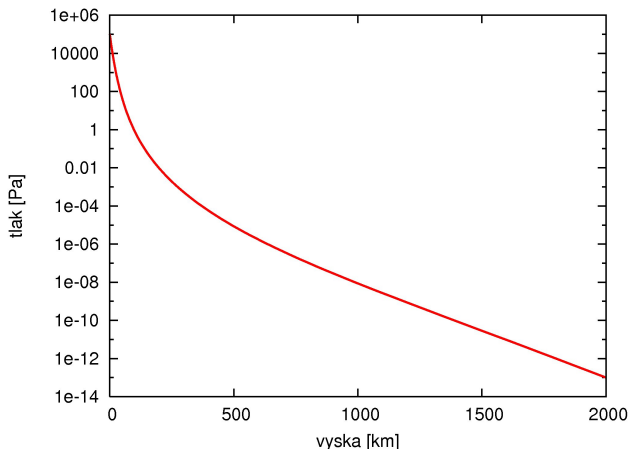




# Závislost tlaku na nadmořské výšce

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



Tlak na Měsíci  $1 \text{ nPa} = 10^{-9} \text{ Pa}$

Tlak v mezihvězdném prostoru  $100 \text{ } \mu\text{Pa} - 3 \text{ fPa}, 10^{-4} \text{ Pa} - 3 \times 10^{-15} \text{ Pa}$

# Rozdělení vakua

vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké, 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	nízké	střední (FV)	vysoké (HV)	UHV, XHV
tlak [Pa]	$10^5 - 10^2$	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
n [cm <sup>-3</sup> ]	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
$\lambda$ [cm]	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
$\tau$ [s]	$< 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
proudění	viskózní	Knudsenovo	molekulární	molekulární

# Využití vakua

Vědecké aplikace

Průmyslové aplikace

# Využití vakua - vědecké aplikace

- astronomie - dalekohledy
- diagnostické metody - elektronový mikroskop, hmotnostní spektrometr, optický vakuový spektrometr, XPS, ...
- fyzika plazmatu - výboje v plynech, ...
- chemie - filtrace, vakuová destilace, čisté materiály, ...
- metrologie - etalony pro kalibrace
- tenké vrstvy - napařování, naprašování
- plazmochemické reaktory
- fyzika nízkých teplot
- urychlovače částic - synchrotrony, LHC, ...
- termojaderné reaktory - ITER, ...
- základní výzkum - simulátory kosmického prostoru, pádová věž, LIGO, Casimirův jev, ...

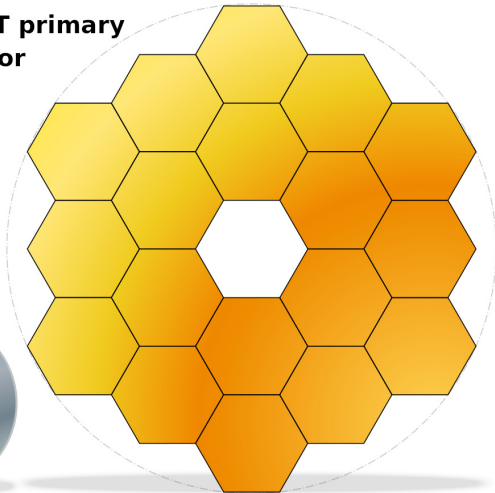
# Hubble Space Telescope

- výroba 1977–1979
- broušení 1979–1981
- průměr 2,4 m, celková hmotnost 11 t
- přesnost broušení 30 nm
- odrazné vrstvy - Al 76,2 nm, fluorid hořčíku - 25,4 nm
- vypuštění - 24.4.1990, let STS 31

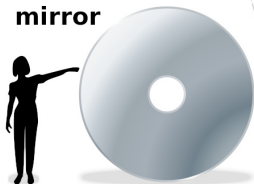




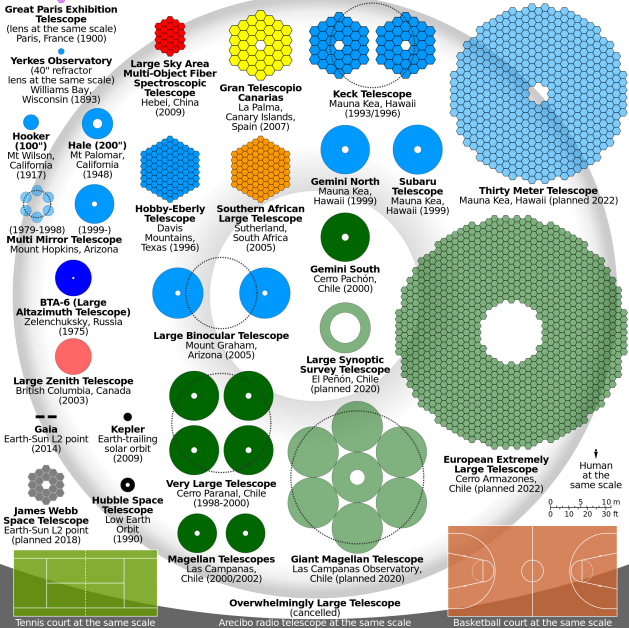
**JWST primary mirror**



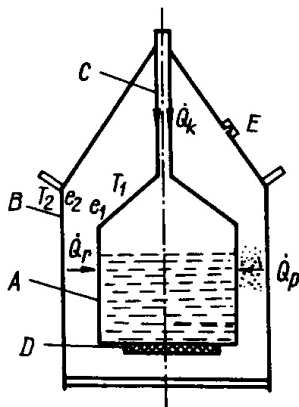
**Hubble primary mirror**



Wikipedie



# Tepelná izolace - Dewarova nádoba

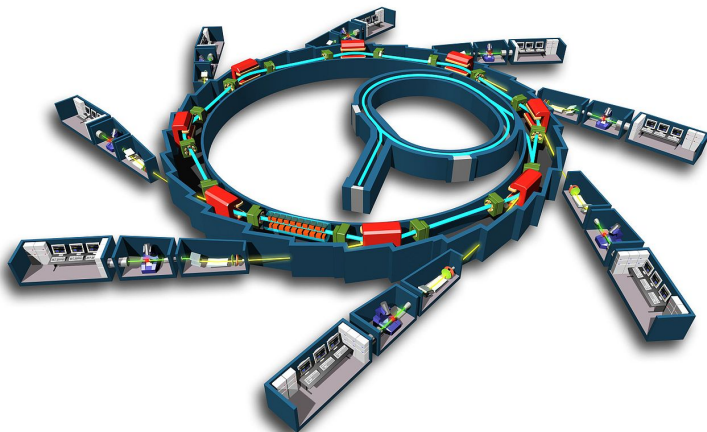


Obr. 67. Jednoduchá  
Dewarova nádoba pro  
přechovávání LN<sub>2</sub>

# Urychlovače částic

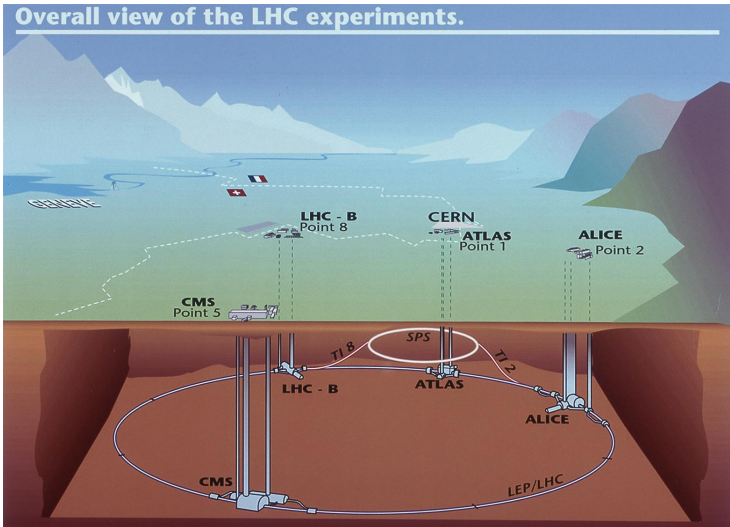
- velká střední volná dráha
- LHC, synchrotrony, ...
- základní výzkum - částicová fyzika, materiály, biologie, medicína
- farmaceutický průmysl
- léčení rakoviny
- 2015 - 17000 urychlovačů

# Synchrotron



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

# LHC



<http://lhc.web.cern.ch/lhc/>

# 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

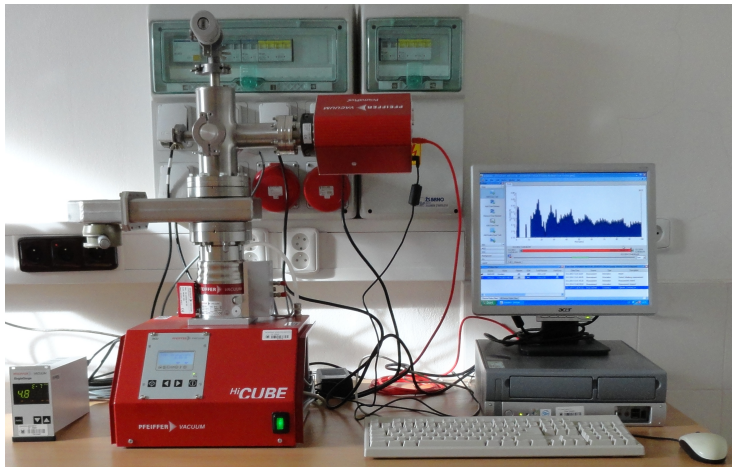


# Napařovačka



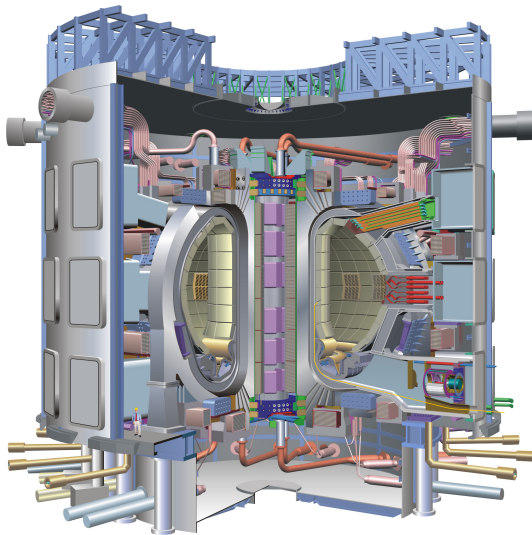


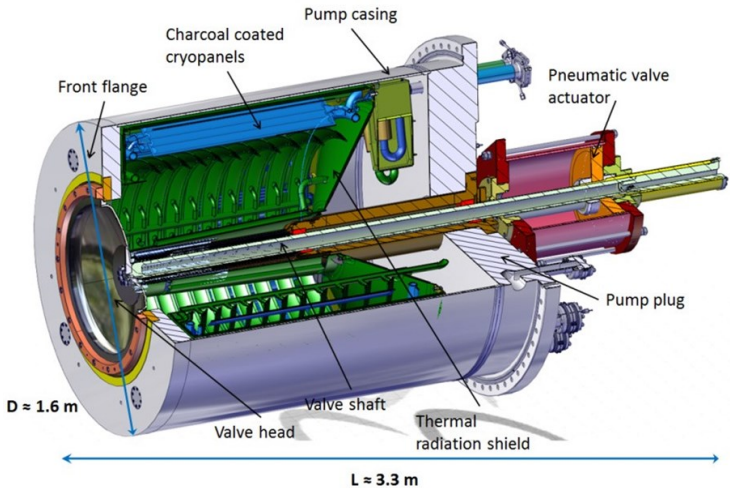
# Hmotnostní spektrometr



# ITER

plazma: 840 m<sup>3</sup>, vakuov komora: 1400 m<sup>3</sup>, celkem vakuov: 8500 m<sup>3</sup>



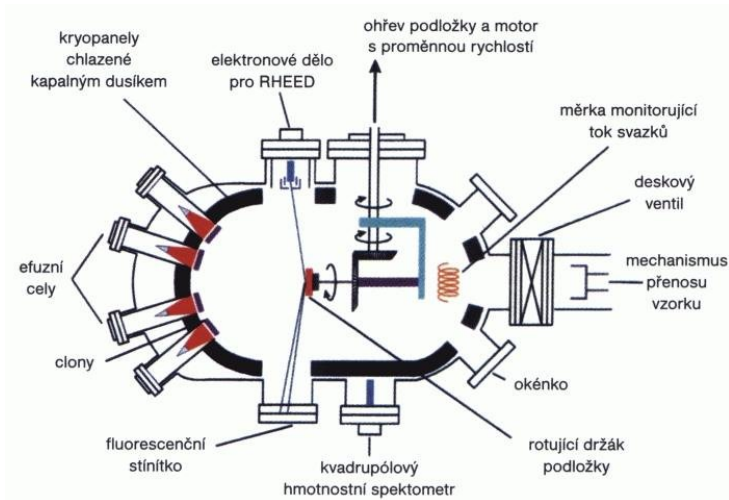


[www.iter.org](http://www.iter.org)

# ITER

- potřebný tlak  $\sim 10^{-6}$  Pa,
- komora: 840 m<sup>3</sup> plazma, objem 1400 m<sup>3</sup> ,  
kryostat, celkem  $\sim 8500$  m<sup>3</sup>
- na komoře 6 kryo-vývěv (4,5 K), 4 čerpají,  
2 regenerace - 10 min., 100 K
- na kryostatu a pom. zařízeních dalších 6 vývěv
- sorbent: 20 let výzkum - aktivní uhlí, kokosové ořechy,  
Indonésie (2002)
- největší celokovový ventil
- první plazma 2025 ?, původní plán 2016

# Molecular Beam Epitaxy



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

## Experiment na orbitální dráze

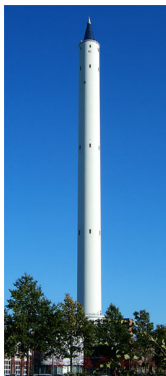
- tlak na oběžné dráze raketoplánu ( 500 km)  $10^{-6}$  Pa
- za štítem o průměru 3,6 m ,  $10^{-12}$  Pa
- 1994 - WSF1 - porucha orientace, STS60
- 1995 - WSF2 - porucha MBE, STS69
- 1996 - WSF3 - úspěch 7 vrstev GaAs/AlGaAs, STS80



[http://mek.kosmo.cz/pil\\_lety/usa/sts/sts-60/index.htm](http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/sts/sts-60/index.htm)

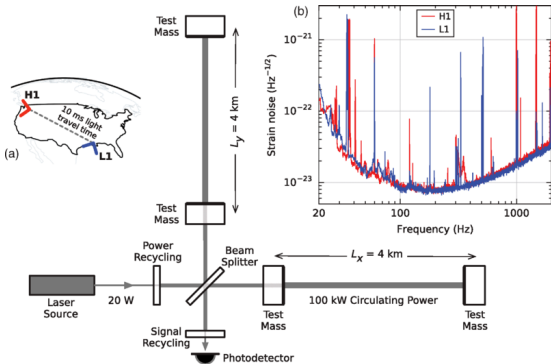
# Pádová věž

- ZARM - Brémy
- výška 146 m, průměr 3,5 m, celkem objem 1700 m<sup>3</sup>
- 18 vývěv, čerpací rychlost 32 000 m<sup>3</sup>/h, tlak 10 Pa
- doba pádu asi 5 s



# LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

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

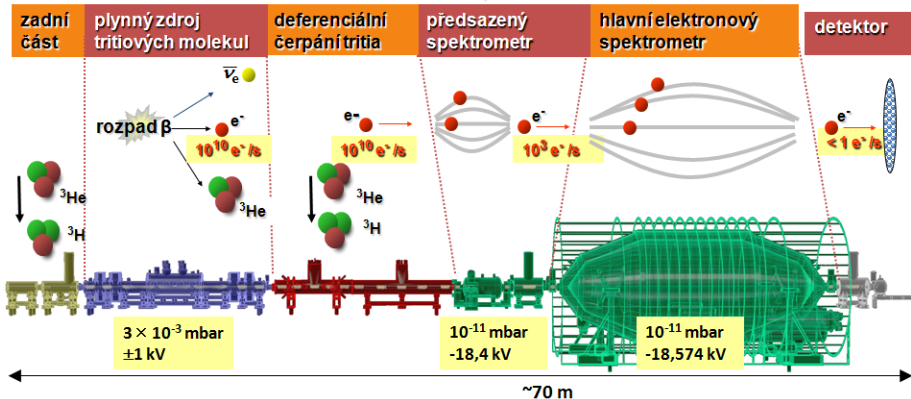


Wikipedia



# Experiment - KATRIN

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



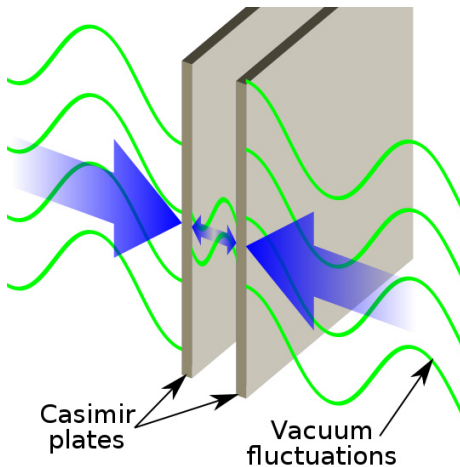
www.osel.cz

# Experiment - KATRIN



[www.symmetrismagazine.org](http://www.symmetrismagazine.org)

# Casimirův jev



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

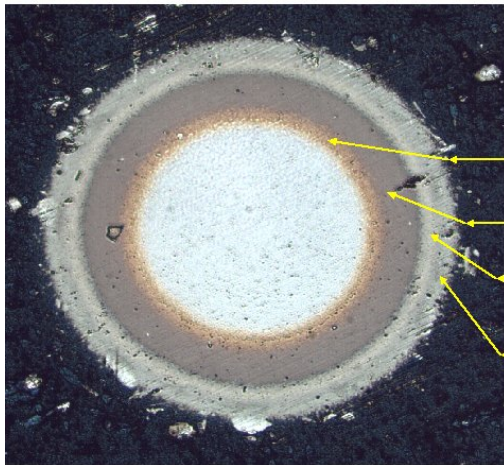
# Využití vakua - průmyslové aplikace

- osvětlovací technika - žárovky, zářivky, úsporné žárovky
- vytváření tenkých vrstev - okna, brýle, zrcadla, ...
- barierové vrstvy na lahve
- elektronika
- chemický průmysl - vakuová destilace ropy,...
- metalurgie - čisté kovy, nitridace,...
- vakuové manipulátory, pinzety,...
- kryogenní technika - tepelná izolace
- vakuové balení potravin
- regenerace transformátorových olejů
- svařování e-svazkem
- lisování plastických hmot
- odlévání plastických hmot

# Tenké vrstvy



<http://www.shm-cz.cz/>



**TiN- adhesive layer**

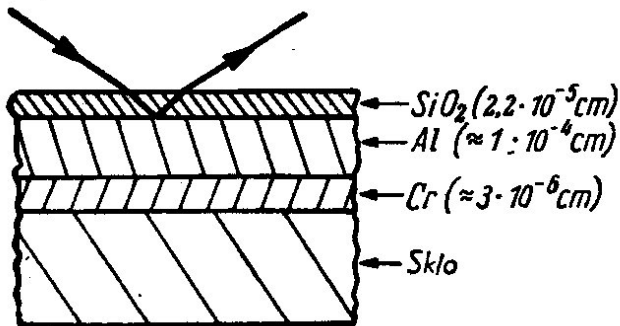
**TiAlN – layer with max.  
hardness**

**TiAlCO I – layer with  
optimal stechiometry**

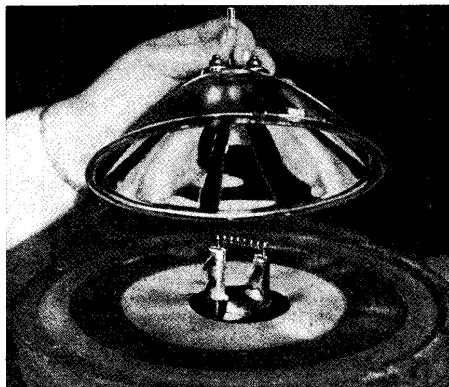
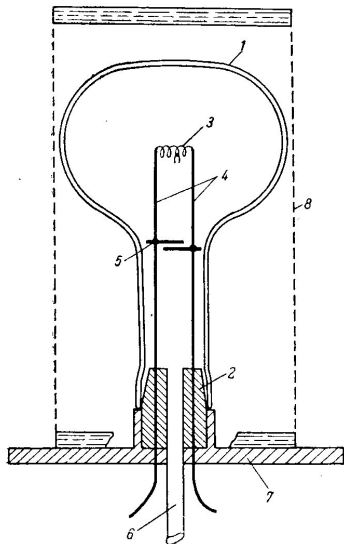
**AlTiCO II – layer with  
low friction coefficient -  
LUBRIK**

<http://www.shm-cz.cz/>

## Zrcadlové plochy



W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960

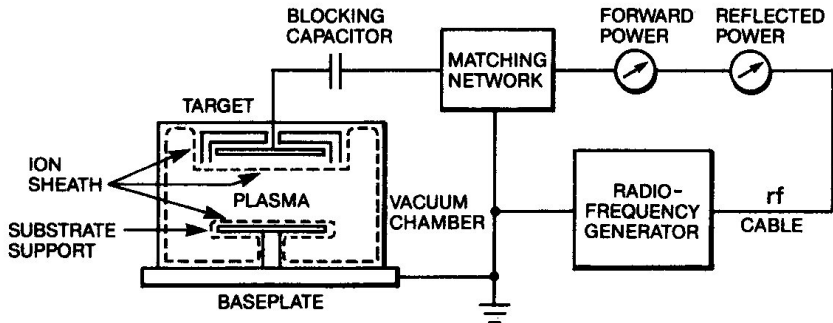


Obr. 10-218. Odber pohliníkového reflektora (pozri obr. 10-216) z napařovacieho zariadenia. Snímka závodu: General Electric Comp. (pozri Rose).

W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960



# PACVD



R.V.Stuart: Vacuum technology Thin Films and Sputtering, Academic Press 1983

# Výroba CD-ROM, DVD, ...



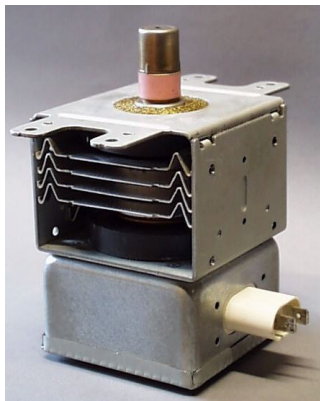
## Multi Layer Metalizer

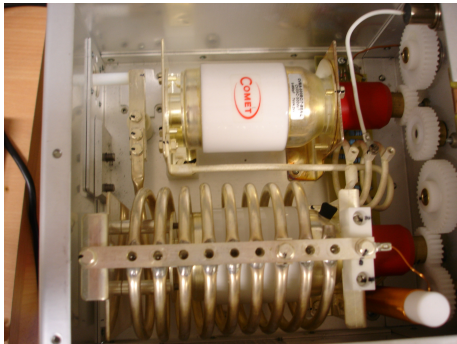
- ▶ DVD-RAM, DVD±RW, DVD Blue-ray, and CD-RW sputtering system
- ▶ 9 sputtering chambers, 9 relaxation chambers, and 1 load-lock
- ▶ Very high layer uniformity
- ▶ Low disk temperature
- ▶ Disk rotates during the deposition for minimum layer's roughness
- ▶ All-in-one plug & play system

# Barierová vrstva při výrobě plastových lahví PET

- transparentní barierová vrstva  $\text{SiO}_x$
- zlepšení vlastností plastů
- zabránit pronikání plynů zejména  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$
- PACVD - mikrovlnné plazma
- kapacita  $\sim 10000$  lahví za hodinu

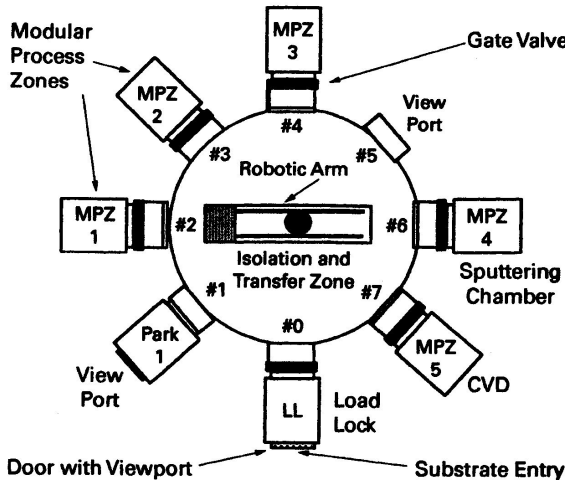
# Elektronika







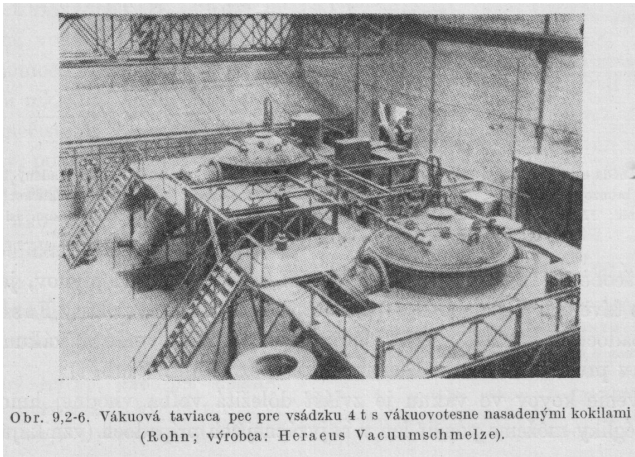




F.OHanlon: A Users Guide to Vacuum Technology, Wiley (2003)



# Metalurgie



Obr. 9,2-6. Vákuová taviaca pec pre vsádzku 4 t s vákuovotesne nasadenými kokilami  
(Rohn; výrobca: Heraeus Vacuumschmelze).

W. Espe: Technológia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960

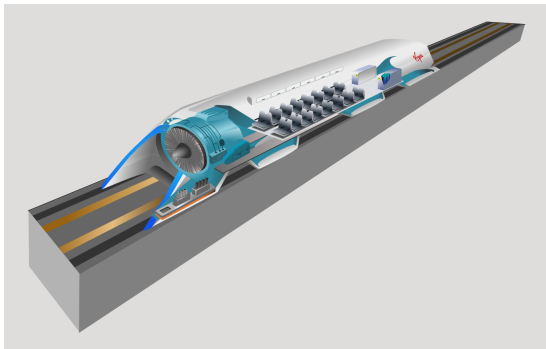


Figure 4.2 First stage of a steam jet vacuum pump for a steel degassing plant.

W.Jorish: Vacuum Technology in the Chemical Industry, Wiley, 2015

# Doprava, budoucí aplikace - Hyperloop???

Odhad max. rychlost:  $\sim 1200$  km/h,  
vzdálenost 560 km za 35 min  
pro porovnání: TGV - 320 km/h, Maglev 600 km/h



Wikipedia

# Závěr

Podle dané aplikace a tlaku, který potřebujeme musíme vybrat:

- vakuový čerpací systém - typ vývěv, čerpací rychlosti, ...
- manometry pro měření tlaku
- materiály pro konstrukci aparatury