

# Sorpční vývěvy

princip: vázání plynů a par na povrch a v materiálech k tomu zvláště připravených

koeficient ulpění blízký jedné, doba pobytu co největší

plyn zůstává uvnitř vývěvy (čerpaného prostoru) ve vázaném stavu na sorbujičím povrchu, nebo ve vrstvách pod povrchem

čerpací rychlost je úměrná velikosti sorbujičícího povrchu

# Typy vývěv

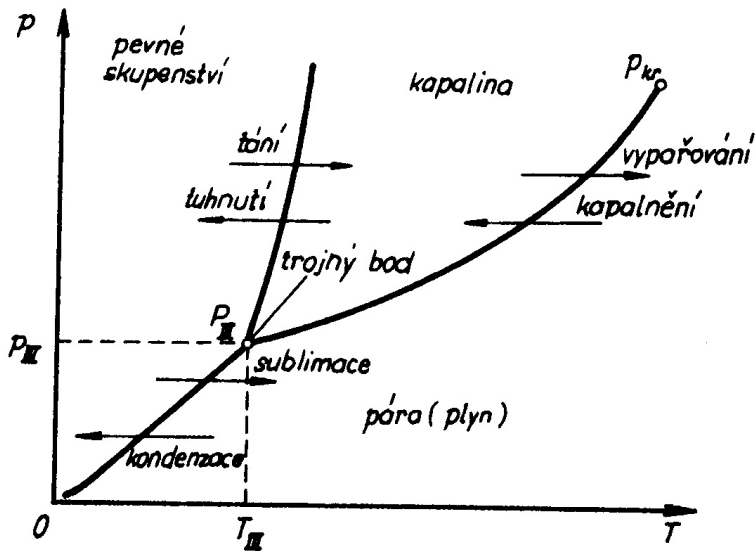
- kryogenní
- zeolitové
- sublimační
- iontové
- vypařované getry
- nevypařované getry (NEG)

# Kryogenní (kryosorpční) vývěvy

Princip: adsorbování a kondenzace plynů a par  
kryogenní vývěva - teplota  $< 30$  K

kapalný dusík (77 K) - vymrazovačka

Kryogenní vývěvy se zpravidla používají na získání ultravakua, uvádí se do činnosti až po získání nízkého vakua jiným typem vývěv (difúzní, turbomolekulární,...)



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

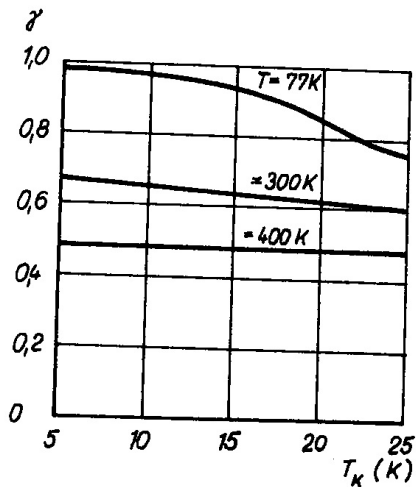
**Tab. 4.9. Hodnoty trojného bodu**

Plyn (pára)	$T_{\text{III}}$ (K)	$p_{\text{III}}$ (Pa)	$T_{\text{kr}}$ (K)	$p_{\text{kr}}$ (Pa)
He	2,2	3 000	5,3	228 000
H <sub>2</sub>	14,0	7 100	33,3	1 290 000
O <sub>2</sub>	54,4	150	154,4	5 010 000
N <sub>2</sub>	63,2	12 500	126,1	3 380 000
Ne	24,5	44 500	34,5	2 610 000
Ar	83,9	68 700	150,8	4 840 000
vzduch			132,6	3 630 000

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

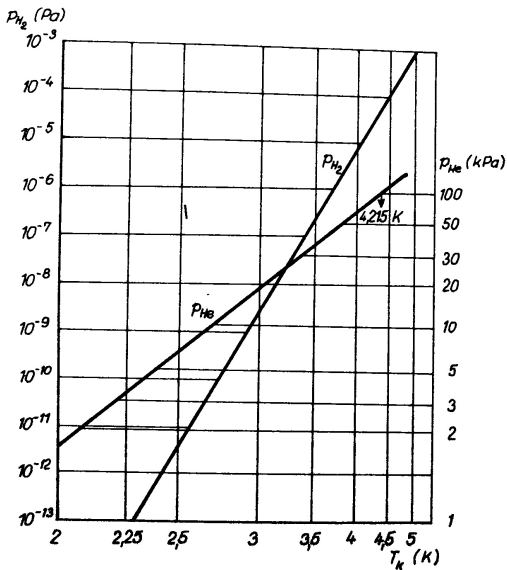
Tab. 4.10. Body varu a tání některých plynů a par a kapalného vzduchu  
(při atmosférickém tlaku)

Plyn (pára)	Bod varu		Bod tání	
	(K)	(°C)	(K)	(°C)
He	4,2	-269,9	1,2	-272
H <sub>2</sub>	20,4	-252,8	14,2	-259
Ne	27,2	-245,9	24,2	-249
N <sub>2</sub>	77,3	-195,8	63,2	-210
CO	81,6	-191,5	66,2	-207
Ar	87,3	-185,9	83,9	189
O <sub>2</sub>	90,2	-183	54,2	219
CH <sub>4</sub>	11,8	-161,4	89,1	-184
Kr	121,0	-152,1	116,2	-157
NH <sub>3</sub>	139,7	-33,4	196,1	-77
Xe	165,1	-108	161,2	-112
CO <sub>2</sub>	194,7 <sup>1)</sup>	-78,5	-	-
H <sub>2</sub> O	373,1	100	273,2	0
Hg	630	357	234,2	-38,9
kapalný vzduch <sup>2)</sup> ihned po zkapanění (22 % O <sub>2</sub> , 78 % N <sub>2</sub> )	~80	~-193	~60	~-213
po odpaření dusíku 100 % O <sub>2</sub>	90,2	-183	54,2	-219



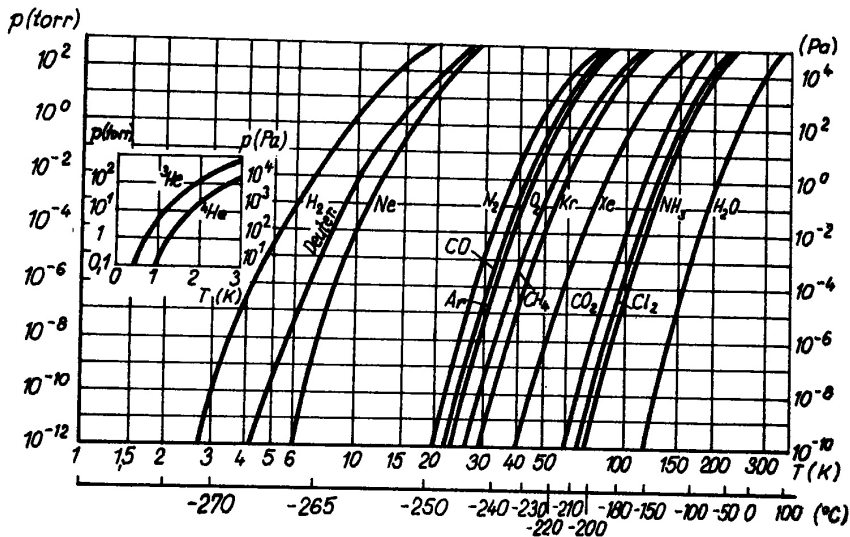
koef.ulpění pro dusík s různou teplotou

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



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

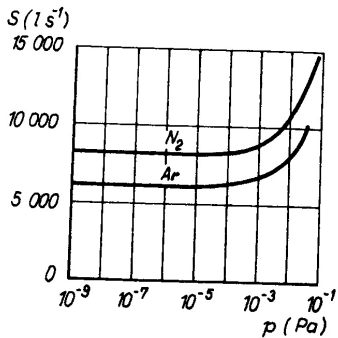




J. Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

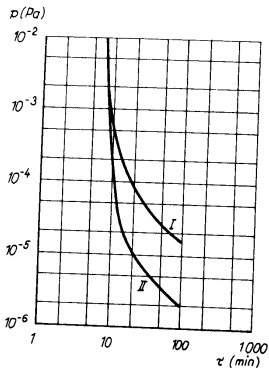
Tab. 4.11. Tlak některých plynů čerpaných kryogenními vývěvami nebo vymrazovačkami

Čerpaný plyn	Bod varu (K)	Tlak plynu (Pa) čerpaného vývěvou chlazenou kapalným				tuhým
		He 4,2 K	H <sub>2</sub> 20,4 K	Ne 27,2 K	N <sub>2</sub> 77,3 K	CO <sub>2</sub> 195 K
He	4,2	101 000	> 101 000	> 101 000	> 101 000	> 101 000
H <sub>2</sub>	20,4	$4,6 \cdot 10^{-5}$	101 000	> 101 000	> 101 000	> 101 000
Ne	27,2	—	60 000	101 000	> 101 000	> 101 000
N <sub>2</sub>	77,3	—	$3 \cdot 10^{-9}$	$10^{-4}$	101 000	> 101 000
CO	81,6	—	$5 \cdot 10^{-11}$	$10^{-5}$	68 000	> 101 000
Ar	87,3	—	$7 \cdot 10^{-11}$	$10^{-5}$	31 000	> 101 000
O <sub>2</sub>	90,2	—	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$10^{-6}$	24 000	> 101 000
CH <sub>4</sub>	112	—	—	$10^{-8}$	$10^3$	> 101 000
Kr	121	—	—	—	133	> 101 000
NH <sub>3</sub>	140	—	—	—	$10^3$	> 101 000
Xe	165	—	—	—	$10^{-1}$	> 101 000
CO <sub>2</sub>	195	—	—	—	$10^{-6}$	101 000
H <sub>2</sub> O	373	—	—	—	—	< $10^{-1}$
Hg	630	—	—	—	—	< $10^{-6}$

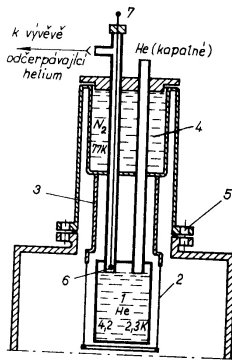


Obr. 4.89. Čerpací charakteristiky kryogenní vývěvy s plochou chlazené stěny  $2\,000\text{ cm}^2$  při teplotě 15 K pro dusík a argon

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

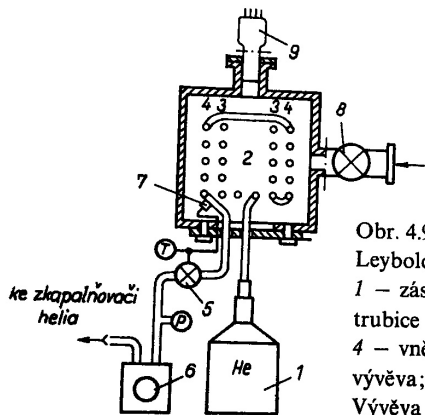


Obr. 4.94. Pokles tlaku ve vakuovém systému při čerpání difúzní vývěvou (I) a čerpací soustavou skládající se z difúzní a kryogenní vývěvy (II)



Obr. 4.95. Heliem chlazená kryogenní vývěva se stíněním chlazeným dusíkem  
 1 – zásobník kapalného helia; 2 – válec;  
 3 – válcová spojovací součást s velkou tepelnou vodivostí; 4 – zásobník kapalného dusíku; 5 – příruby; 6 – detektor výšky hladiny helia; 7 – průchodka detektoru

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



Obr. 4.96. Heliem chlazená kryogenní vývěva (firma Leybold)

1 – zásobník kapalného helia; 2 – dvojitá šroubovicová trubice chlazená kapalným heliém; 3 – vnitřní závit; 4 – vnější závit; 5, 8 – ventily; 6 – rotační olejová vývěva; 7 – termočlánek; 9 – ionizační vakuometry. Vývěva 6 čerpá páry kapalného helia a snižuje tak jeho teplotu

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

# Moderní kryogenní vývěvy

- plynné He
- uzavřený okruh He
- nejnižší teploty 10 – 20 K
- není potřeba LN<sub>2</sub>
- mezní tlak  $< 10^{-11}$  hPa
- chlazení - Gifford-McMahon/Solvay cyklus,...

# Gifford-McMahon

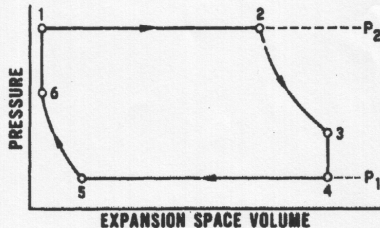
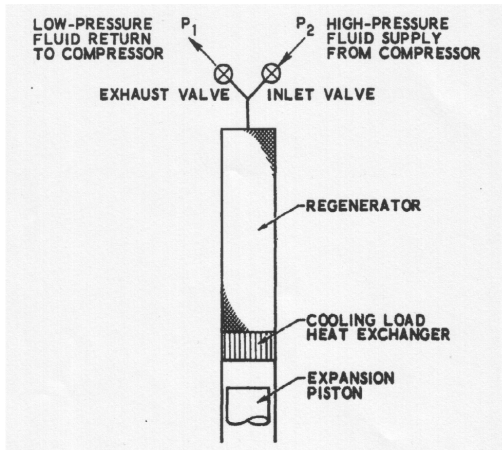
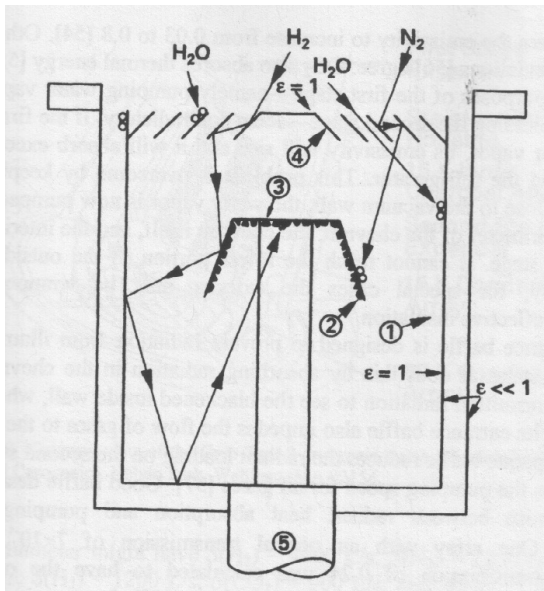


Fig. 2-7. Solvay Refrigeration Cycle

Survey of Cryogenic Cooling Techniques, Aerospace Corp. 1972

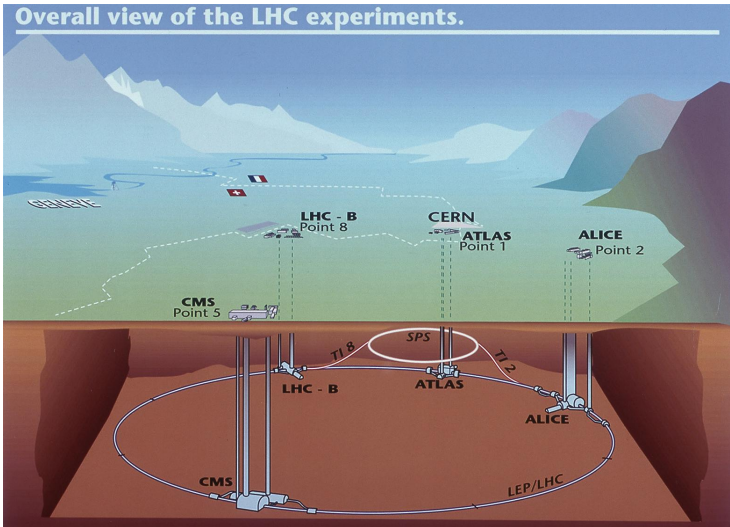
- kryokondenzace (většina plynů)
- kryosorpce (Ne, H<sub>2</sub>, He)
- kryotrapping efekt (porézní vrstva kondenzovaného plynu)
- může pracovat od atmosférického tlaku
- chlazení typicky He, H<sub>2</sub>
- získávání vysokého a extrémně vysokého vakua
- velká čerpací rychlost
- mezní tlak vývěvy je dán tenzí par čerpaného plynu při teplotě kondenzační stěny
- po určité době provozu nutná regenerace





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

# LHC



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

# LHC

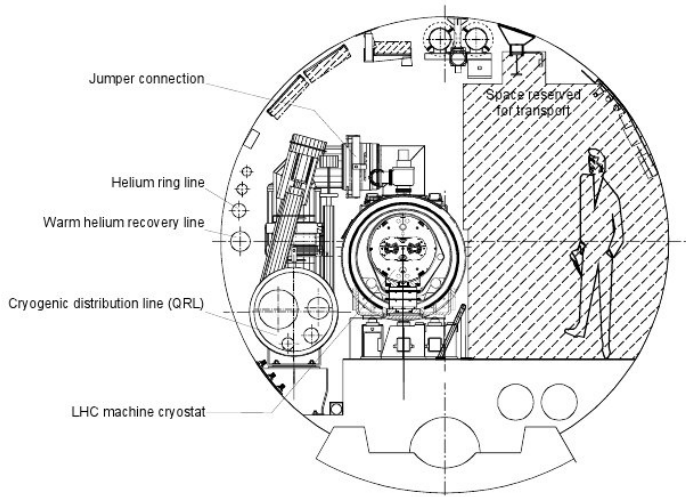
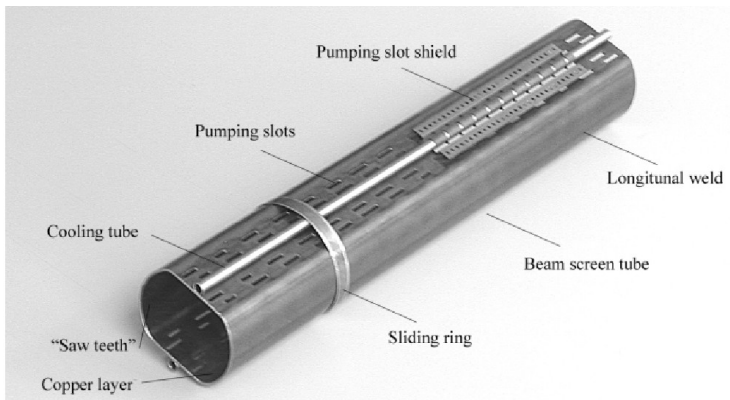


Figure 11.1: Transverse cross-section of the LHC tunnel

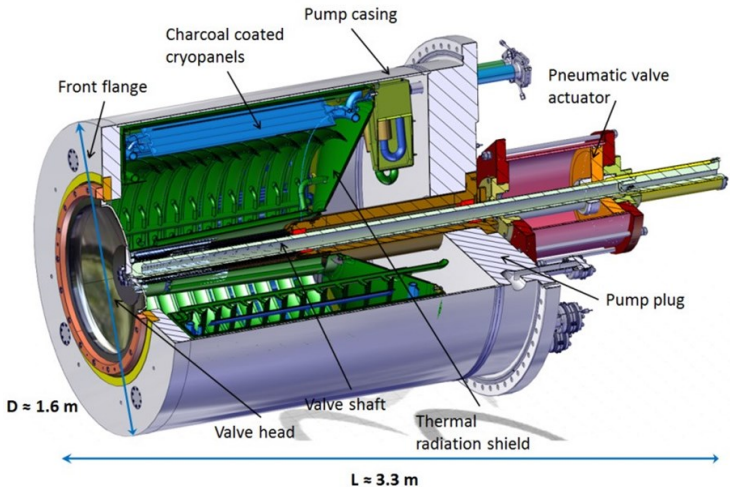
# LHC



průměr asi 45 mm, 1 mm nerez ocel +  $75 \mu\text{m}$  Cu, 5-20 K

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

# ITER



<http://www.iter.org>

# Fyzika nízkých teplot

- 1876 zkapalnění vzduchu
- 1908 zkapalnění He

## Literatura:

- internet
- J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

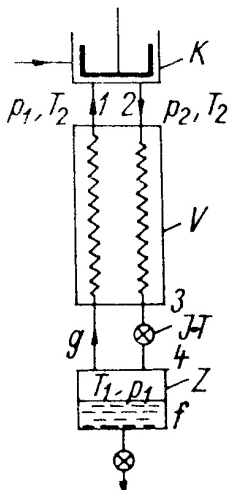
Tab. 4.3. Inverzní teploty  $T_i$  Jouleova–Thomsonova jevu pro kryogenní plyny

Plyn	O <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	Ne	D	H <sub>2</sub>	<sup>4</sup> He	<sup>3</sup> He
$T_i$ (K)	770	725	620	250	215	204	46	39

teplota, kdy se plyn chová jako ideální plyn

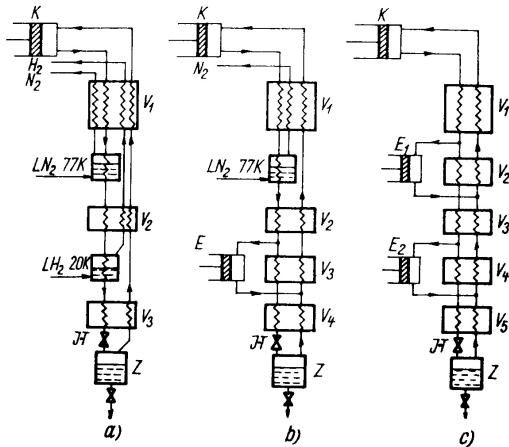
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

## Zkapalňovač LN<sub>2</sub>



J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982





Obr. 15. Schémata tří systémů využívaných pro zkvalňování He: a) Zkvalňovač s předchlazením He v lázni  $LN_2$  a  $LH_2$ , b) zkvalňovač s předchlazením He lázni  $LN_2$  a s jedním expandérem, c) zkvalňovač pracující bez předchlazení – využívající dvou expandérů (K kompresor,  $V_1$  až  $V_5$  protiproudé tepelné výměníky, E expandéry, Z zásobník LHe, J–T Jouleův–Thomsonův ventil)

# Měření nízkých teplot

Definice:

Pro každý systém existuje jistá intenzivní stavová veličina - teplota, mající stejnou hodnotu ve všech systémech, které jsou navzájem v rovnováze.

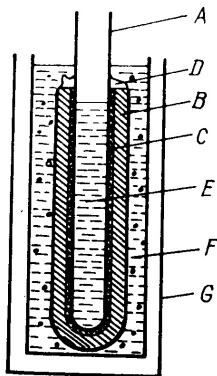
Mezinárodní praktická teplotní stupnice ITS-90, [www.ITS-90.com](http://www.ITS-90.com).

17 pevných teplotních bodů 3 - 1357,77 K

- plynové teploměry
- polovodičové teploměry
- odporové teploměry
- ...

# ITS90

Number	Temperature T <sub>90</sub> [K]	t <sub>90</sub> [°C]	Substance a	State b
1	3 to 5	-270,15 to -268,15	He	V
2	13,8033	-259,3467	e-H <sub>2</sub>	T
3	17	-256,15	e-H <sub>2</sub> (or He)	V
4	20,3	-252,85	e-H <sub>2</sub> (or He)	V
5	24,5561	-248,5939	Ne	T
6	54,3584	-218,7916	O <sub>2</sub>	T
7	83,8058	-189,3442	Ar	T
8	234,3156	-38,8344	Hg	T
9	273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	M
11	429,7485	156,5985	In	F
12	505,078	231,928	Sn	F



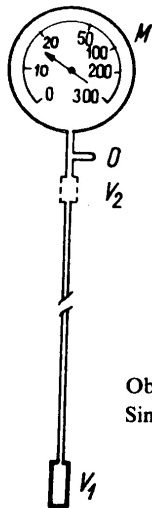
Obr. 53. Realizace trojného bodu vody (273,16 K)

B - odplyněná, redestilovaná voda, F - voda a tající led, C - led, D - vodní pára, po několika hodinách,

v části E teplota trojného bodu  $273,16 \text{ K} \pm 0,2 \text{ mK}$

J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

# Měření nízkých teplot

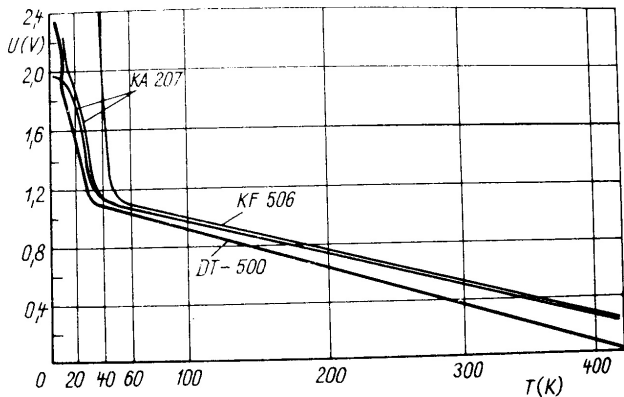


Obr. 36. Jednoduchý  
Simonův plynový teploměr

plyn He (ideální plyn) referenční tlak a teplota  $T_0$  ,  $p_0$

$$T = T_0 \frac{p}{p_0}$$

za předpokladu  $V_2 \doteq 0$  rozsah měřených teplot 1 – 300 K



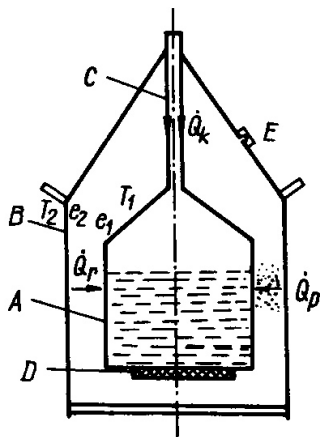
Obr. 50. Teplotní závislost spádu napětí na Si diodě DT-500 při proudu  $10 \mu\text{A}$  v propustném směru [123], na dvou čs. Si diodách KA 207 a na čs. Si tranzistoru KF 506 (báze-emitor) při proudu  $50 \mu\text{A}$  (diody) a  $150 \mu\text{A}$  (tranzistor) v propustném směru [124]

J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

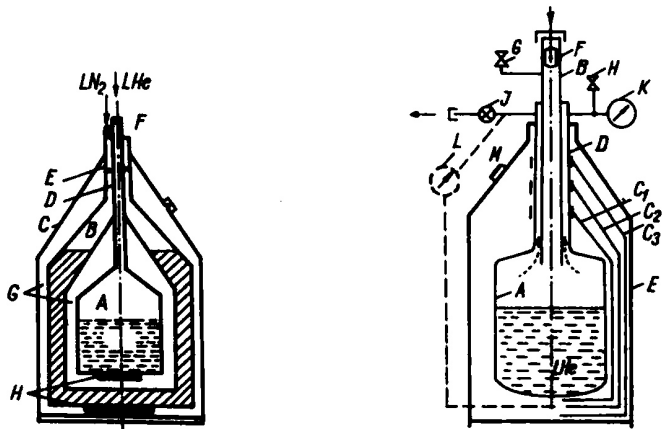
# Tepelná izolace

- Dewarovy nádoby
- Super izolace
- Pěnová izolace





Obr. 67. Jednoduchá Dewarova nádoba pro přechovávání  $\text{LN}_2$



J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

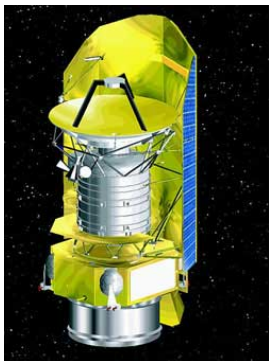
# Aplikace fyziky nízkých teplot

- Vakuová fyzika
- Vědecké přístroje
- Biologie a medicína
- Supravodiče
- Raketová technika
- Doprava
- Ostatní aplikace

# Vědecké přístroje

- chlazení detektorů CCD pro OES
- chlazení detektorů pro infračervenou spektrometrii
- chlazení výkonových laserů - HILASE - 150 K, 30 m/s
- supravodivé magnety
- kryostaty

# Herschel Space Observatory



- start 14.5.2009, raketou Ariane 5
- váha 3,3 t, umístění L2,
- primární zrcadlo má průměr 3,5 m
- 2300 l - LHe, 1,4K
- předpokládaná životnost 3 roky
- 29.4.2013 - mise ukončena

[http://en.wikipedia.org/wiki/Herschel\\_Space\\_Observatory](http://en.wikipedia.org/wiki/Herschel_Space_Observatory)

# Biologie a medicína

- dlouhodobé skladování virů a bakterií
- dlouhodobé skladování bio-preparátů
- dlouhodobé skladování semen
- kryoskalpel - chladící rychlost  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- celotělová kryoterapie,  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , asi 3 minuty

# Supravodiče

- přenos energie - Holbrook Superconductor Project - 600 m, LN2 - 49 000 l
- supravodivé motory
- akumulace energie - stabilizace el.sítě  
Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) - 1 MWh, testují se 20 MWh
- LHC - NbTi(9K) - chlazen na 1,9 K, havárie 19.9.2008, při proudu 8,7 kA, provozní proud 9,3 kA, rekonstrukce 700 m, ztráta 6 t He, celkové množství asi 120 t

<http://www.superconductors.org/>



<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:CERN-cables-p1030764.jpg>



# Raketová technika



okysličovadlo -  $\text{LO}_2$ , 90 K

palivo u některých raket -  $\text{LH}_2$ , 20 K

- vojenské rakety - V2 -  $\text{LO}_2$  4910 kg, vyrobeno asi 5200 kusů;...
- civilní rakety - Saturn V, N1, Soyuz, ...

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:N1%2BSaturn5.jpg>

# Doprava

- MAGLEV - první patent 1905
  - 2015 rychlostní rekord 603 km/h
  - 7 tras v provozu
  - 2 trasy ve výstavbě
- Vactrain
  - první zmínky 1910 - R.Goddard
  - Swissmetro - projekt zastaven
  - Transatlantic tunnel

# MAGLEV



<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:JR-Maglev-MLX01-2.jpg>

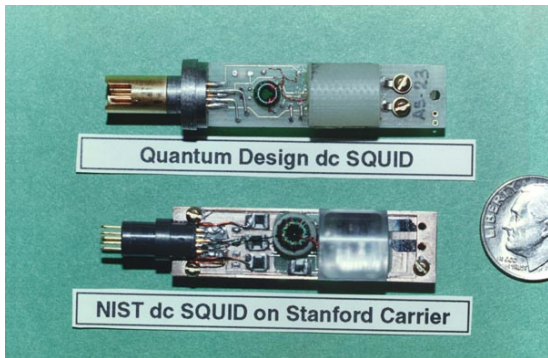
- doprava zemního plynu LNG, teplota  $-160\text{ }^{\circ}\text{C} \doteq 113\text{ K}$  ( $\text{CH}_4$ ), počet zkapalňovacích stanic - 42 (2015)  
Evropa - 25 přístavů pro příjem LNG (2015),  
typická délka cesty tankeru 20 dnů - odpar asi 2 - 6 % LNG tanker  
Q-max - 14 lodí, délka 345 m, 266 000 m<sup>3</sup>
- LNG - jako palivo (železnice, silnice)
- letadla - bezpilotní Boeing Phantom Eye -  $\text{LH}_2$
- LNG - zemní plyn kapalný
- LPG - propan-butan
- CNG - zemní plyn, stlačený

# Ostatní aplikace

- skladování potravin
- při záplavách - záchrana knih a dokumentů
- detektory magnetického pole - SQUID
- kvantové počítače - supravodiče
- teleportace - Boseho-Einsteinův kondenzát - Rb, 170 nK
- získávání vody
- akumulace energie
- velká spotřeba plynu -  $\text{LN}_2$ , LAr

# SQUID

- Josephson jev - supravodič-izolátor-supravodič
- magnetometr  $5 \times 10^{-18}$  T, (mag. pole Země 25-65  $\mu$ T)



en.wikipedia.org

# Získávání vody ze vzduchu

Princip - kondenzace

Zařízení firmy Aqua Sciencis - vírová trubice,

na výstupu teplota až  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$

4500 litrů denně



<http://www.osel.cz/index.php?clanek=2499>

# Vojenské aplikace

- chlazení infra detektorů
- rakety -  $\text{LO}_2$
- AIP pohon pro ponorky - palivové články - Type 212, 214,...
- magnetometry SQUID
- kvantové počítače