

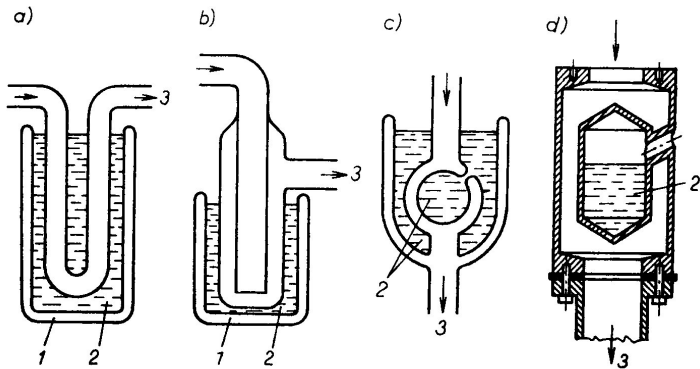
# Aplikace fyziky nízkých teplot

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

# Vakuová fyzika

- Vymrazovačky
- Sorpční vývěvy

## Vymrazovačky



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

# Sorpční vývěvy

- kryogenní
- zeolitové
- sublimační

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

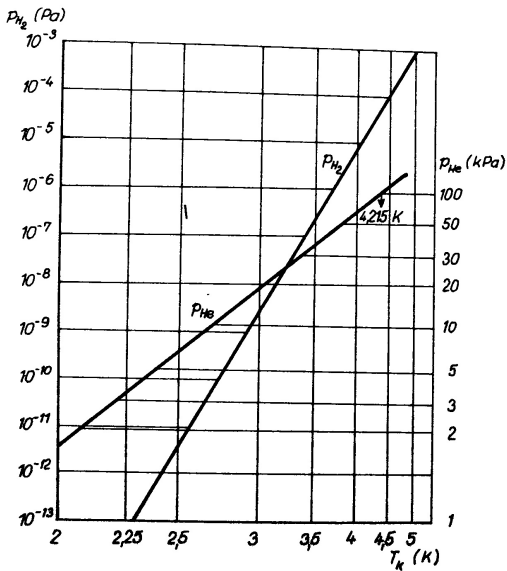
koeficient ulpění blízky jedné, doba pobytu co největší  
plyn zůstává uvnitř vývěvy (čerpaného prostoru) ve vázaném stavu na sorbujícím povrchu, nebo ve vrstvách pod povrchem  
čerpací rychlost je úměrná velikosti sorbujícího povrchu

# Kryogenní (kryosorpční) vývěvy

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

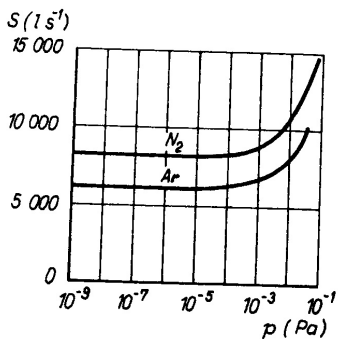
kapalný dusík (77 K) - vymrazovačka

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



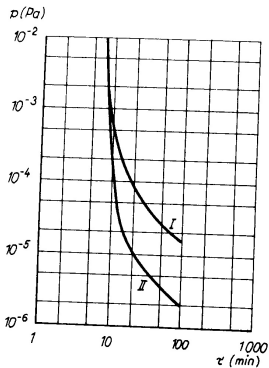
Tab. 4.11. Tlak některých plynů čerpaných kryogenními vývěvami nebo vymrazovačkami

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	—	—	—	—	< $10^{-6}$

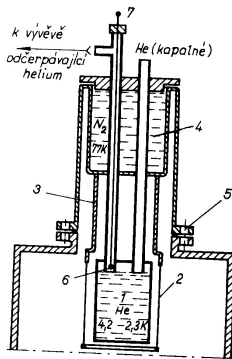


Obr. 4.89. Čerpací charakteristiky kryogenní vývěvy s plochou chlazené stěny  $2\,000\text{ cm}^2$  při teplotě  $15\text{ K}$  pro dusík a argon

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

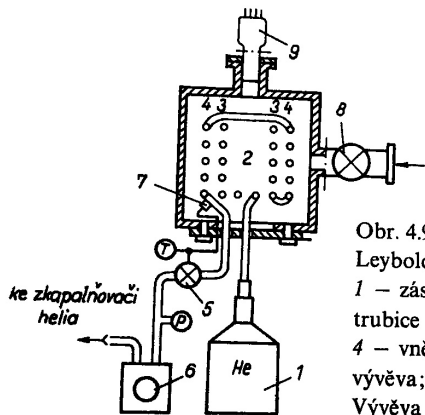


Obr. 4.94. Pokles tlaku ve vakuovém systému při čerpání difúzní vývěvou (I) a čerpací soustavou skládající se z difúzní a kryogenní vývěvy (II)



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





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

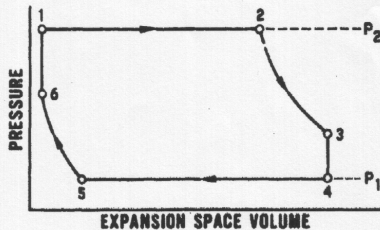
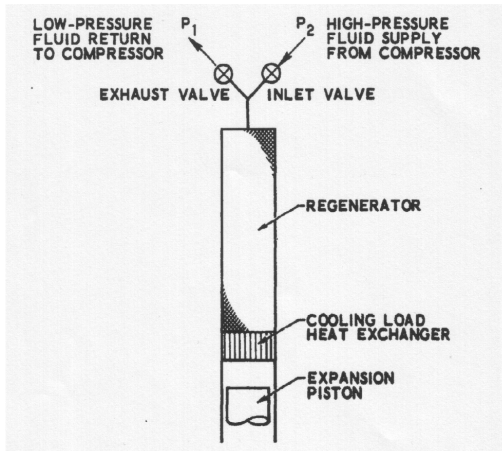
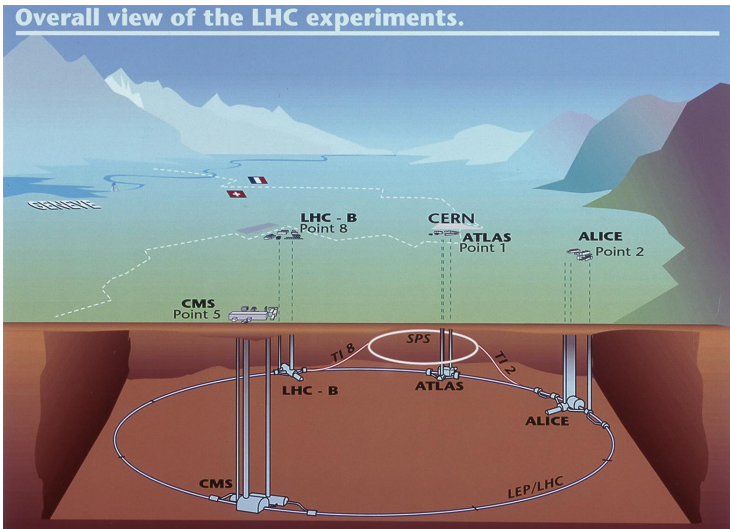


Fig. 2-7. Solvay Refrigeration Cycle

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
- 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

# LHC



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

# LHC

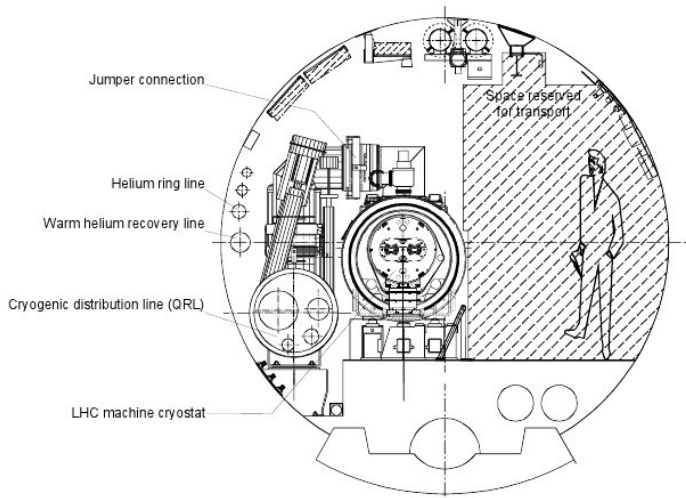
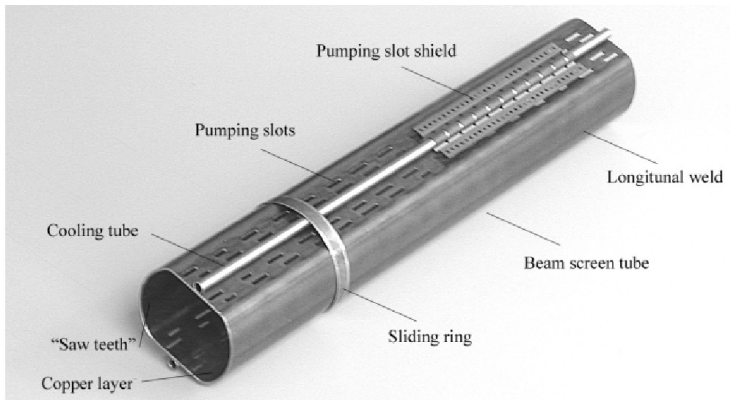


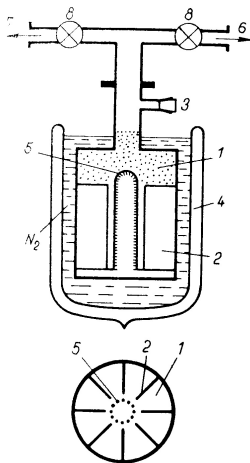
Figure 11.1: Transverse cross-section of the LHC tunnel

# LHC



průměr asi 45 mm, 1 mm nerez ocel +  $75 \mu\text{m}$  Cu, 5 – 20 K  
<http://lhc.web.cern.ch/lhc/>

# Zeolitové vývěvy



Obr. 4.108. Zeolitová vývěva

1 – zeolit; 2 – přepážky; 3 – přetlakový ventil; 4 – Dewarova nádoba; 5 – síťka; 6 – potrubí k rotační vývěvě; 7 – potrubí k vakuovému systému; 8 – ventily; 9 – hrdlo vývěvy z materiálu s malou tepelnou vodivostí (např. z nerezavějící oceli)

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

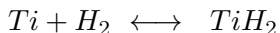
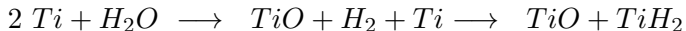
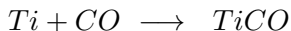
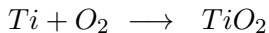


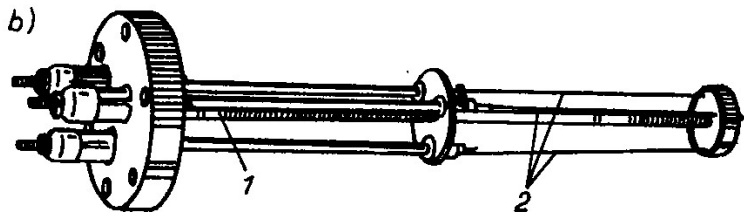
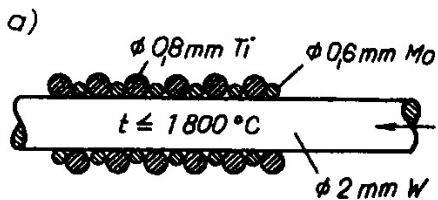
- dominantní proces je fyzisorpce
- dobře čerpá  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ , uhlovodíky
- špatně čerpá  $Ne$ ,  $He$ ,  $H_2$ , ...
- velký povrch, 1 g  $\sim$  1000 m<sup>2</sup>, pracuje od  $\sim$  10<sup>5</sup> Pa
- dutiny a kanálky  $\sim$  1 nm
- dá se regenerovat při vysoké teplotě
- zvětšení účinnosti snížením teploty zeolitu (tekutý dusík 77 K)
- žádné vibrace

# Sublimační vývěvy

Princip - opakované vytváření povrchu čistého kovu (napařování, naprašování,...), nejčastěji se používá Ti.

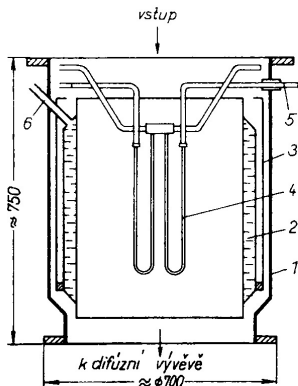
Teoreticky mohou pracovat od atmosférického tlaku, prakticky asi od  $10^{-4}$  Pa.





Teploty tání: Mo:  $2623 \text{ }^\circ\text{C}$ , Ti:  $1668 \text{ }^\circ\text{C}$ , W:  $3422 \text{ }^\circ\text{C}$

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



Obr. 4.122. Velká kryogenní sublimační vývěva s čerpací rychlostí  $S_{\text{H}_2} = 150\,000\text{ l s}^{-1}$  (podle Prévota a Sledziewského, 1964)  
 1 – plášť; 2 – chlazení kapalným dusíkem;  
 3 – stínění pro tepelnou izolaci; 4 – zdroj par titanu; 5 – přívod proudu; 6 – otvor pro plnění dusíkem

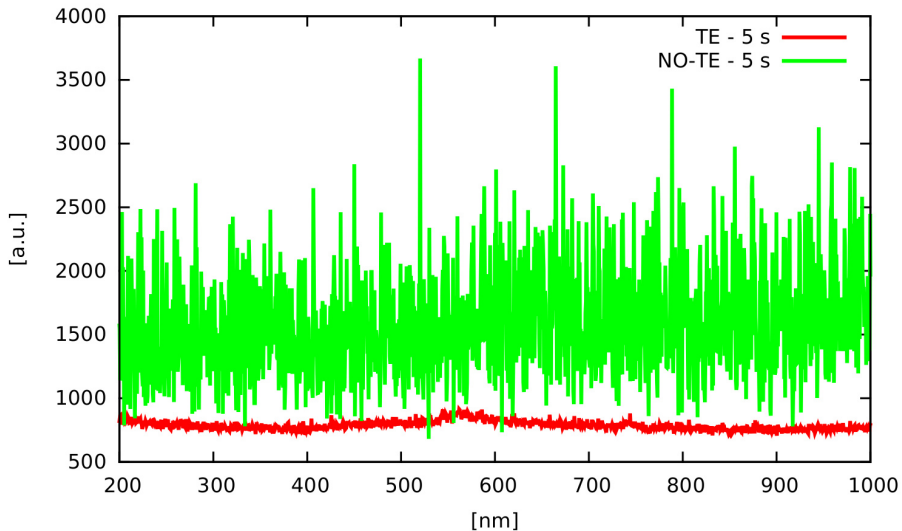
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

- dominantní proces je chemisorpce
- dobře čerpá  $H_2, H_2O, N_2, CO, CO_2, O_2$
- nečerpá inertní plyny např.  $Ne, Ar, \dots$
- opakované vytváření čistého povrchu kovu, pracuje od  $\sim 10^{-4}$  Pa
- získávání vysokého a extrémně vysokého vakua
- zvětšení účinnosti snížením teploty pohlcujícího povrchu

# Vědecké přístroje

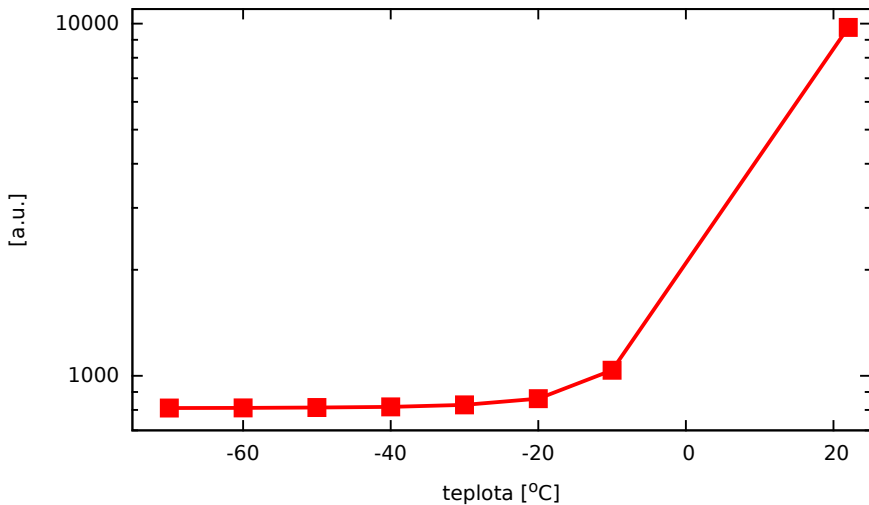
- chlazení detektorů CCD pro OES
- chlazení detektorů pro infračervenou spektrometrii
- chlazení výkonových laserů - HILASE
- supravodivé magnety
- kryostaty

# OES - chlazení CCD detektoru

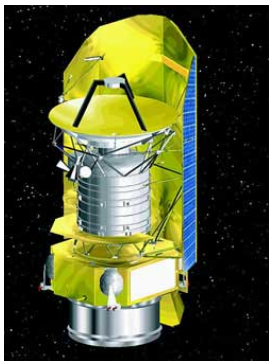




# Šum CCD detektoru Andor Newton 940



# Herschel Space Observatory



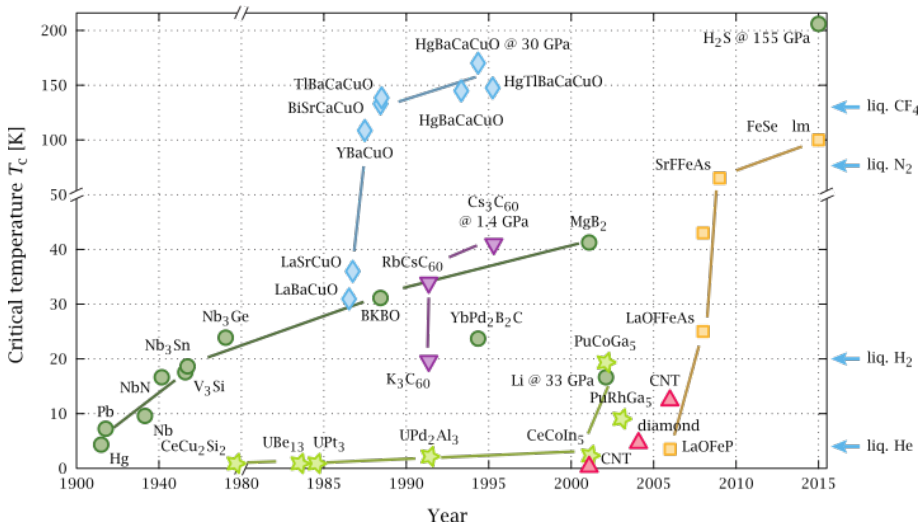
- start 14.5.2009, raketou Ariane 5
- váha 3,3 t
- umístění L2, soustavy Země – Slunce
- primární zrcadlo má průměr 3,5 m
- 2300 l LHe; 1,4K
- předpokládaná životnost 3 roky
- 29.4.2013 - mise ukončena

[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



# Supravodiče

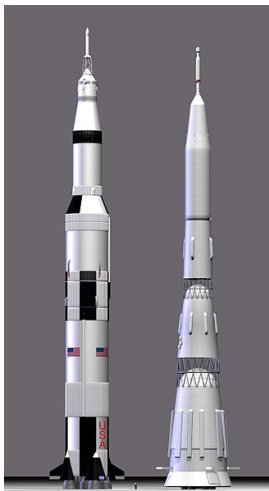
- přenos energie - Holbrook Superconductor Project - 600 m, LN2 - 49 000 l
- supravodivé motory
- akumulace energie - stabilizace el.sítě  
Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) - 1 MWh, testují se 20 MWh
- LHC - NbTi (9 K) - chlazen na 1,9 K, havárie 19.9.2008, při proudu 8,7 kA, provozní proud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



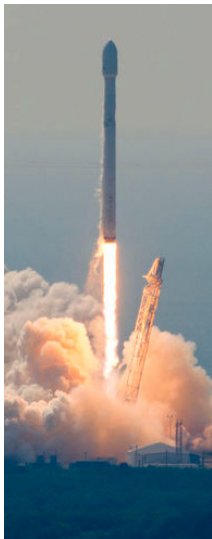
okysličovadlo -  $\text{LO}_2$ , 90 K

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>

# Raketová technika



SpaceX

SpaceX - Falcon 9 FT  
okysličovadlo -  $\text{LO}_2$ ,  
palivo kerosin

- havarie 1.9.2016
- podchlazené palivo  $\text{LO}_2$  -  $\sim 66 \text{ K}$
- $\text{O}_2$  kapalný 90 K, bod tuhnutí 54 K
- pravděpodobná příčina  
- reakce tuhého  $\text{O}_2$  s kompozitní nádrží pro LHe



# Doprava

- MAGLEV - první patent 1905
  - 2015 rychlostní rekord 603 km/h
  - 6 tras v provozu
  - 4 trasy ve výstavbě
- Vactrain
  - první zmínky 1910 - R.Goddard
  - Swissmetro - projekt zastaven
  - Transatlantic tunnel
  - StarTram
  - Hyperloop - max. 1300 km/h, 100 Pa, vzduchový polštář, 35 min - 570 km, projekt 2012 nepoužívá nízké teploty

# MAGLEV



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

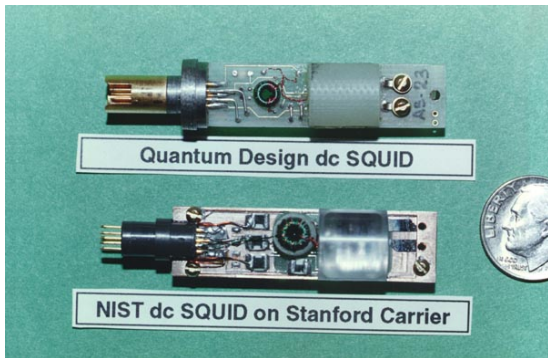
- doprava zemního plynu LNG, teplota  $-160\text{ }^{\circ}\text{C} \doteq 113\text{ K}$  ( $\text{CH}_4$ ), počet zkapalňovacích stanic - 42 (2015)  
Evropa - 25 přístavů pro příjem (2015),  
typická délka cesty tankeru 20 dnů - odpar asi 2 - 6 %  
LNG tanker Q-max - 14 lodí, délka 345 m, 266 000  $\text{m}^3$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

# Ostatní aplikace

- skladování potravin
- při záplavách - záchrana knih a dokumentů
- čištění povrchů suchým ledem  $\text{CO}_2$   $-78\text{ }^\circ\text{C}$
- strojírenství - odolnost vůči opotřebení, otřepy
- detektory magnetického pole - SQUID
- kvantové počítače - supravodiče
- teleportace - Boseho-Einsteinův kondenzát - Rb, 170 nK
- získávání vody
- akumulace energie

# SQUID

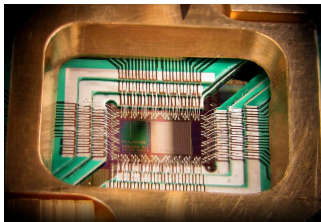
- Josephson jev - supravodič-izolátor-supravodič
- magnetometr  $5 \times 10^{-18}$  T, (mag. pole Země 25-65  $\mu$ T)



en.wikipedia.org

# Kvantové počítače

- qubity
- 2011 - 128 qubitů
- 2013 - 512 qubitů
- 2015 - 1152 qubitů
- 2017 - 2048 qubitů
- supravodiče
- NSA - lámání šifer



D-Wave - 128 qubit  
[en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

# Kvantová teleportace

- Boseho-Einsteinův kondenzát - Rb 170 nK, 2001 - Nobelova cena
- kvantové efekty na makroskopické úrovni
- atomy, fotony, ...
- změna kvantového stavu

# 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
- magnetometry SQUID
- kvantové počítače