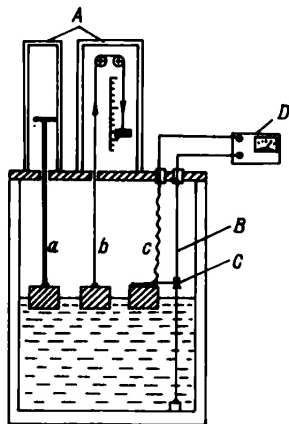


# Tepelné izolace a hladinoměry kryokapalin

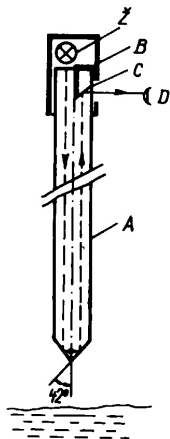
- Různé typy hladinoměrů pro kryokapaliny
- Doplnování kryokapalin
- Tepelné izolace
  - Přenos tepla vedením, zářením,...
  - Izolace - vakuová, superizolace, pěnová,....

# Plovákové hladinoměry



Obr. 55. Plovákové hladinoměry:  
*a* – tyčinkový, *b* – s vláknovým převodem,  
*c* – s elektrickým vyhodnocováním

# Optické hladinoměry

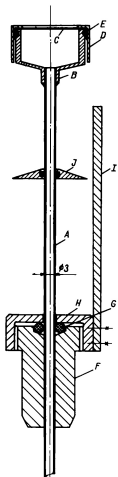


Obr. 56. Optický hladinoměr

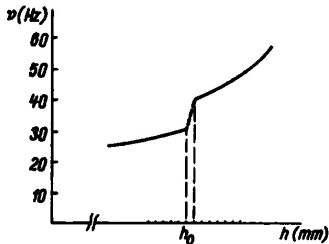
hodí se pro  $\text{LN}_2$ , ne pro LHe

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

# Termoakustický hladinoměr pro LHe

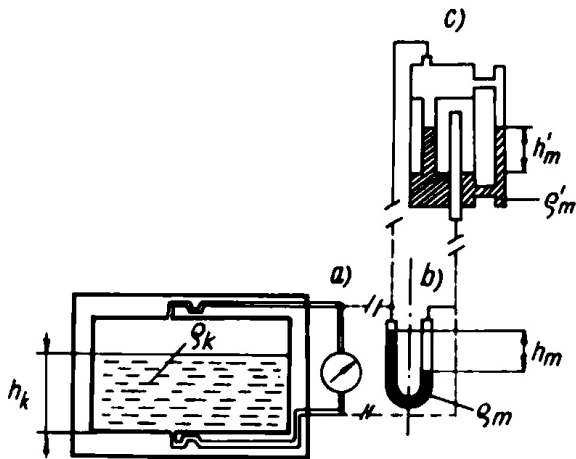


Obr. 57. Termoakustický hladinoměr

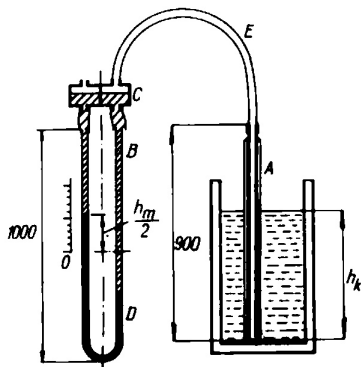


Obr. 58. Frekvence termoakustických kmitů v závislosti na vzdálenosti  $h$  ode dna nádoby s LHe ( $h_0$  výška hladiny)

# Hladinoměry založené na měření tlaku



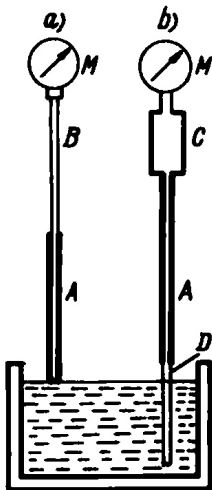
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982



Obr. 60. Hladinometer  $\text{LN}_2$  pro měření v nádobách s přímým hrdlem [A tepelně vodivá trubice s izolačním pouzdrům, B diferenciální tlakoměr, C dvoukomorový zásobník lehčí kapaliny (voda) s relativně velkým průřezem komor, D těžší kapalina (obarvený dichlormethan), E spojovací hadička,  $h_k$  výška sloupce  $\text{LN}_2$ ,  $h_m/2$  měřený údaj; v případě uvedených kapalin je  $h_m = 2,4 h_k$ ]

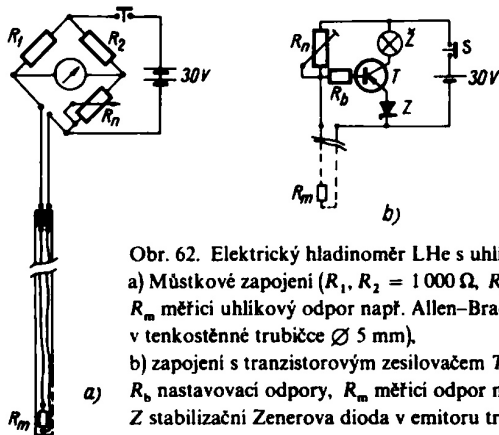
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

# Kondenzační hladinoměry



Obr. 61. Hladinoměry využívající kondenzace par kapaliny:  
a) Hladinoměr indikující dotyk s hladinou poklesem hodnoty tlaku na manometru,  
b) hladinoměr pro kontinuální měření výšky sloupce kryokapaliny

# Elektrické odporové hladinoměry



Obr. 62. Elektrický hladinoměr LHe s uhlíkovým odporem:

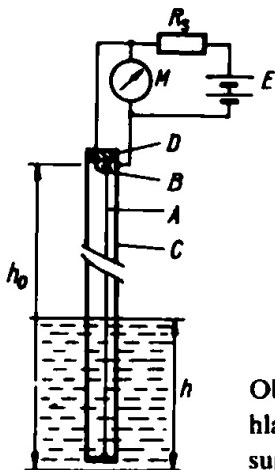
a) Můstkové zapojení ( $R_1, R_2 = 1\,000\ \Omega$ ,  $R_n$  nastavovací odpor  $> 1\,000\ \Omega$ ,  $R_m$  měřicí uhlíkový odpor např. Allen-Bradley 50  $\Omega$ /250 mW umístěný v tenkostěnné trubičce  $\varnothing 5\ \text{mm}$ ).

b) zapojení s tranzistorovým zesilovačem  $T$  a indikační žárovkou  $Z$  ( $R_n$ ,

a)  $R_b$  nastavovací odpory,  $R_m$  měřicí odpor např. Allen-Bradley 50  $\Omega$ ,  $Z$  stabilizační Zenerova dioda v emitoru tranzistoru  $T$ ,  $S$  spínací tlačítko)



# Supravodivý hladinoměr



Obr. 63. Kontinuální hladinoměr LHe se supravodivým vláknem

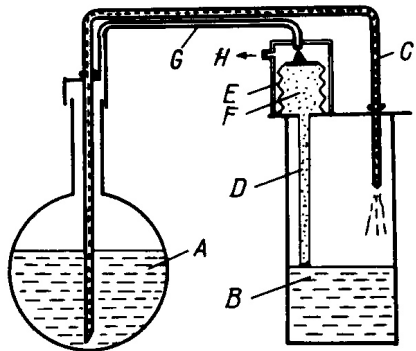
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

# Kapacitní hladinoměr

válcový kondenzátor

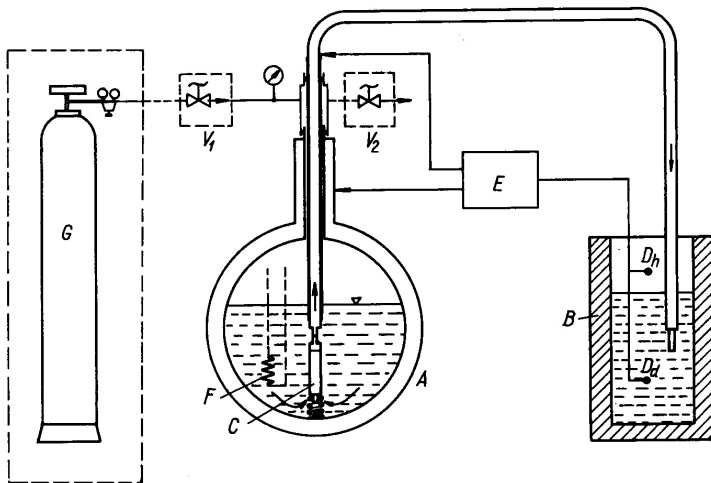
Kapalina	bod varu [K]	$\epsilon_r$
LHe	4,21	1,0492
LH <sub>2</sub>	20,38	1,230
LNe	27,10	1,187
LN <sub>2</sub>	77,35	1,431
LO <sub>2</sub>	90,19	1,484

# Automatické doplňování kryokapalin



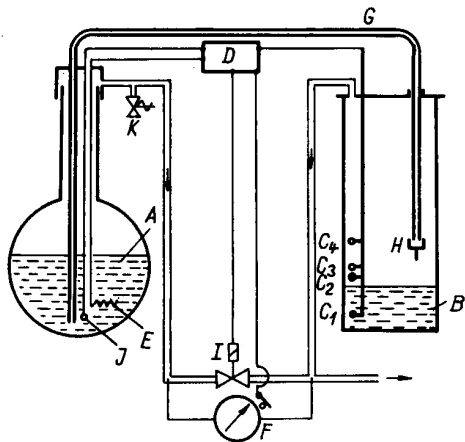
Obr. 64. Automatické zařízení pro doplňování LN<sub>2</sub> s vlnovcovým ventilem

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



Obr. 65. Automatický regulátor hladiny LN<sub>2</sub> s miniaturním ponorným elektromagnetickým kryoventilem

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



Obr. 66. Automatické zařízení pro udržování hladiny LHe v požadovaném rozmezí

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

# Tepelné izolace

cílem tepelné izolace je omezit přenos tepla:

- přenos tepla zářením
- přenos tepla konvekcí (proudění plynu)
- přenos tepla zbytkovým plynem
- vedení tepla pevnými látkami

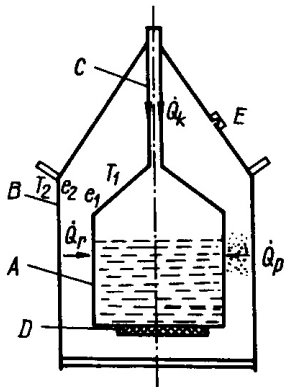
Dokonalá tepelná izolace neexistuje, různými typy izolací se snažíme omezit přenos tepla. Při skladování kryokapalin vždy nastává jejich odpar. Pro mili a mikro-kelvinovou oblast mají vliv i další efekty - mechanické a akustické kmity, vířivé proudy, elektromagnetické záření,...

Příklad: dopad špendlíku z výšky 3 mm na 100 g Cu blok o teplotě  $10^{-6}$  K způsobí vzrůst teploty na  $10^{-2}$  K

# Odpar kryokapalin

Kapalina	bod varu [K]	odpar [ $\text{cm}^3\text{h}^{-1}$ ] příkonem 1 mW
L <sup>3</sup> He	3,19	7,2
L <sup>4</sup> He	4,21	1,40
LH <sub>2</sub>	20,38	$1,15 \times 10^{-2}$
LNe	27,10	$3,46 \times 10^{-2}$
LN <sub>2</sub>	77,35	$2,26 \times 10^{-2}$
LO <sub>2</sub>	90,19	$1,48 \times 10^{-2}$

# Dewarova nádoba na $\text{LN}_2$



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



# Přenos tepla zářením

černé těleso - šedé těleso - záření v široké frekvenční oblasti

Wienův zákon:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \quad [\mu\text{m}, \text{K}]$$

Stefan-Boltzmanův zákon:

$$q = \sigma T^4 \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

dvě plochy s různou teplotou:

$$Q_{21} = \sigma E_{21} A_{21} (T_2^4 - T_1^4) \quad [\text{W}]$$

$$A_{21} \approx A_1 ; E_{21} = \frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2) e_1}$$

$e_1, e_2$  - emisivity povrchů s teplotou  $T_1$  a  $T_2$

# Záření černého tělesa

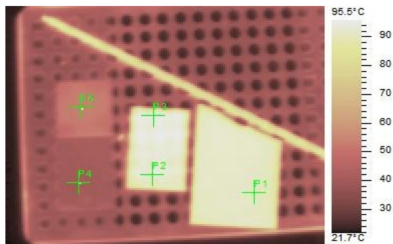
$T[K]$	$T^4[K^4]$	$q[Wm^{-2}]$	$\lambda_m [\mu m]$
300	$8,1 \times 10^9$	460	9,66
77	$3,51 \times 10^7$	1,99	37,6
20	$1,60 \times 10^5$	$9,1 \times 10^{-3}$	144,9
4	$2,56 \times 10^2$	$1,45 \times 10^{-5}$	724,5
1	1	$5,67 \times 10^{-8}$	2898
0,1	$1 \times 10^{-4}$	$5,67 \times 10^{-12}$	28980

# Součinitel poměrné pohltivosti

Látka	T [K]	a	
Al elektrolyticky leštěný	300	0,03	
	76	0,018	
	4	0,011	
Al s vrstvou oxidů $1\mu\text{m}$	300	0,30	
	Ag	76	0,01
	Au	76	0,01
Cu oxidovaný	300	0,78	
Cu leštěná	300	0,03	
Sn	76	0,013	
Ni leštěný	75	0,016	
nerez	76	0,048	
sklo	293	0,94	

tloušťka vrstvy alespoň 1% z  $\lambda_m$ , a - je emisivita

Reálná experiment: různé materiály zahřáté na stejnou teplotu a nasnímané termokamerou a odhad jejich emisivity (druhý sloupec), ve čtvrtém sloupci je jakou teplotu by naměřila termokamera při nastavené emisivitě 1 pro všechny materiály.



Bod	a	teplota	a=1	materiál
P1	0,73	103,0 °C	90,8 °C	korund
P2	0,77	102,8 °C	93,2 °C	sklo
P3	0,79	103,0 °C	94,9 °C	sklo pískované
P4	0,07	100,0 °C	40,4 °C	Al leštěný
P5	0,21	101,9 °C	53,2 °C	Al leštěný, pískovaný

# Snížení radiačního tepelného toku pomocnými mezistěnami

$n$  – tepelně izolovaných mezistěn

$$Q = \frac{\sigma E_{21} A_1 (T_2^4 - T_1^4)}{n + 1}$$

reálně 2 – 3 krát větší tepelný tok  
je to princip mnohvrstevné izolace

Příklad:

$$e_1 = e_2 \ll 1 ; E_{21} = \frac{e}{2} ; T_2 \gg T_1$$

$$Q = \sigma A_1 T_2^4 \frac{e}{2}$$

$$T_2 = 300 \text{ K} ; T_1 = 4,2 \text{ K} ; e = 0,04 ; A_1 = 1 \text{ m}^2 \Rightarrow Q = 9 \text{ W}$$

to je odpar asi  $12 \text{ lh}^{-1}$  LHe

$$T_2 = 77 \text{ K} \Rightarrow Q = 39 \text{ mW}$$

to je odpar asi  $52 \text{ cm}^3 \text{h}^{-1}$

# Vedení tepla konvekcí - prouděním plynu

$$Q = C \rho^{1/2} (T_2 - T_1)^{5/4}$$

$\rho$  je hustota,  $C$  je konstanta  
zabránit konvekci můžeme:

- rozdělení prostoru na malé komůrky
- snížením tlaku pod 10 Pa

# Vedení tepla zbytkovým plynem

pro vzduch při atm. tlaku:

$$Q = \frac{\lambda A_1}{d} (T_2 - T_1)$$

pro molekulární proudění a sousedé válcové plochy:

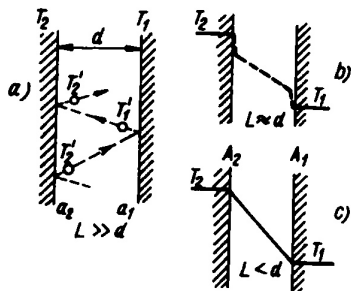
$$Q = \left( \frac{R}{8\pi} \right)^{1/2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} a_c \frac{T_2 - T_1}{(MT)^{1/2}} p A_1$$

kde  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ,  $a_c$  je koeficient akomodace

$$a_c = \frac{a_1 a_2}{a_2 + a_1 (1 - a_2) \frac{A_2}{A_1}}$$

$$a_1 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2' - T_1}, \quad a_2 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2 - T_1'}$$





Obr. 72. Vedení tepla zbytkovým plynem:  
 a)  $L \gg d$ , molekuly plynu mají po srážce se stěnami  $A_1$  a  $A_2$  energie odpovídající teplotám  $T_1$  a  $T_2$ .  
 b)  $L \approx d$ , závislost teploty plynu mezi oběma stěnami schématicky znázorňuje náčrt,  
 c)  $L < d$ , průběh teploty mezi stěnami je přibližně lineární

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

## Akomodační koeficient - orientační hodnoty

Teplota [K]	He	H <sub>2</sub>	vzduch
300	0,3	0,3	0,8-0,9
77	0,4	0,5	1
20	0,6	1	1
4	1	1	1

# Vedení tepla pevnými látkami

$$Q = \frac{\lambda A (T_2 - T_1)}{d} \quad [\text{W}]$$

n – vrstev různých materiálů

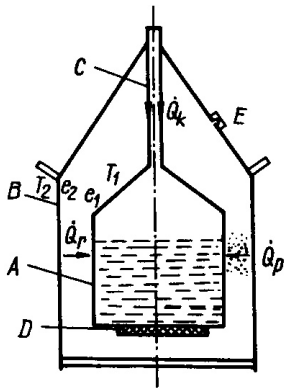
$$Q = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum_{i=1}^n R_i} ; R_i = \frac{d_i}{\lambda_i}$$

# Vakuová izolace - Dewarova nádoba

- tlak v meziprostoru asi  $10^{-3}$  Pa
- materiál tvrdé sklo, nerez,...
- Ag - kvůli radiaci
- difuze He přes sklo
- kombinace vakua a jiných druhů izolace

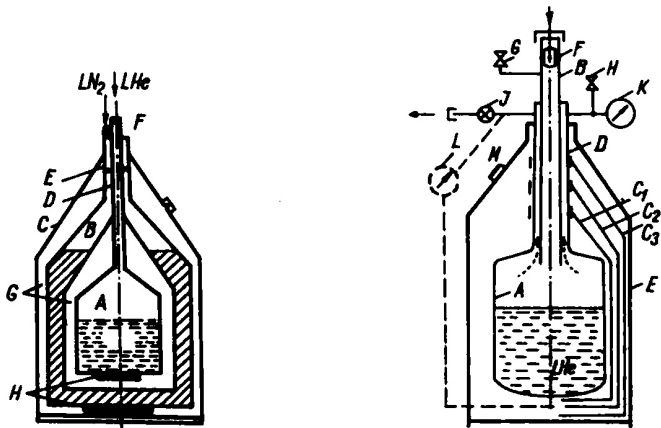
Při tlaku  $10^{-3}$  Pa je střední volná dráha pro vzduch a teplotu 300 K asi 6,6 m.

# Dewarova nádoba na $\text{LN}_2$



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

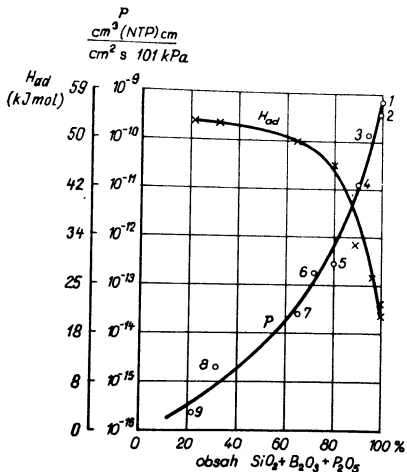
# Dewarova nádoba na LHe



Pro skladování LHe se používá stínění pomocí LN2 (vlevo), nebo  
mnohvrstevná izolace (vpravo)

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

# Pronikání He sklem



Obr. 3.24. Závislost aktivační energie difúze  $H_{ad}$  a pronikání helia sklem s různým obsahem sklotvorných složek ( $\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 + \text{P}_2\text{O}_5$ ) při teplotě 373 K (podle Nortona, 1953; Eschbacha, 1960 a dalších). Číslo u křivek odpovídají číslům skel v tab. 3.16

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

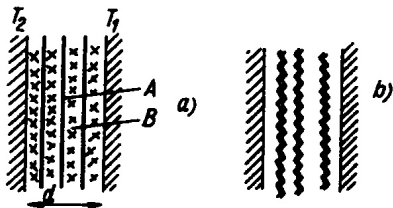
Tab. 6.2. Přehled skel a jejich některých vlastností (podle W. Espeho a kol.)

Sklo	křemičité (tavený SiO <sub>2</sub> )	velmi tvrdé (borokřemičité bez alkálií)	tvrdé (borokřemičité)	olovnaté (olovnatokřemičité)	měkké (alkalicko-vápenatokřemičité) a) s Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> b) bez Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5–23 % 3–25 %	> 10 % < 5 %	< 8 %	a) 0 b) 1–5 %
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O CaO PbO SiO <sub>2</sub>	> 95 %	< 10 % zbytek	5–8 % zbytek	20–35 zbytek	13–15 % 5–15 % zbytek
$\alpha$ (°C) <sup>-1</sup>	(0,55–0,65) · 10 <sup>-6</sup>	(3–6) · 10 <sup>-6</sup>	(3,5–6) · 10 <sup>-6</sup>	(8–9) · 10 <sup>-6</sup>	a) (6,8–9,5) · 10 <sup>-6</sup> b) (8–11) · 10 <sup>-6</sup>
T <sub>ch</sub> (°C) <sup>1</sup>	990–1 040	450–700	430–540	400–450	a) 450–500 b) 40–480
T' <sub>ch</sub> (°C) <sup>1</sup>	1 140	490–730	470–590	430–480	a) 480–540 b) 430–510
T <sub>i</sub> (°C) <sup>1</sup>	1 100	470–720	450–570	410–470	a) 470–530 b) 410–500
T <sub>m</sub> (°C) <sup>1</sup>	1 600	700–950	690–780	580–650	490–750
Měrný odpor ρ <sub>20°C</sub> (Ω cm)	10 <sup>17</sup> –10 <sup>18</sup>	10 <sup>18</sup>	10 <sup>14</sup> –10 <sup>18</sup>	10 <sup>17</sup>	a) 10 <sup>15</sup> b) 10 <sup>13</sup>
Měrná tepelná vodivost	0,013–0,026	0,01	0,013	0,08	0,01
κ (J cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )					
Měrné teplo (J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0,8–1,26			0,4–1,7	

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



# Mnohovrstevná izolace - superizolace



Obr. 75. Příkladů dvou typů mnohovrstevné izolace (superizolace):

a) *A* hliníková fólie, *B* skelná tkanina,

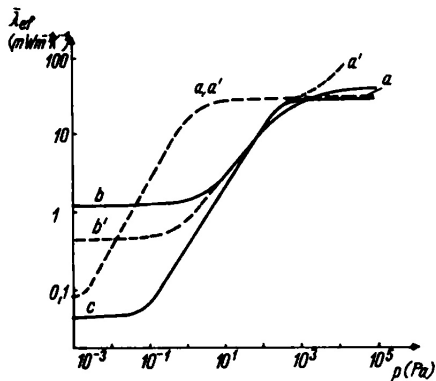
b) fólie z plastické hmoty (např. z mylaru) jednostranně pokovená Al

prostor mezi jednotlivými vrstvami je ještě vyčerpán na nízký tlak

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

# Prášková izolace

- jemný prášek z tepelně nevodivého materiálu
- snížení tlaku
- nesmí se mechanicky stlačit
- perlit, silikagel, ...



Obr. 74. Závislosti efektivní tepelné vodivosti  $\lambda_{ef}$  na tlaku  $p$  zbytkových plynů pro různé typy prakticky užívaných izolací:

- a) Idealizovaný případ vakuové izolace ( $d = 1$  cm), kde nemůže vznikat konvekce.
- a') vakuová izolace ( $d = 1$  cm) s možností vzniku konvekce při tlaku  $p > 10$  Pa,
- b) vakuoprášková izolace,
- b') vakuoprášková izolace s příměsemi kovových vloček,
- c) mnohovrstvá izolace (superizolace)

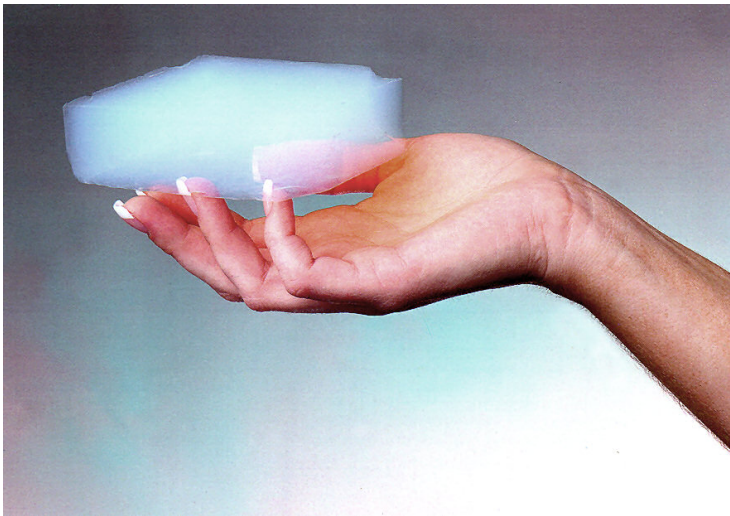
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

# Pěnová izolace

- malé uzavřené, nebo otevřené komůrky
- polystyren, polyuretan, epoxid, sklo,...
- malá hustota
- vakuum
- polystyren 4l LN<sub>2</sub>, síla stěny 3 cm, odpaření asi za 14 h
- raketová technika - STS 107, start 16.1.2003, 1.2.2003 Columbia, 60x38x7,5 cm, rychlost 185 – 255 m/s

# Aerogel

- Si, C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ...
- póry 30 nm
- nižší tepelná vodivost než vzduch
- hustota asi 1900 g/m<sup>3</sup>
- nejmenší hustota 2013 aerographene 160 g/m<sup>3</sup>, vzduch 1200 g/m<sup>3</sup>
- využití: tepelná izolace - raketová technika, vesmírné sondy, oblečení, budovy,...; absorpční materiál; léčiva- je biokompatibilní;...



[en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)



## Měrná tepelné vodivost látek

Látka	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$
graphene	4840
c-BN	740
Ag	429
Au	318
Ni	90,9
korund	30
neraz	18
a-BN	3
sklo	0,8-1,4
polyethylen HDPE	0,5
plexisklo	0,2
korek	0,04-0,07
papír	0,05
polystyren	0,033
aerogel	0,03 - 0,004
vzduch	0,026



# Komerční nádoby na skladování LN<sub>2</sub> a LHe

LN<sub>2</sub>

Typ	objem [l]	odpar [%/den]	materiál
IKL32	31,5	1,8	Al + nerez
Bo 50	50	3,5	nerez
EC 75	75	1,25	nerez
T600	632	1	nerez

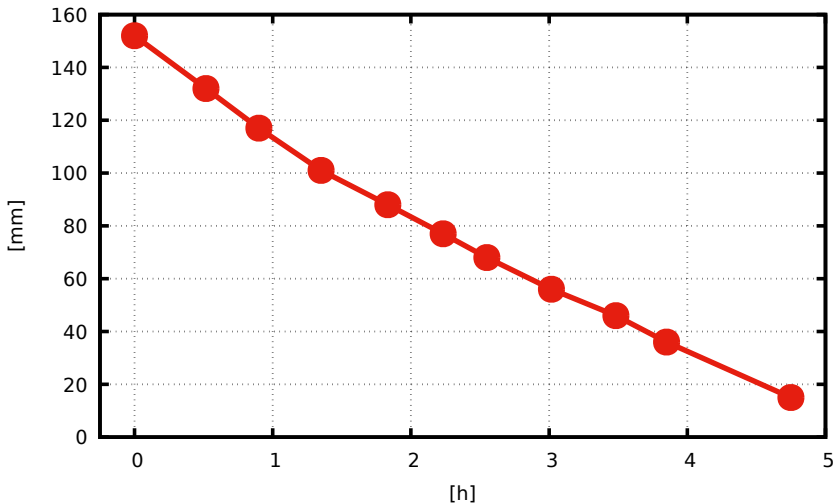
He

Typ	objem [l]	stínění	odpar He [%/den]	materiál
He50	50	LN2	3,5	nerez
STG40	40	LN2	1	nerez
STG100	100	S	1,5	nerez
LHe	500	S	0,75	nerez

S - mnohvrstevná izolace

# Polystyrenový kalíšek - LN<sub>2</sub>, stěna 20 mm, objem 1,5 L

reálné měření, na ose y změna výšky hladiny



## Dewarova nádoba - LN<sub>2</sub>, objem 32 L

reálné měření, starší Dewarova nádoba,  
odpar už je dost velký asi 0,57 kg/den

