

A large, jagged iceberg floats in the middle of a dark blue ocean. The sky is filled with heavy, grey clouds, suggesting a storm or late afternoon. In the foreground, a smaller, more rectangular iceberg floats on the water's surface. The overall scene is dramatic and cold.

Tehnologii criogenice

Producerea temperaturilor joase

- Refrigeratoare criogenice recuperative.

Joule-Thomson. Brayton. Claude.

Refrigeratoare criogenice regenerative.

Stirling. Gifford-McMahon. Tub pulsator.

Tehnici de răcire

- 4 metode pentru răcirea unui fluid:

1. Efectuarea de lucru mecanic intern (împotriva forțelor intermoleculare)- destinderea pe o supapă-efect Joule-Thomson (izentalpică)
2. Efectuarea de lucru mecanic extern-pe un piston sau pe o turbină (-destindere izentropică)
3. Răcirea cu un alt fluid prin intermediul unui schimbător de căldură
4. Reducerea presiunii și în consecință a temperaturii unui fluid saturat.

„refrigerator criogenic” („*cryocooler*”, *criogenerator*) → refrigeratoare de gabarit redus sau mediu, capabil de a atinge temperaturi situate sub 120 K și cu puteri frigorifice cuprinse între 0,1 W și câteva sute de W, la un nivel de temperatură specificat.

pot fi utilizate în instalațiile de lichefiere/relichefiere a gazelor, sau în aplicații în care utilizarea gazelor lichefiate nu este posibilă (sau eficientă).

refrigeratoarele miniaturale, utilizate în aplicații militare, cum ar fi vederea pe timp de noapte sau autoghidarea rachetelor (pentru care e necesară răcirea unui detector în infraroșu la temperaturi situate în jur de 80 K).

Aplicația comercială cea mai extinsă a *refrigeratoarelor criogenice* este răcirea *criopompelor* utilizate în industria semiconductorilor pentru obținerea unui vid suficient de curat și de înalt pentru producerea circuitelor integrate pe scară foarte largă.

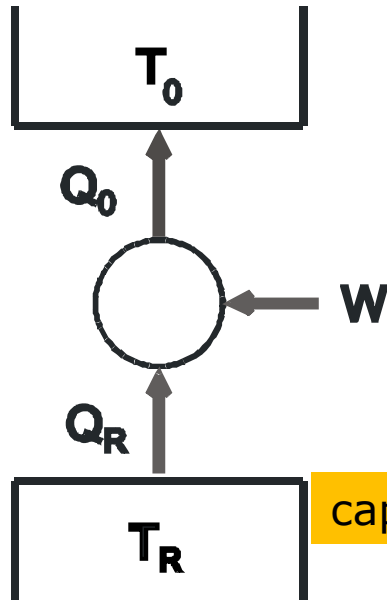
din anul 2000 au început să se producă, în serie, criostate cu magneți supraconductori care nu mai sunt răciți cu heliu lichid, ci cu refrigeratoare criogenice („*cryogen free superconducting magnets*”)

Aplicațiile se extind în *medicină* (criochirurgie, crioterapie), în *tehnica spațială*, în *energetică*, în *tehnica de calcul*, în *cercetarea științifică* etc.

fiabilitatea, eficiența, vibrațiile, dimensiunile și greutatea, căldura degajată, interferența electromagnetică, costul.

refrigerator

transferul căldurii, în sens invers celui natural, adică de la rece (T_R) la cald (T_0).



ciclu termodinamic inversat

princ. I

$$Q_0 = Q_R + W$$

princ. II

$$\frac{Q_0}{T_0} \geq \frac{Q_R}{T_R}$$

capacitatea frigorifică- căldura extrasă în unitatea de timp-(Watt).

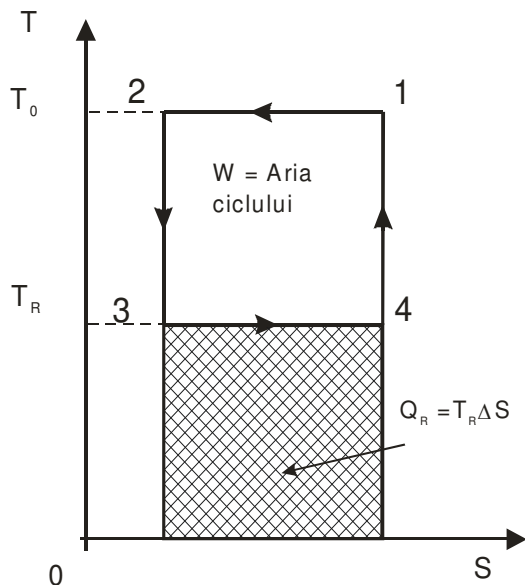
Un refrigerator criogenic care furnizează o capacitate frigorifică de 1 W la 20 K este foarte diferit de unul cu o capacitate frigorifică de 1 W la 80 K.

Coeficientul de performanță (COP) al unui refrigerator se definește ca raportul:

$$COP = \frac{\text{capacitatea frigorifică}}{\text{puterea de alimentare}}$$

(puterea absorbită)

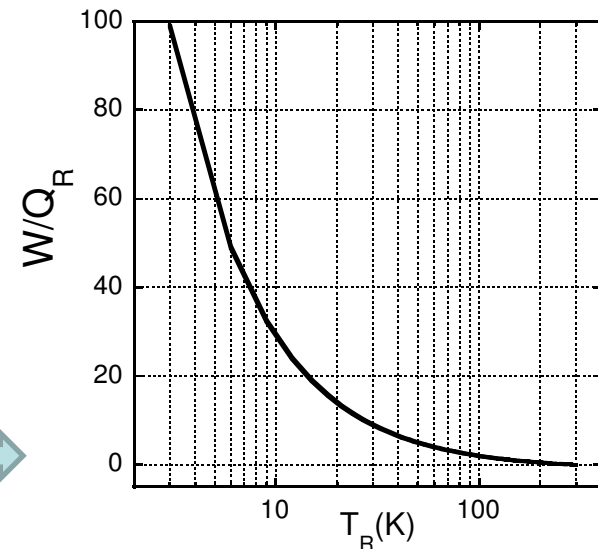
Ciclul termodinamic ideal, cu cea mai ridicată eficiență este ciclul Carnot inversat.



$$\dot{Q}_R = T_R \Delta \dot{S}$$

$$\dot{W} = (T_0 - T_R) \Delta \dot{S}$$

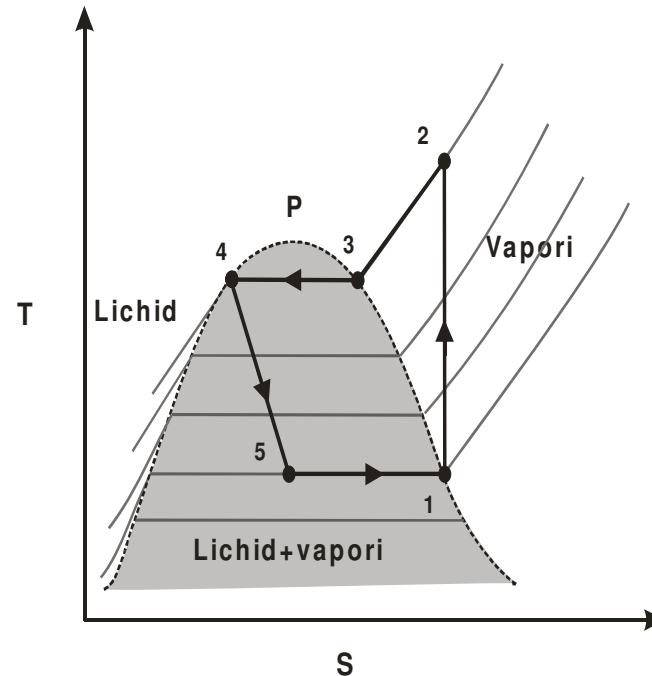
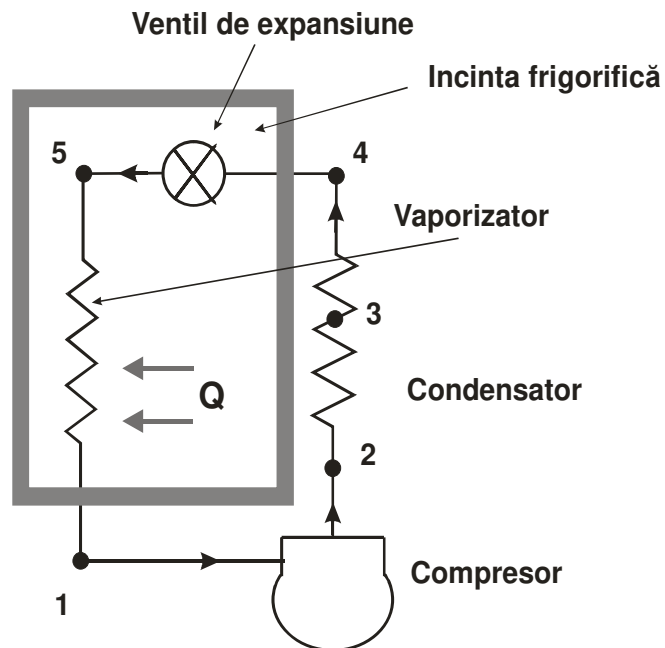
$$COP(Carnot) = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{W}} = \frac{T_R \Delta S}{(T_0 - T_R) \Delta S} = \frac{T_R}{T_0 - T_R}$$



$$\text{eficiența} = \frac{COP \text{ real}}{COP \text{ Carnot}} = \frac{\text{capacitatea frigorifică a refrigeratorului}}{\text{puterea de alimentare}} \times \frac{(T_0 - T_R)}{T_R}$$

- Pentru întreaga gamă de **refrigeratoare criogenice** care se execută în prezent, eficiența acestora este cuprinsă între 1% și aproape 50%.
- Refrigeratoarele miniaturale au eficiențele cele mai reduse, sub 20%, din cauza ireversibilităților crescute în cazul sistemelor de dimensiuni reduse.
- Domeniul 20% - 50% este caracteristic sistemelor mari utilizate în lichefactori.

- ❑ Refrigeratoarele cu compresie de vapori, frigiderele casnice obișnuite, s-au dezvoltat începând din secolul al 19-lea, răspunzând la cea mai mare parte a necesităților de refrigerare ale secolului 20.
- ❑ pot produce temperaturi joase până la 230 K (-43°C), cu un agent frigorific (refrigerant) corespunzător.
- ❑ Au eficiențe frigorifice mult mai mari decât refrigeratoarele criogenice
- ❑ Refrigerantul → de exemplu: freon CFC, hidrocarburi, dioxid de sulf, amoniac, dioxid de carbon etc.)



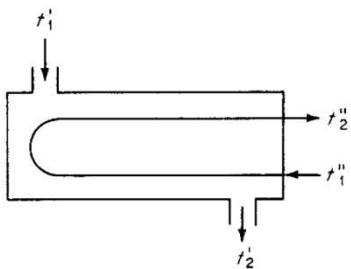
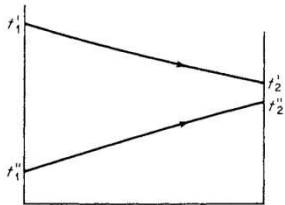
Schema principiului de funcționare a unui refrigerator clasic cu compresie de vapori.

Refrigeratoare criogenice recuperative

- utilizează schimbătoare de căldură recuperative-flux constant de refrigerant
- se recuperează entalpia de la un curent de fluid la celălalt

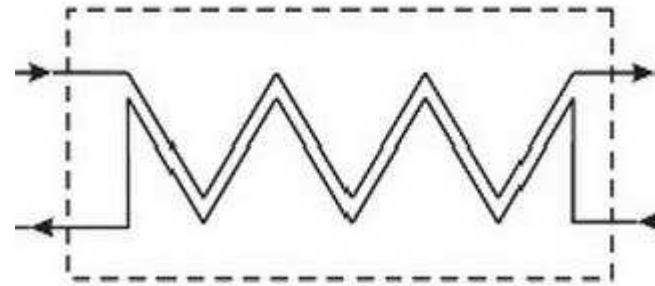
schimbătoare de căldură (SCH):

- contracurent
- echicurent
- curenți încrucișați

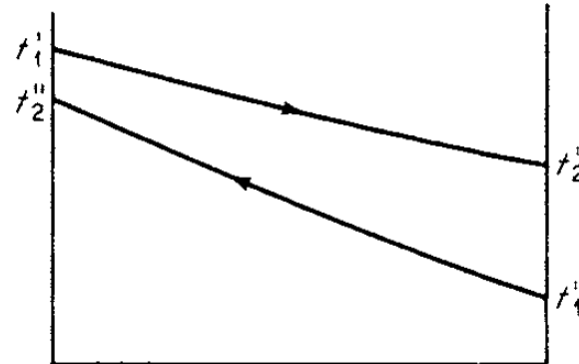


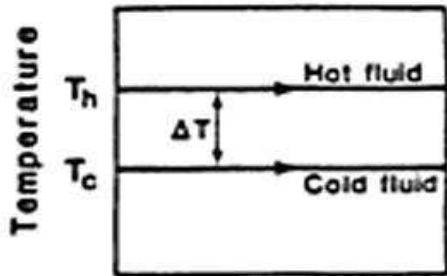
SCH în contracurent au
eficiența mai ridicată

cald

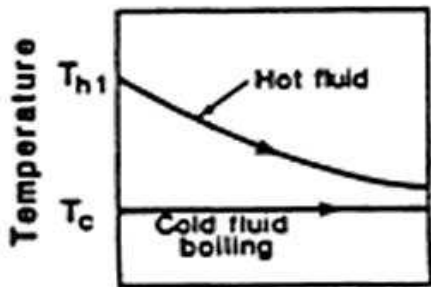


rece



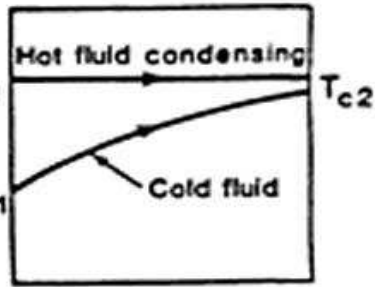


(a) Area

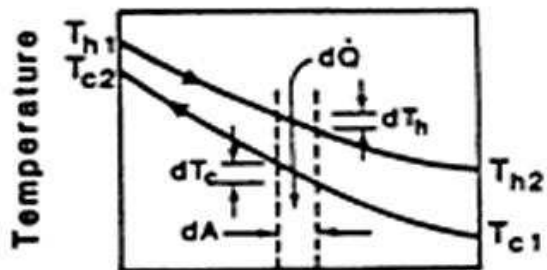


Area

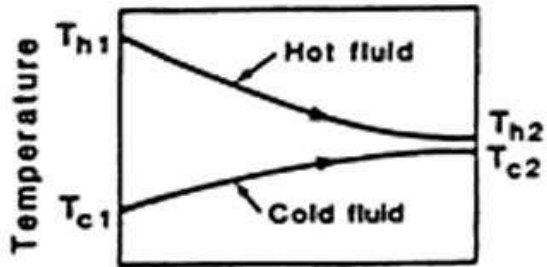
(b)



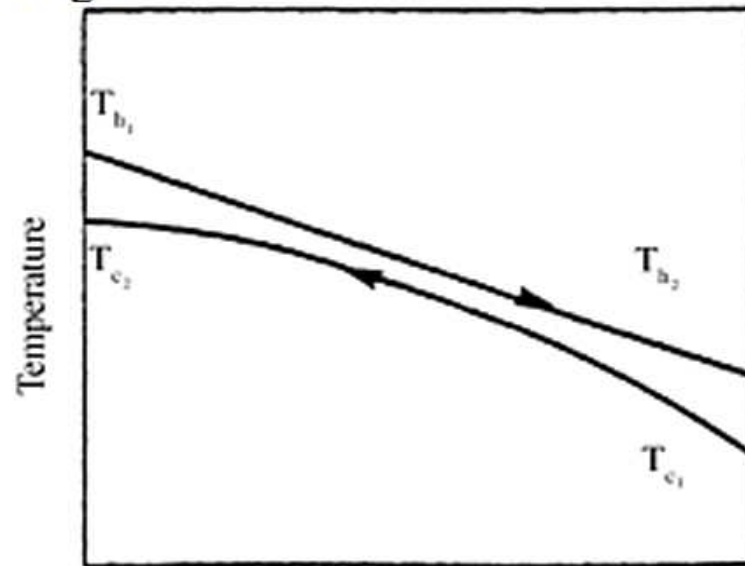
Area



(c) Area



(d)

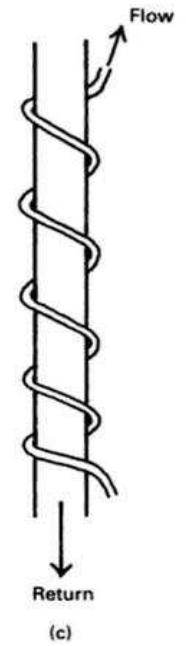
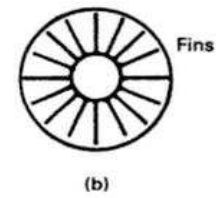
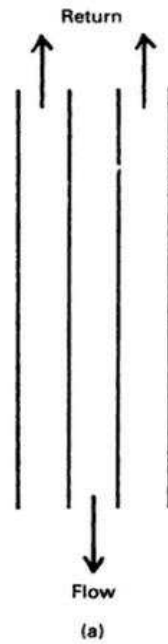
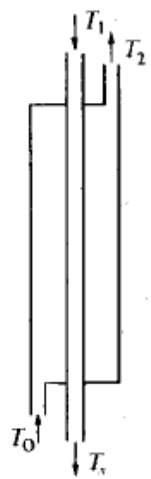


Length of exchanger

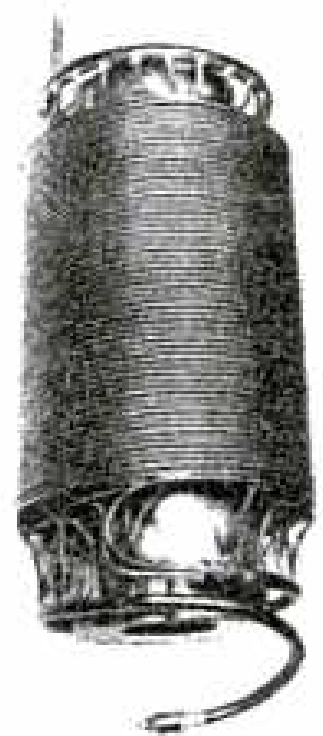
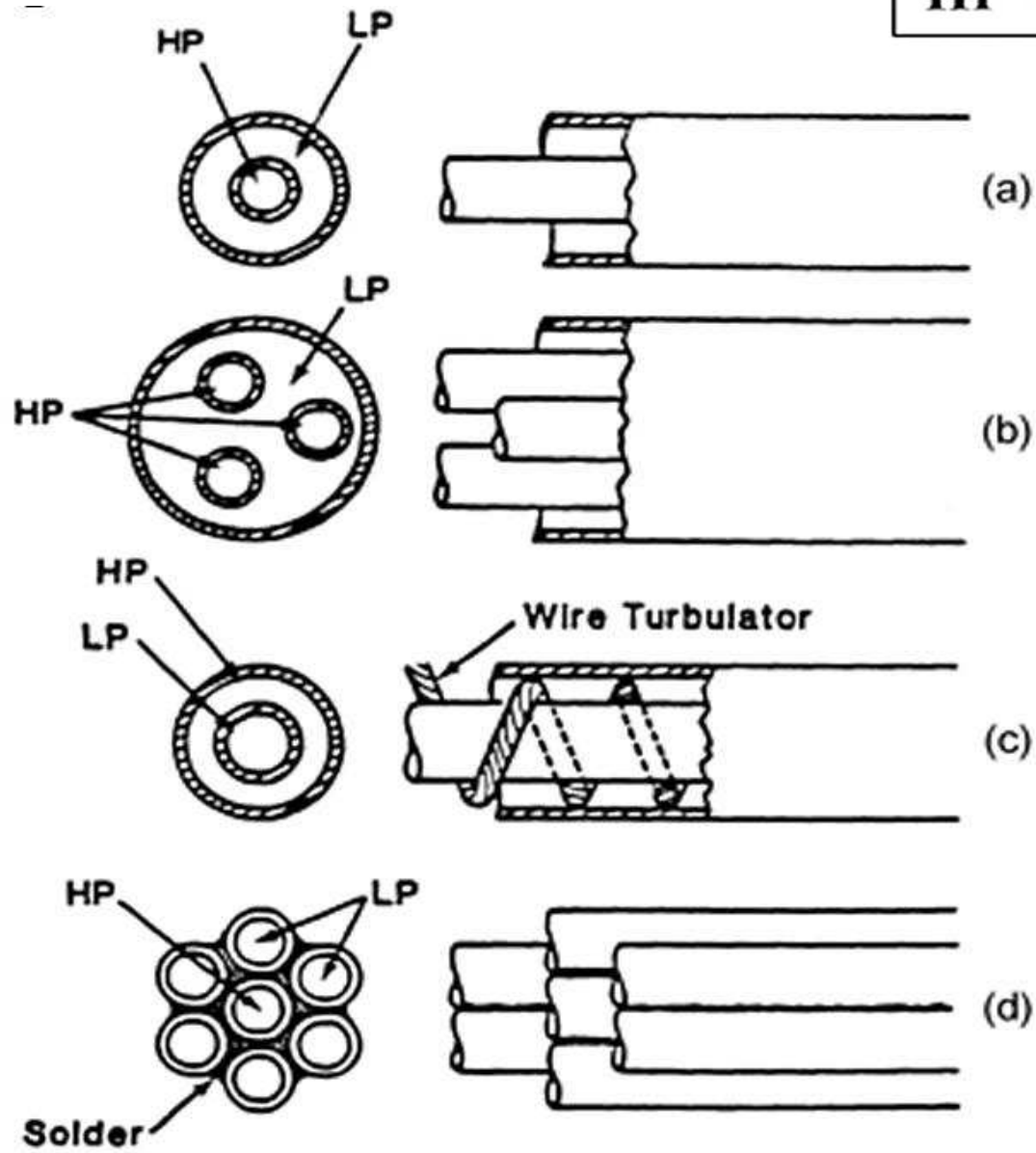
Th. Flynn,
*Cryogenic
Engineering*

SCH
contracurent

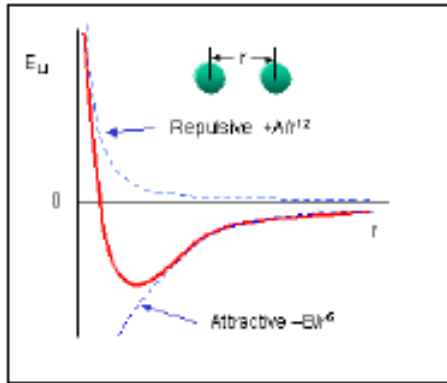
- Both fluids changed phase (a)
 - Constant temperature when hot fluid is condensed at T_h and cold fluid is evaporated at T_c
- One fluid changes phase (b)
- Heat transferred without phase change
 - Counterflow (c)–fluids flow in opposite directions
 - Parallel flow (d)–fluids flowing in same direction
- Major advantage if counterflow exchanger
 - Outlet temperature of cold fluid can be greater than outlet temperature of hot fluid



LP - Low Pressure
HP - High Pressure

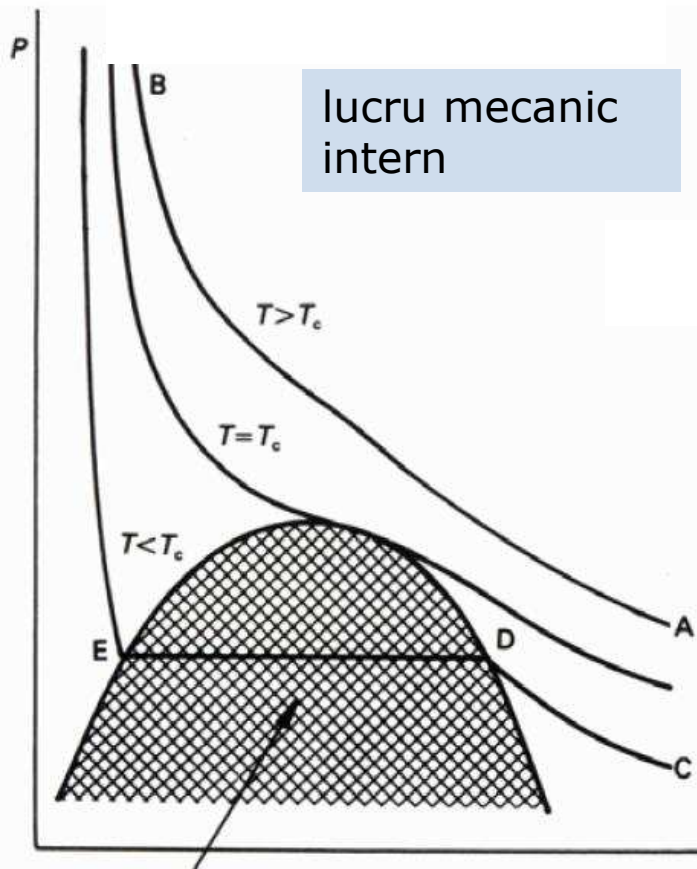
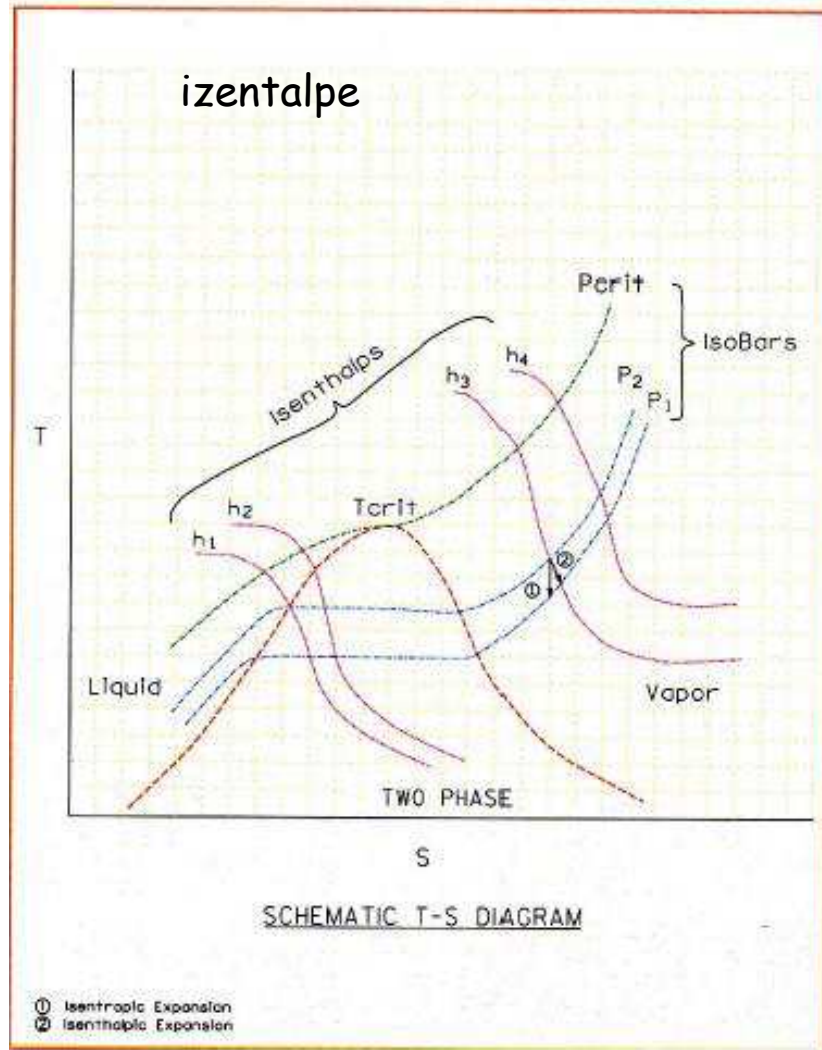


Flynn



Efectul Joule-Thomson

proces la entalpie constanta



$$P_i, T_i$$



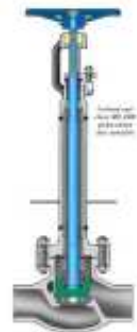
$$P_f$$

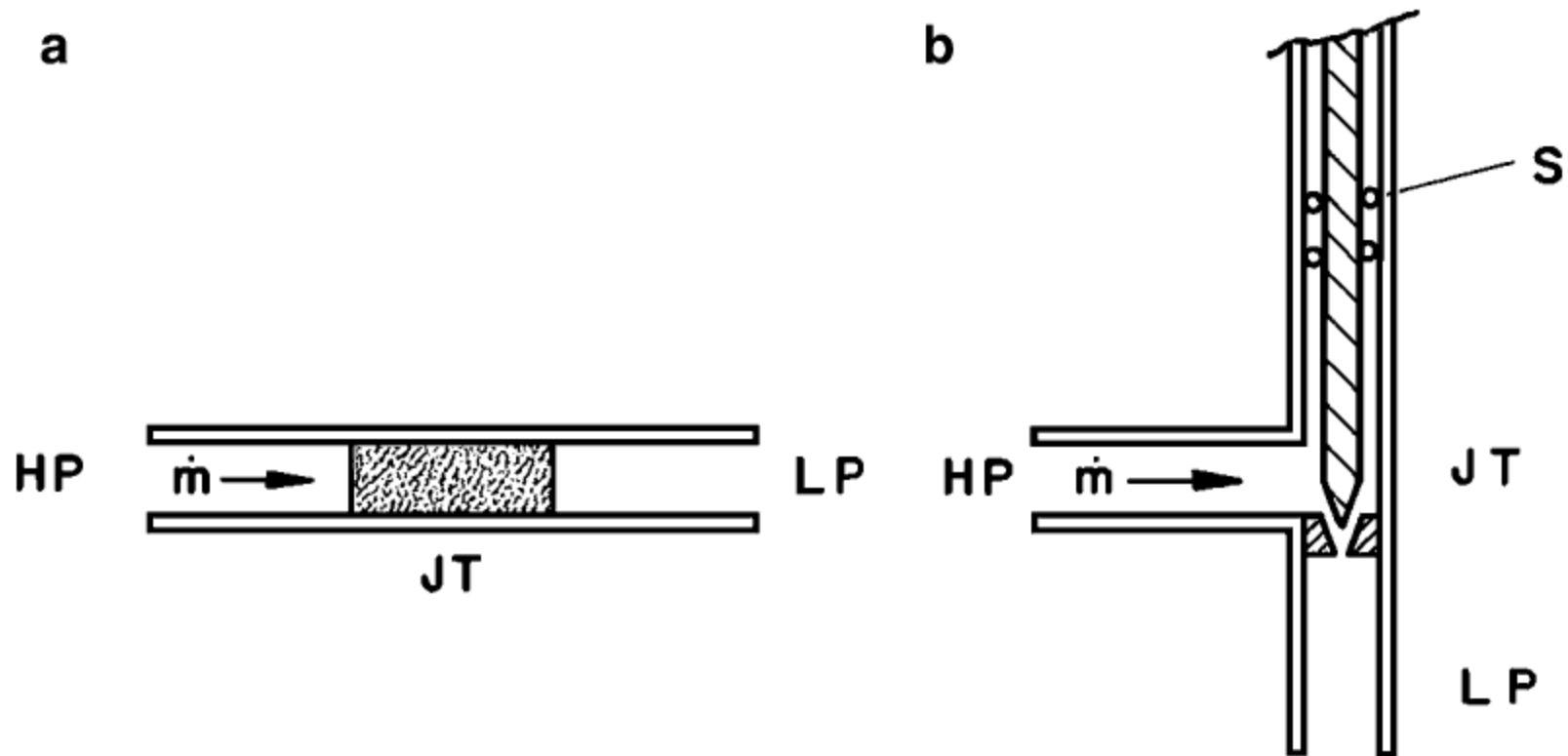
$$P_f < P_i$$

$$h = \text{const}$$



$$\Delta T \neq 0$$





Două tipuri de ventile Joule-Thomson: (a) dop poros și (b) supapă cu ac, controlabilă (needle valve lb. engl.)

S. W. van Sciver,
Helium Cryogenics

Pentru un *gaz ideal*, energia internă depinde numai de temperatură, și pentru un kilomol de gaz $PV = RT$, atunci entalpia:

$$H = U(T) + PV = U(T) + RT$$

în cazul destinderii unui *gaz ideal* nu apare nici o schimbare a temperaturii

Pentru un *gaz real*, descris de eg. , de ecuația de stare Van der Waals apare însă o schimbare a temperaturii în urma destinderii.

Coeficientul Joule-Thomson:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT$$

van der Waals

pozitiv sau *negativ* funcție de tipul forțelor (de atracție sau de respingere) intermoleculare.

Un efect Joule-Thomson *pozitiv* va însemna *răcire* gazului prin destindere, iar unul *negativ* va conduce la *încălzire*.

coeficientul Joule-Thomson

$$dG = -SdT + VdP$$



$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

derivata mixta de ordinul doi

$$\mu_h = \left(\frac{dT}{dp}\right)_h = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p}$$

$$\Delta H = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \Delta T + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \Delta P = 0;$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H = \frac{T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - V}{C_P}$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P = C_P$$

gaz ideal

$$PV = RT$$

$$T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = V, \text{ i.e. } \left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H = 0$$

van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_H = \frac{2a}{RT} - b$$

temperatura de inversie

$$T_i = 2a/Rb$$

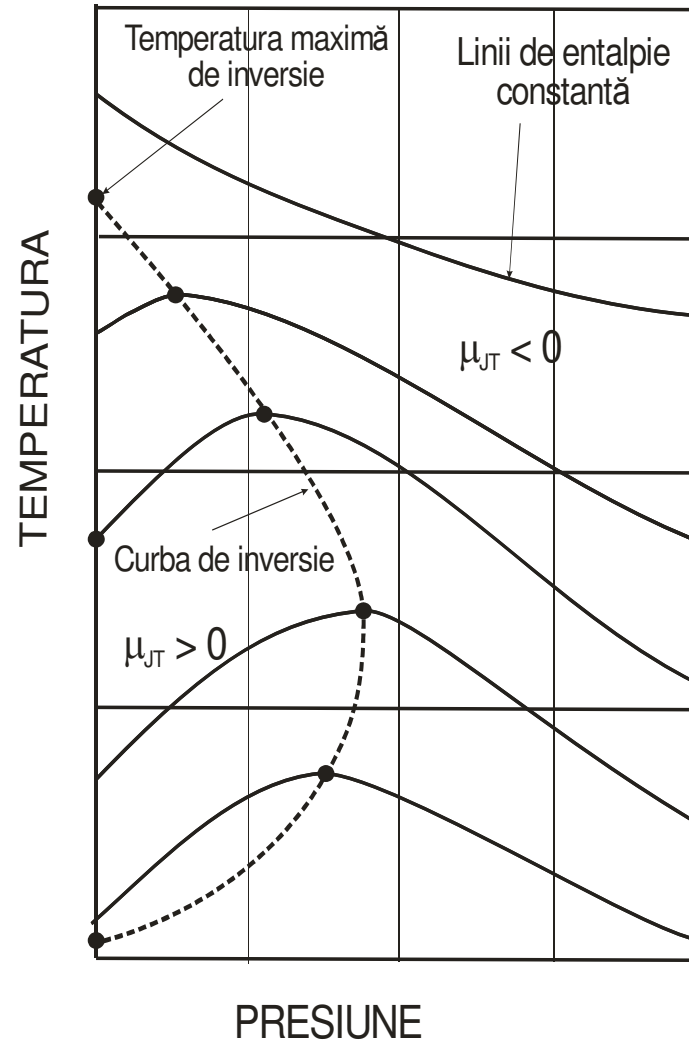
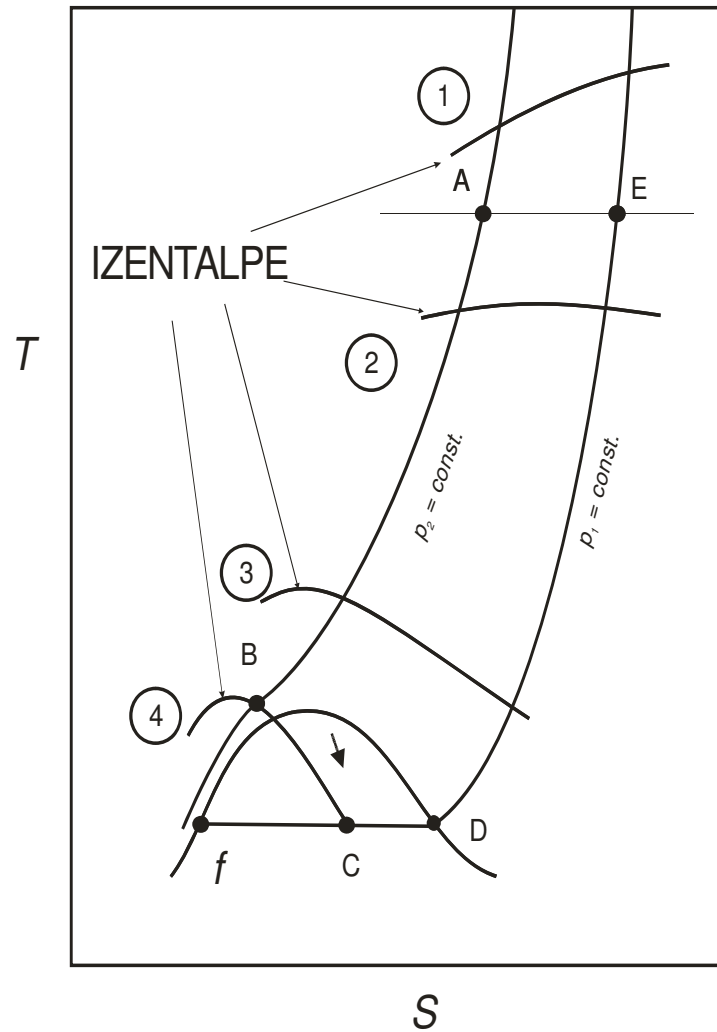
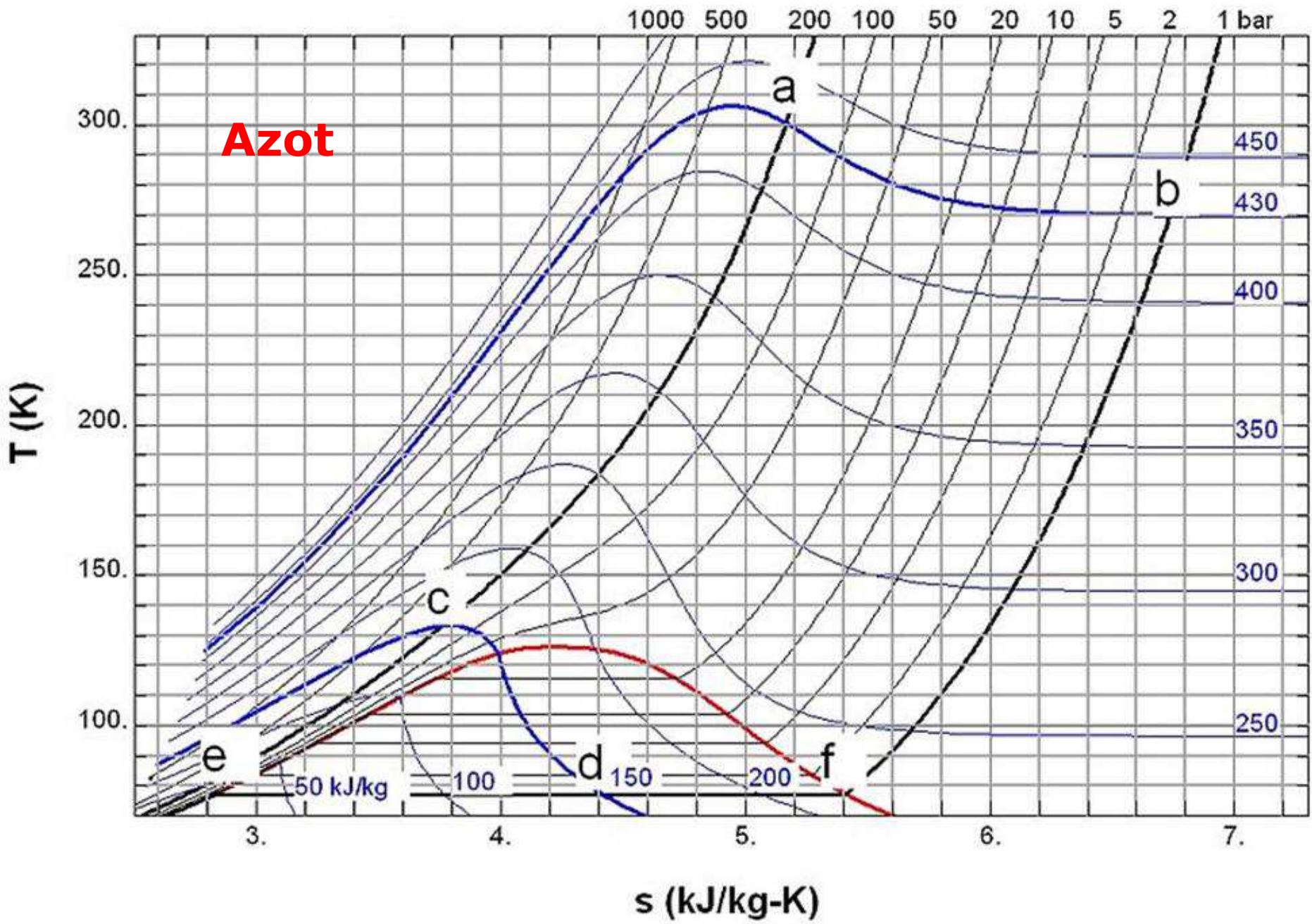
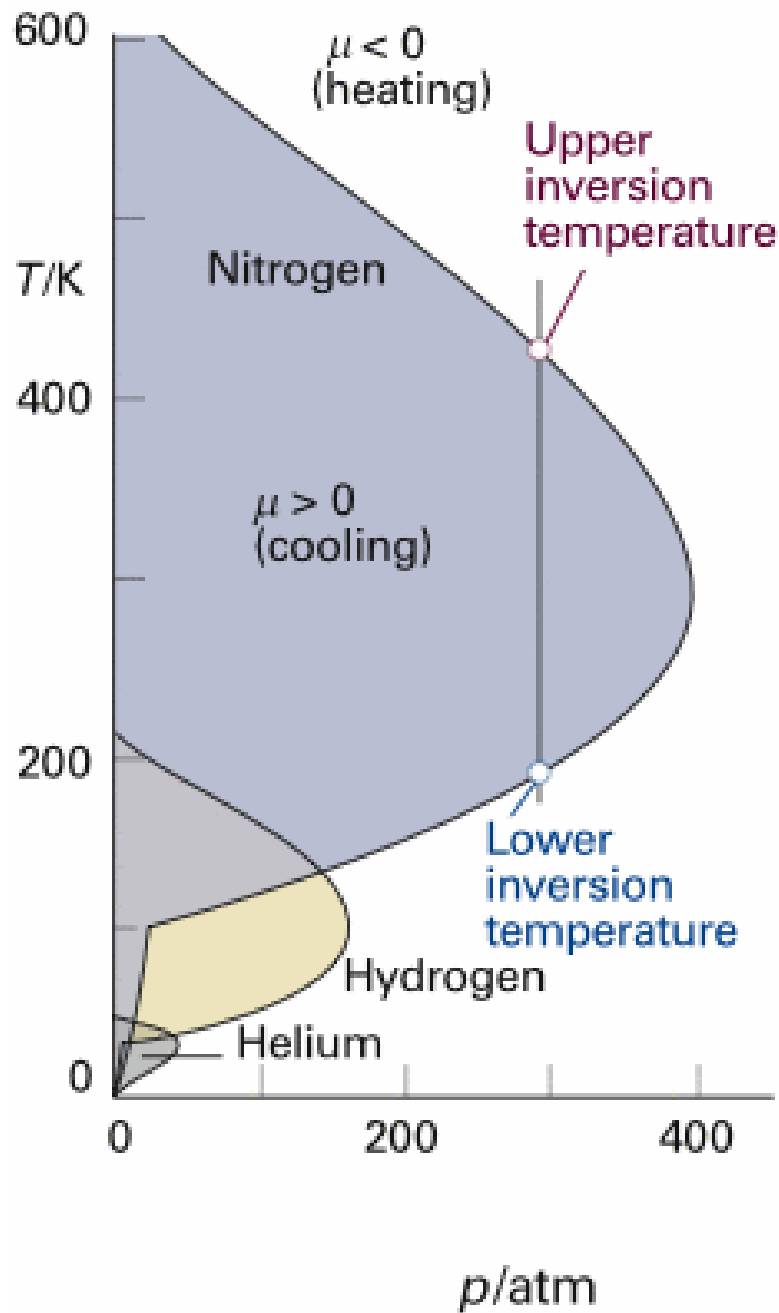


Diagrama $T - S$ pentru un gaz real (a) și curba de inversiune (b).

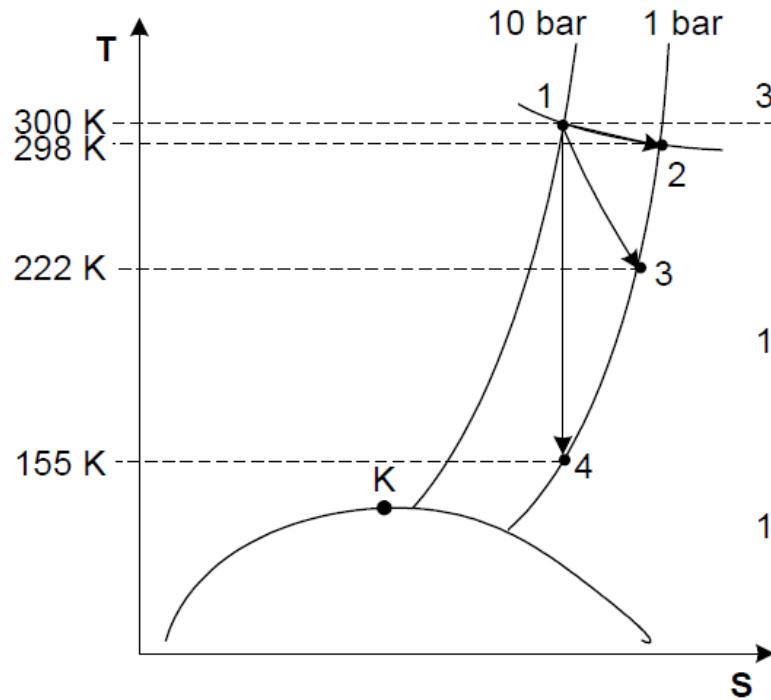
Azot



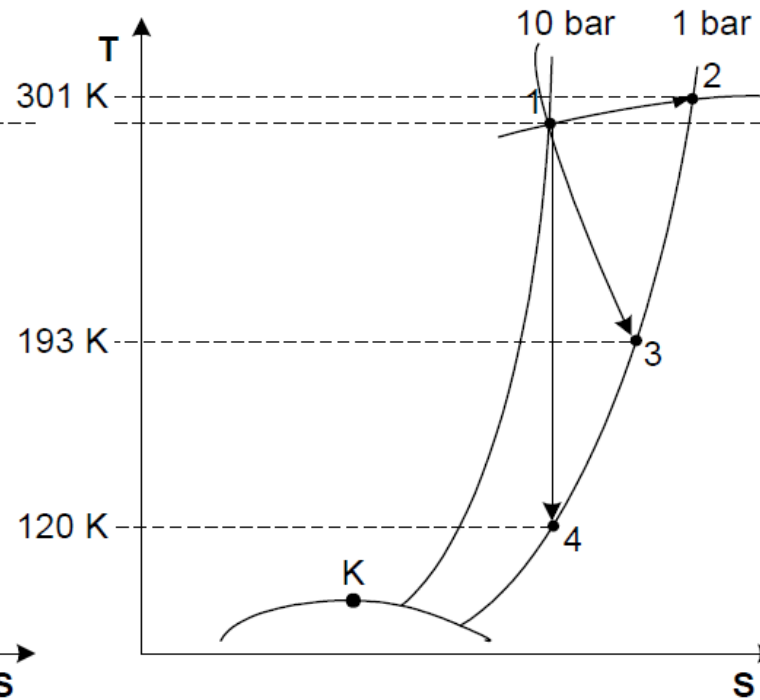


Gazul	Temperatura maximă de inversie (K)
oxigen	761
argon	794
azot	621
aer	603
neon	250
hidrogen	205
heliu	45

Nitrogen



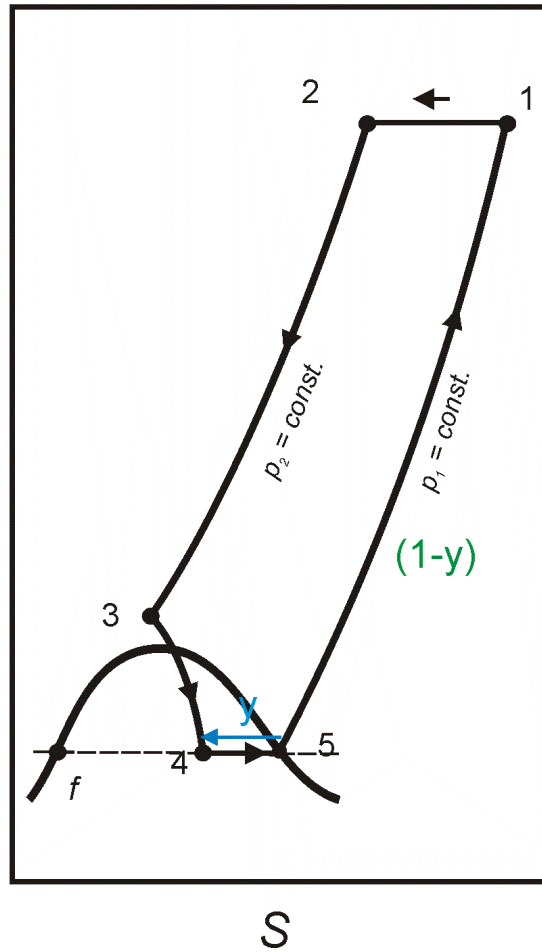
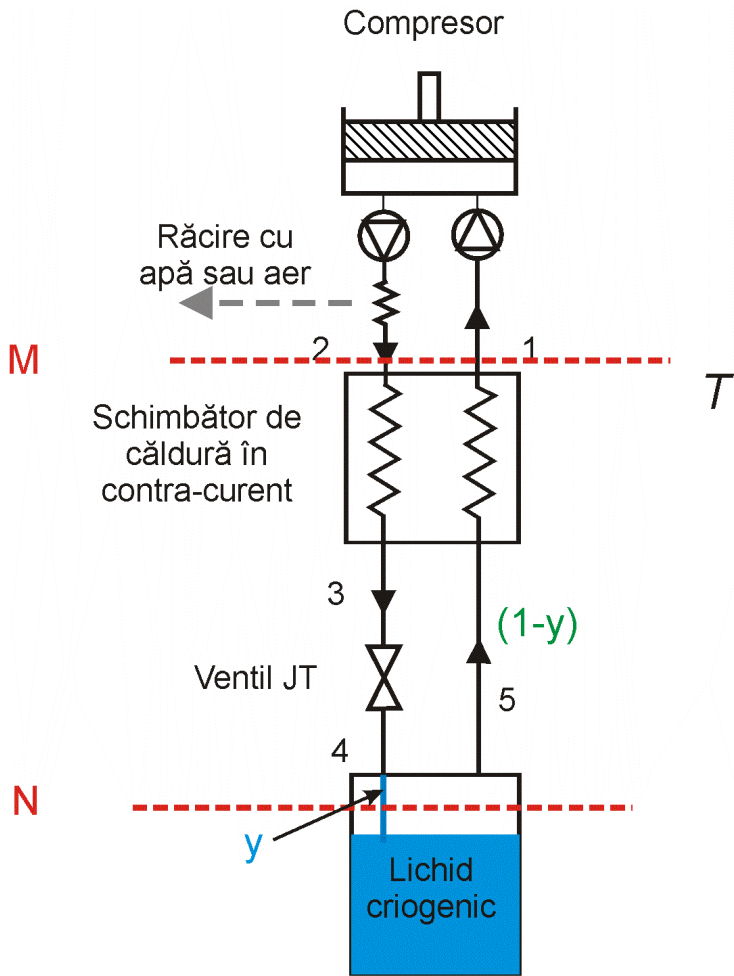
Helium



1-4 – destindere izentropică

1 – 3 – destindere reală

1 – 2 - destindere
Joule-Thomson
(laminare)



M-N

$$H_2 - (1 - y)H_1 = yH_f$$

$$y = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_f}$$

căldura necesară pt a lichefia y:

$$Q_{ref} = y(H_1 - H_f) \Rightarrow Q_{ref} = (H_1 - H_2)$$



$$H_2 - H_3 = (1 - \gamma)(H_1 - h_5)$$

laminarea este izentalpica

$$H_3 = \gamma H_f + (1 - \gamma)H_5$$

$$\gamma = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_f}$$

pt. comprimarea izotermă

$$\Delta H = Q - W$$

$$-W = -Q + \Delta H = T_1(S_1 - S_2) + (H_1 - H_2)$$

$$COP = \frac{Q_{ref}}{W} = \frac{H_1 - H_2}{T_1(S_1 - S_2) - H_1 - H_2}$$

The art of cryogenics

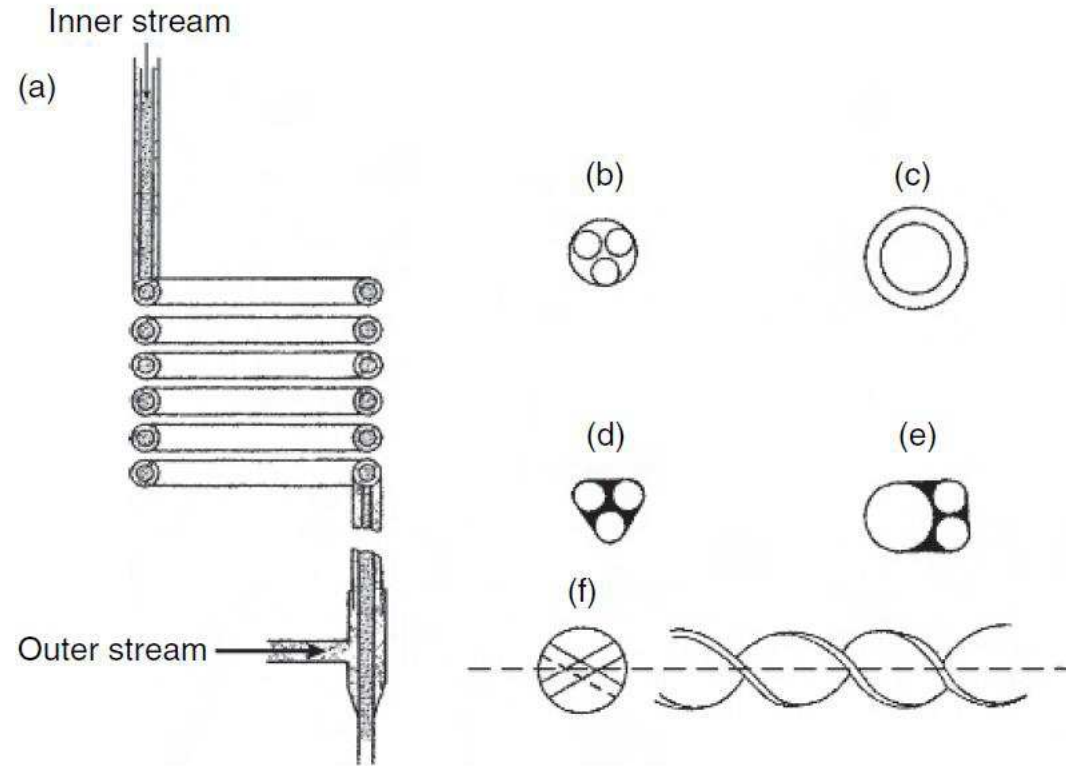
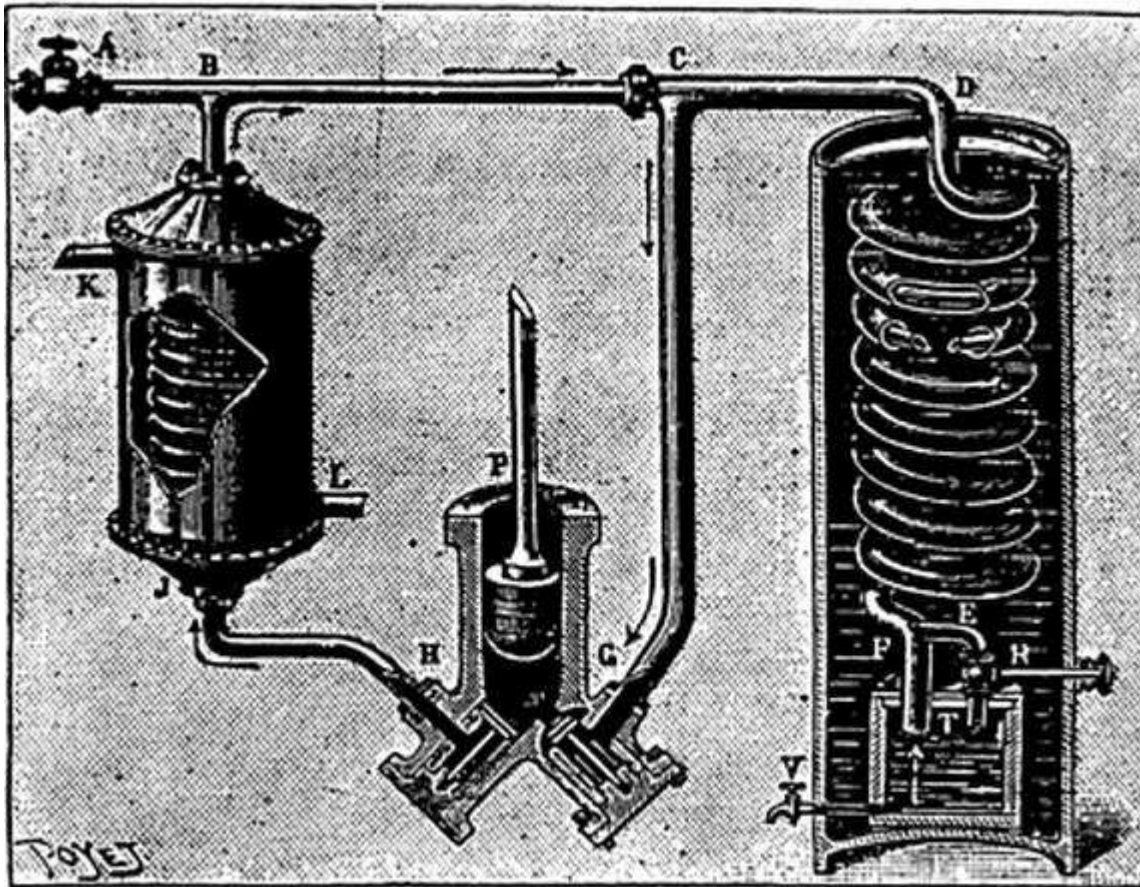
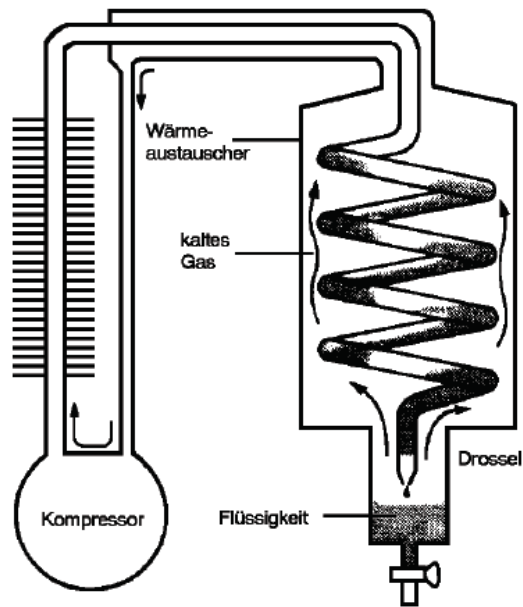


Fig. 5.12. Examples of Linde pattern heat exchangers.

- Efectul Joule-Thomson a fost utilizat pentru prima dată la lichefierea aerului în 1895, aproape simultan și independent de către *von Linde* și *Hampson*.
- gazul este adus, prin destindere JT, sub curba de saturație, unde o parte se află sub formă lichidă.





(Source: PTB Braunschweig)

IV.36



Carl von Linde

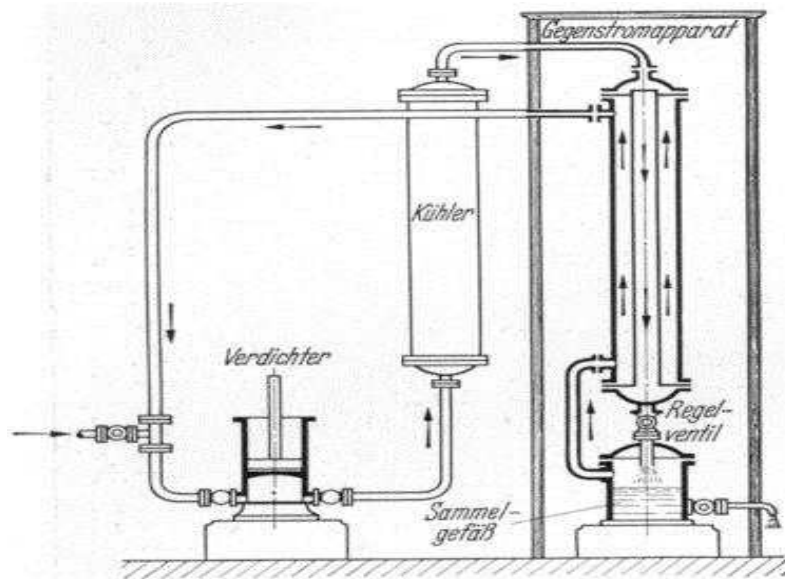


Abb. 70. Schema der ersten Luftverflüssigungsmaschine von LINDE.

1. $\Delta T_{J-T} < \Delta T_S$
2. amestec de faze lichid-gaz -fără probleme
3. sub temperatura de inversie
4. Simplu
5. presiuni mari

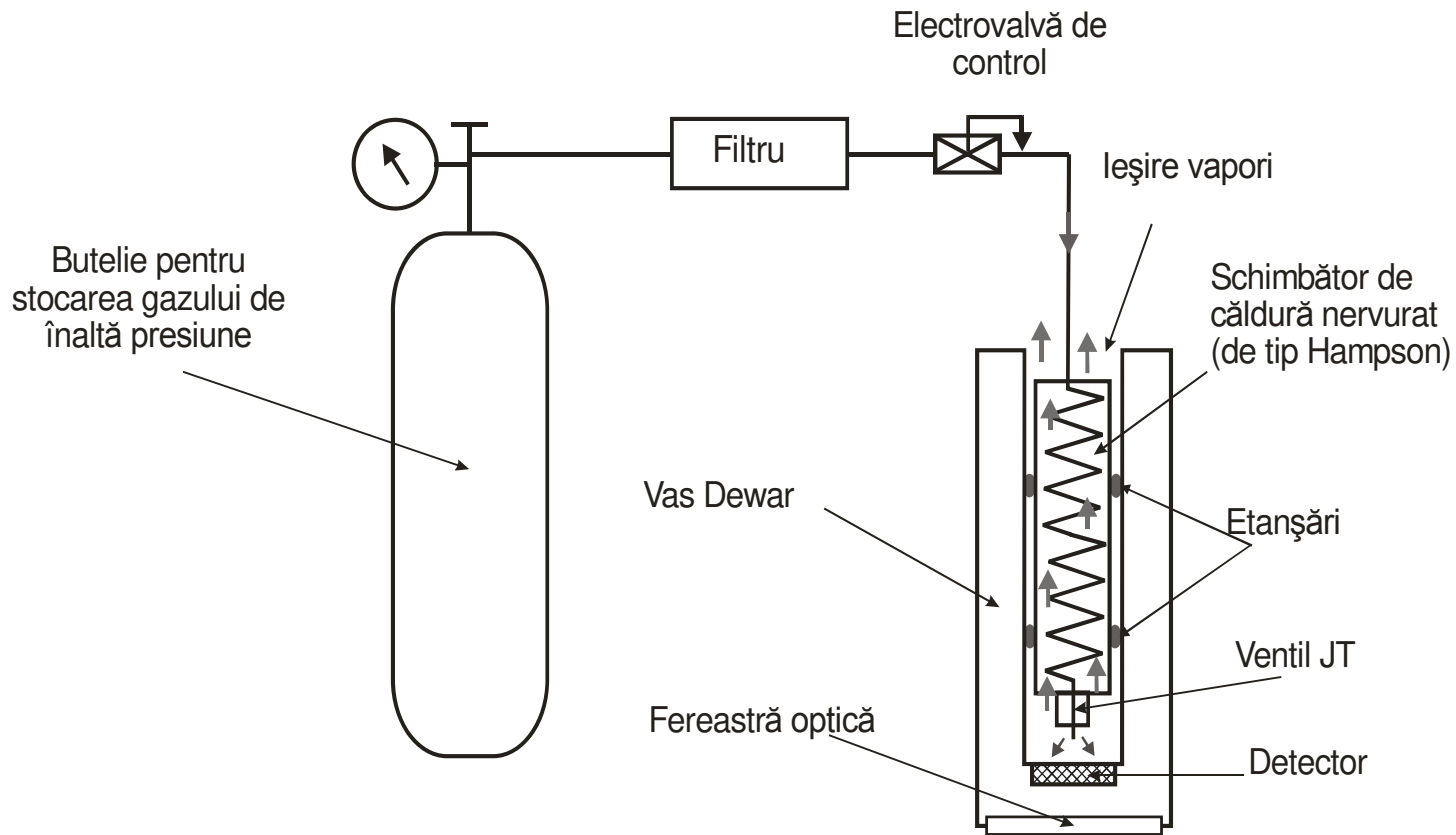
Posibilități extreme de miniaturizare

aplicații militare



răcirea detectorilor în infraroșu

puteri frigorifice reduse: mW – 1 W



Schimbătorul de căldură în contra-curent se realizează din tuburi capilare metalice (aliaj Cu-Ni) cu diametrul exterior mai mic de 0,5 mm și cel interior de circa 0,25 mm. Tuburile capilare sunt nervurate (pentru a crește eficiența schimbului de căldură) și sunt înfășurate în spirală pe un suport. Lungimea tipică a schimbătorului de căldură este în jur de 40 mm și diametrul acestuia este mai mică de 5 mm.

Schimbătorul de căldură se introduce într-un **vas Dewar** la capătul căruia se află senzorul care trebuie răcit.





Fig. 5.18 Typical collection of fast cooldown cryocoolers characterized by short heat exchangers (The Hymatic Co., Redditch, UK)



Fig. 5.19 Rapid cooldown conic cryocooler assembly incorporating a pressure vessel and an initiating pyrotechnic valve (The Hymatic Co., Redditch, UK)

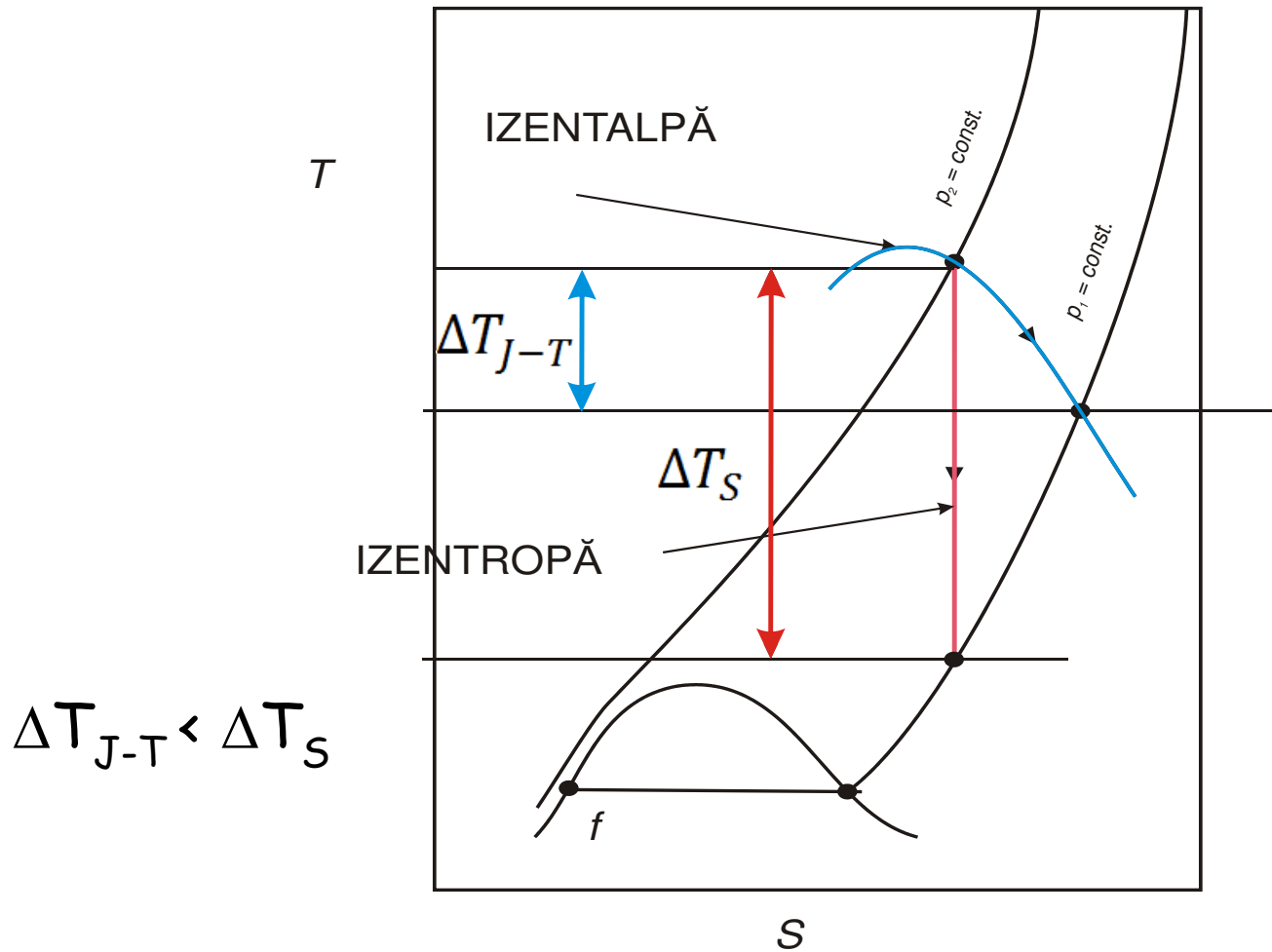
exemple de refrigeratoare JT rapide ale firmei Hymatic Co, UK

Eficiența frigorifică poate fi crescută prin utilizarea unor **amestecuri de gaze**

- alături de azot și componente ca metan, etan și propan, care să facă fluidul să aibă o comportare cât mai „reală” pe un domeniu mai larg de lucru.
- creșterea entropiei de câteva ori, în timp ce temperatura de funcționare poate fi menținută în jur de 77 K, cu o destindere de la o presiune de doar 25 bar.
- ex, un amestec care conține 36 % moli de azot, 20 % moli de metan, 12 % de etilenă, 20 de moli de propan, și 12 % moli de izobutan pot da o putere frigorifică de 1 W la 80 K sau 10 W la 93K la o presiune de 2 MPa generată de un compresor care absoarbe 400 W.

- aplicații și în alte domenii cum ar fi cele medicale în care se urmărește aplicarea locală a unor temperaturi joase, în dermatologie, crio-chirurgie, ginecologie, neurologie etc.
- aplicații în cazurile răcirii și a altor senzori de radiație sau în cazul aplicațiilor spațiale.
- utilizarea destinderii *Joule-Thomson* în **treptele finale de răcire** în cazul lichefierii heliului (și hidrogenului), când gazul supus lichefierii este răcit prin alte procedee la temperaturi situate sub curba de inversiune.

Răcirea prin destindere izentropică



adiabatică

$$Q = T\Delta S = 0$$

→ $\Delta S = 0$

izentropică

$$Q = \Delta U + L$$

$$\mu_s = \left(\frac{dT}{dp} \right)_s = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{c_p} = \frac{T v \beta}{c_p}$$

$$\mu_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

$$Q = 0, \Delta U = -L = v C_v \Delta T$$



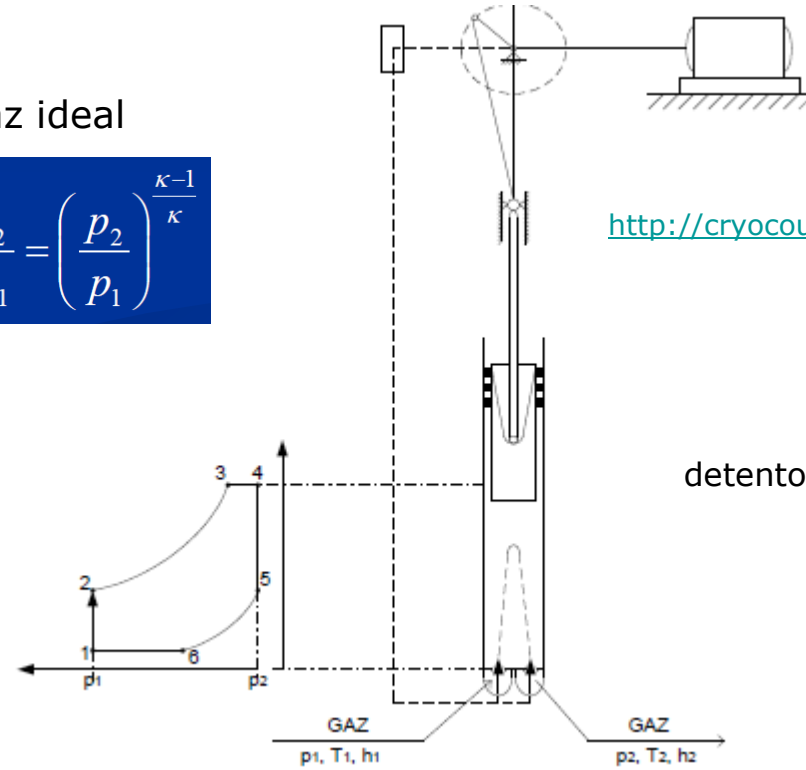
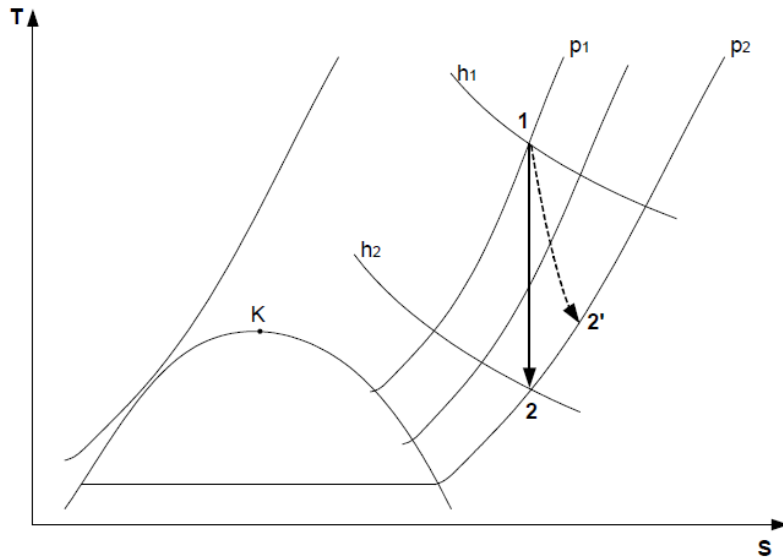
$$\Delta T < 0$$

destinderea adiabatica → răcire

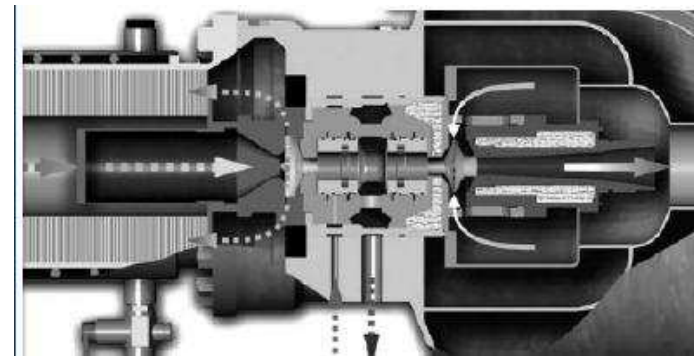
gaz ideal

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

<http://cryocourse.grenoble.cnrs.fr/>



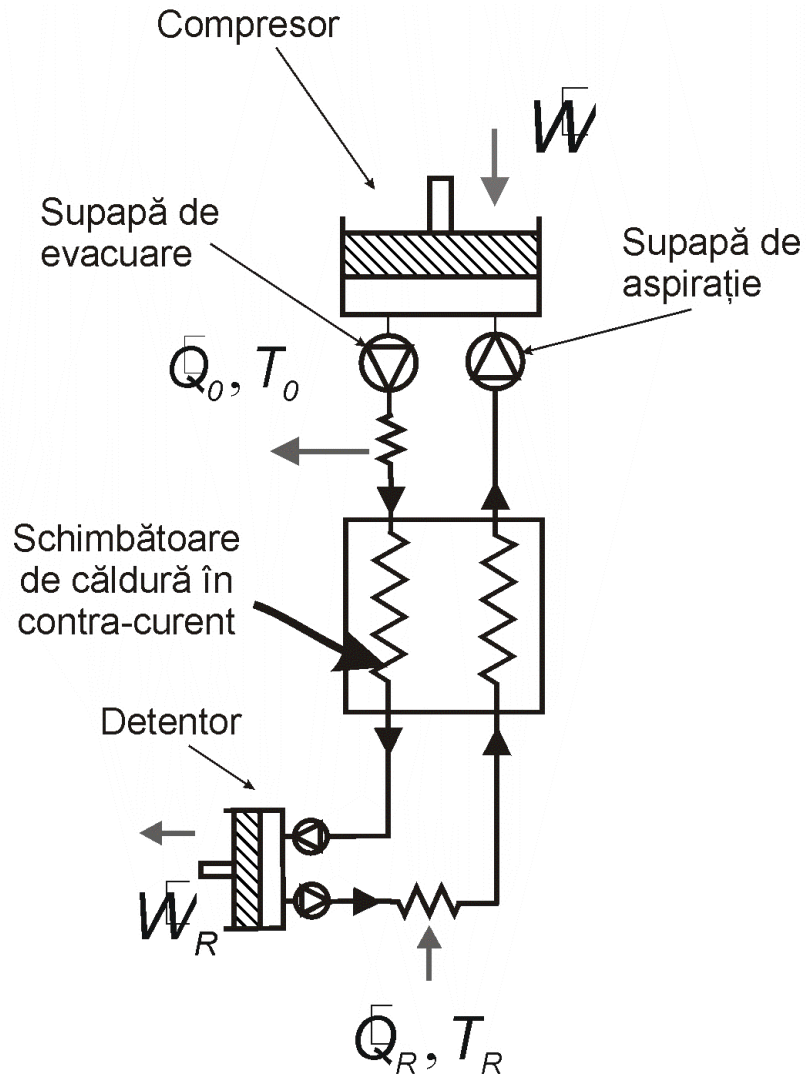
detentor cu piston



turbodetentor



Refrigeratoare criogenice de tip Brayton



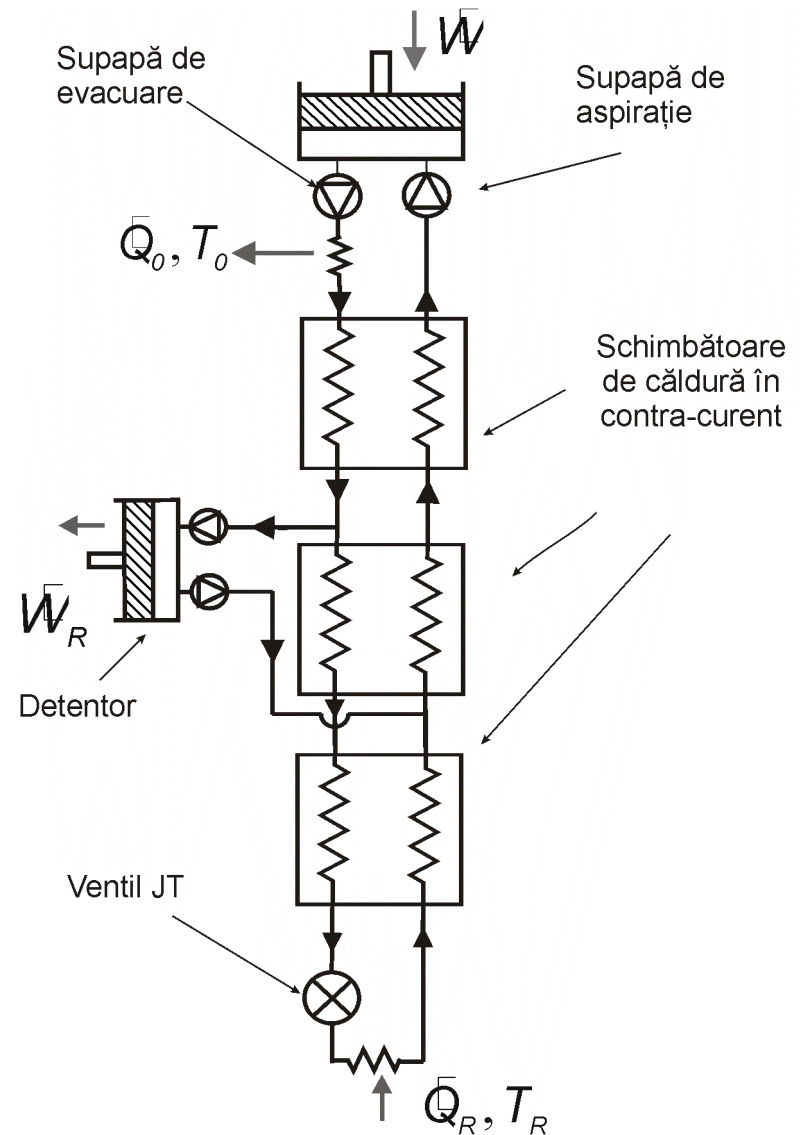
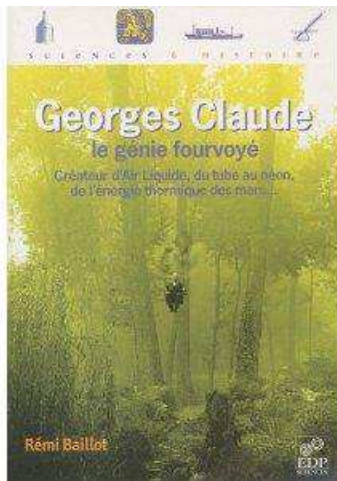
efectul de răcire se obține prin destinderea unui gaz, cu efectuare de lucru mecanic extern

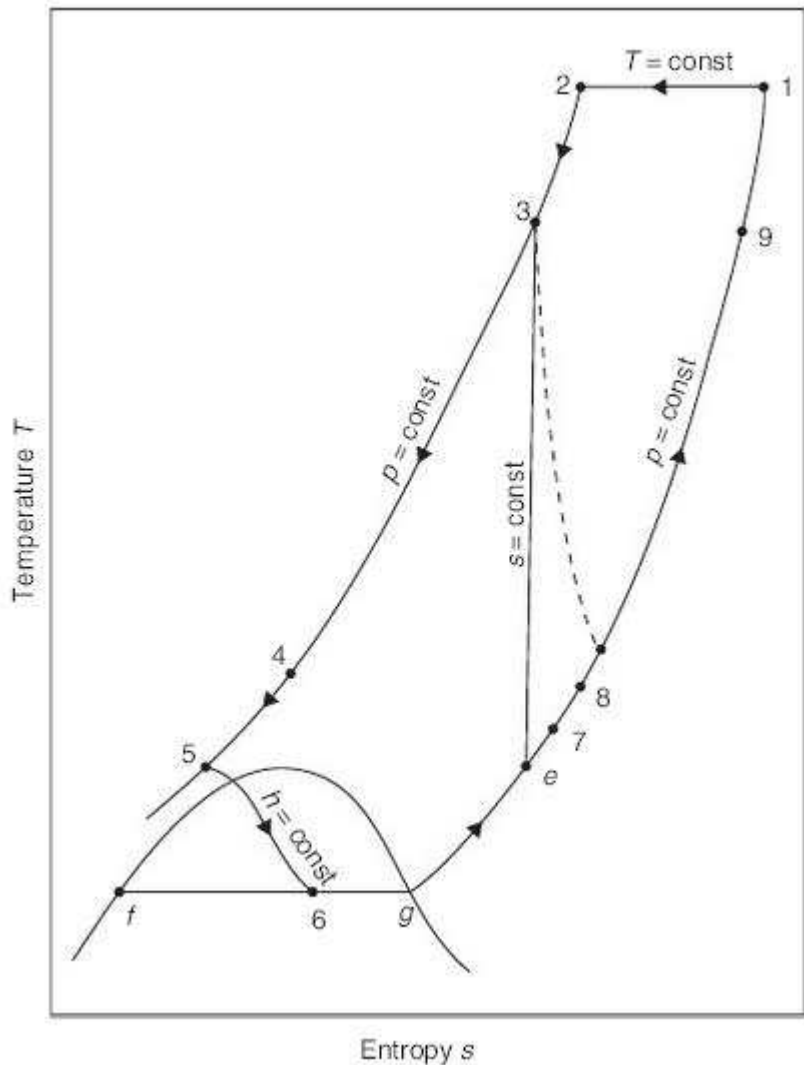
Creșterea eficienței prin înlocuirea destinderii J-T (a laminării) cu un detentor

$$\Delta T_{J-T} < \Delta T_S$$

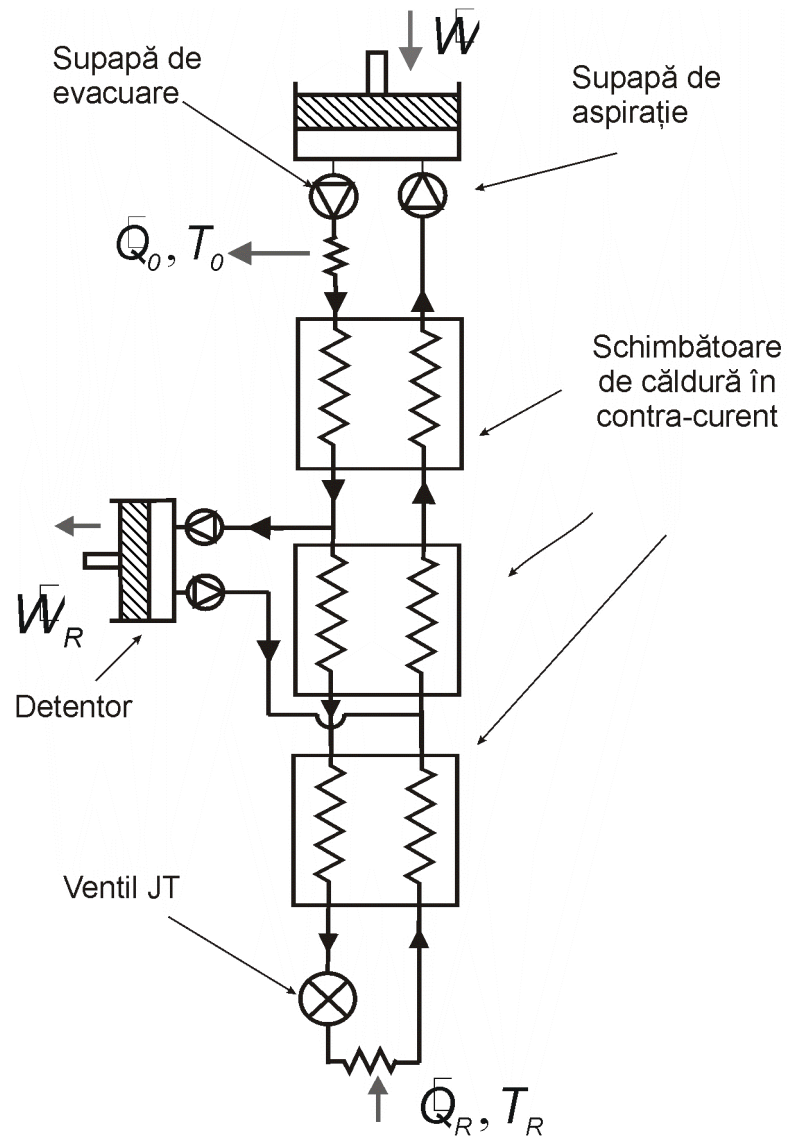
Refrigeratoare criogenice de tip Claude

- combină ciclurile JT și Brayton
- **trei schimbătoare de căldură** recuperative în contra-curent (ex, țeavă-în-țeavă în serpentină).
- o fracțiune din gazul de lucru, este supus unei destinderi izentropice.
- Gazul rece rezultat este trimis în contracurent ca să răcească fracțiunea de gaz rămasă și care este supusă unei destinderi JT.

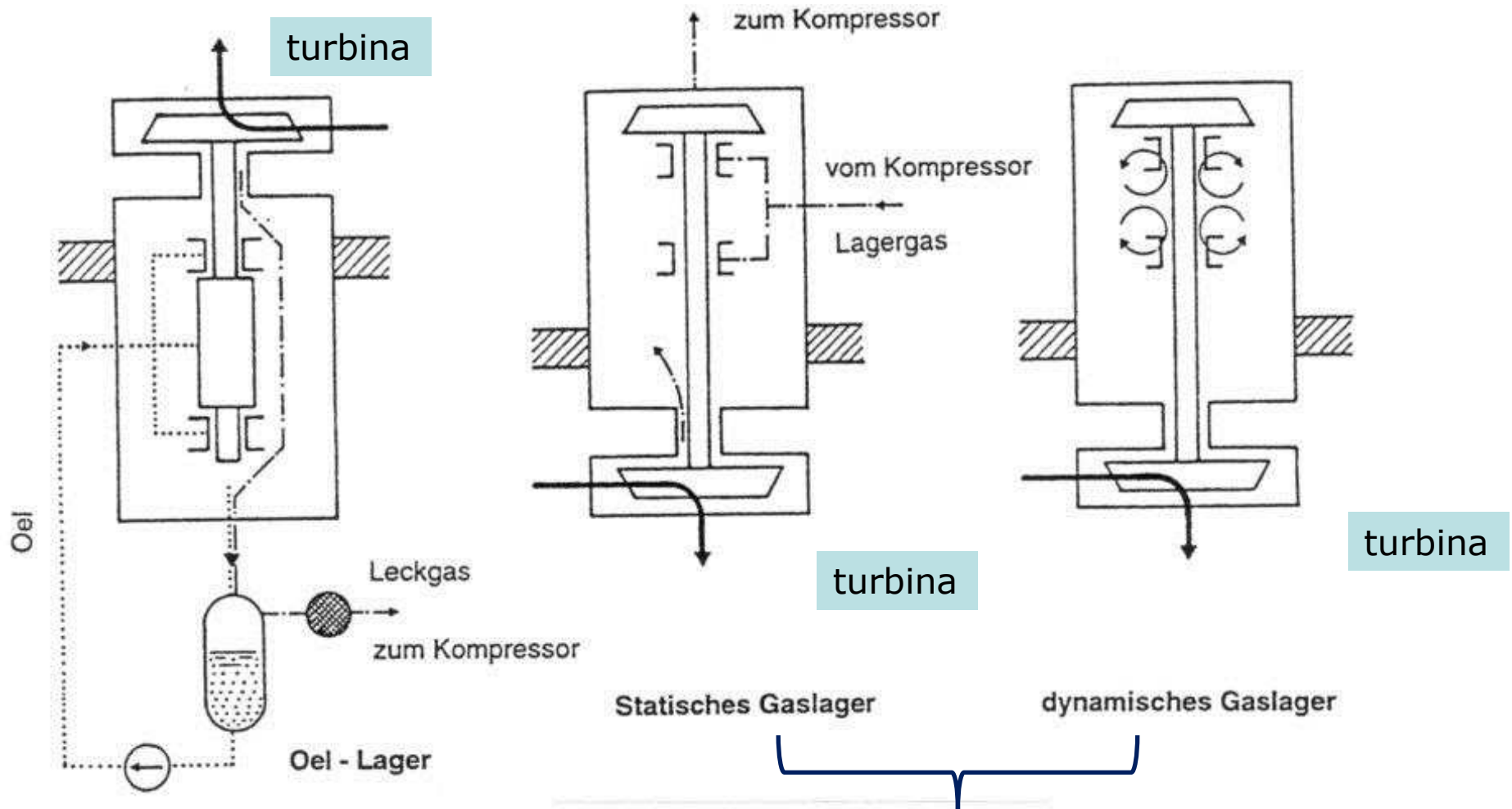




I.G. Deac, Elemente de criogenie



Linde

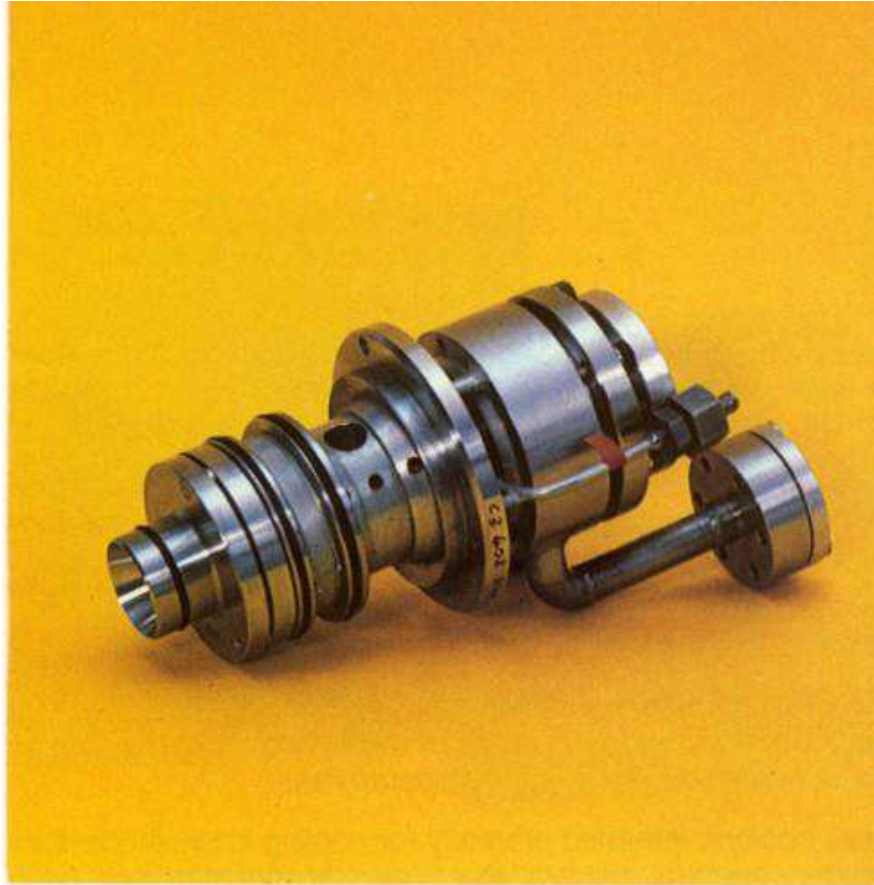


lagăre ungere cu ulei

lagăre cu pernă de gaz

turația ~ 100.000 RPM

Turbine de la Air Liquide, França



Turbine détente cryogénique à paliers gaz.
Gas bearing cryogenic expansion turbine.

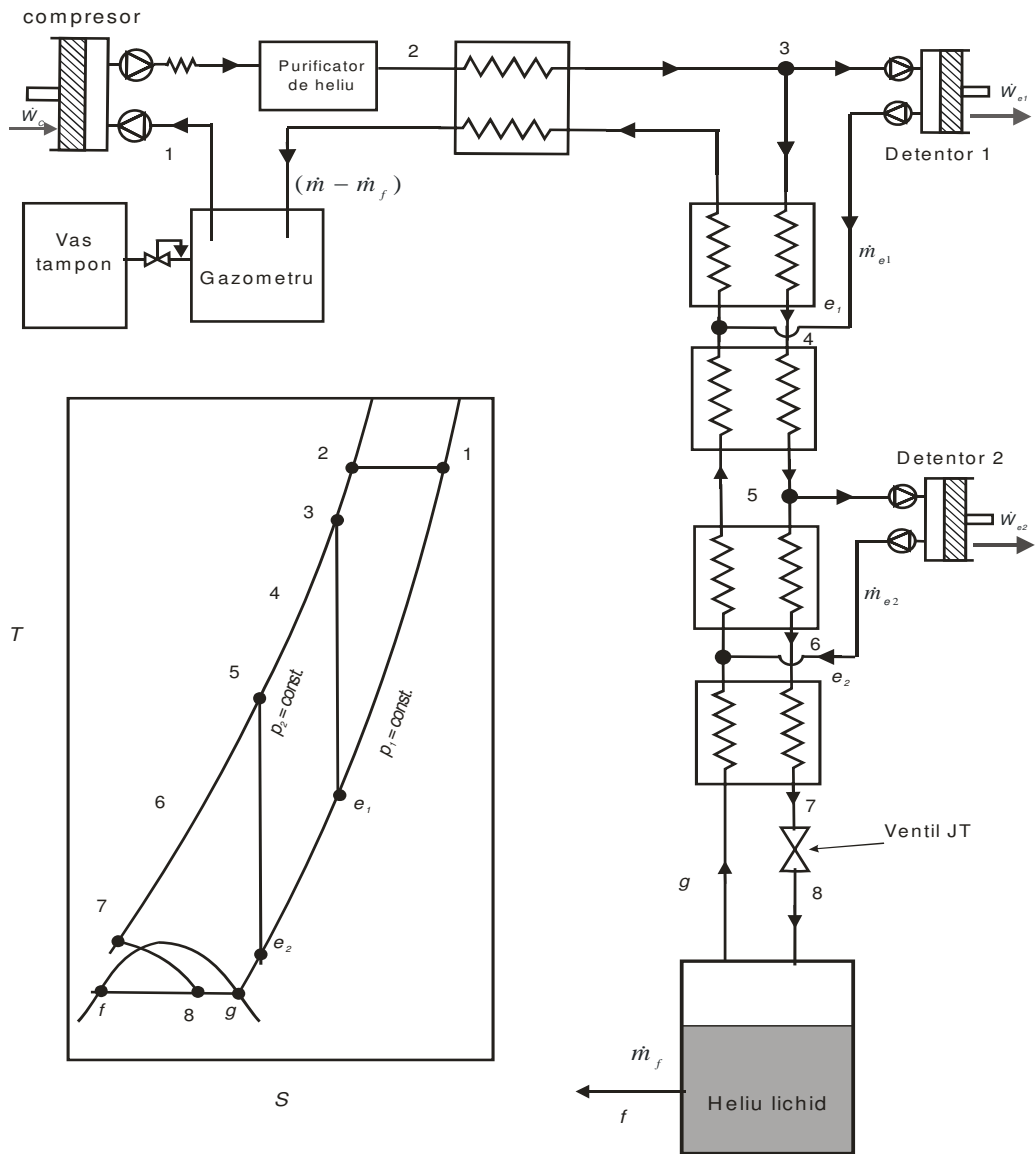


Diagrama și schema de principiu pentru un lichefactor de heliu de tip Collins



Claude-cycle helium refrigerators/liquefiers (Air Liquide & Linde)



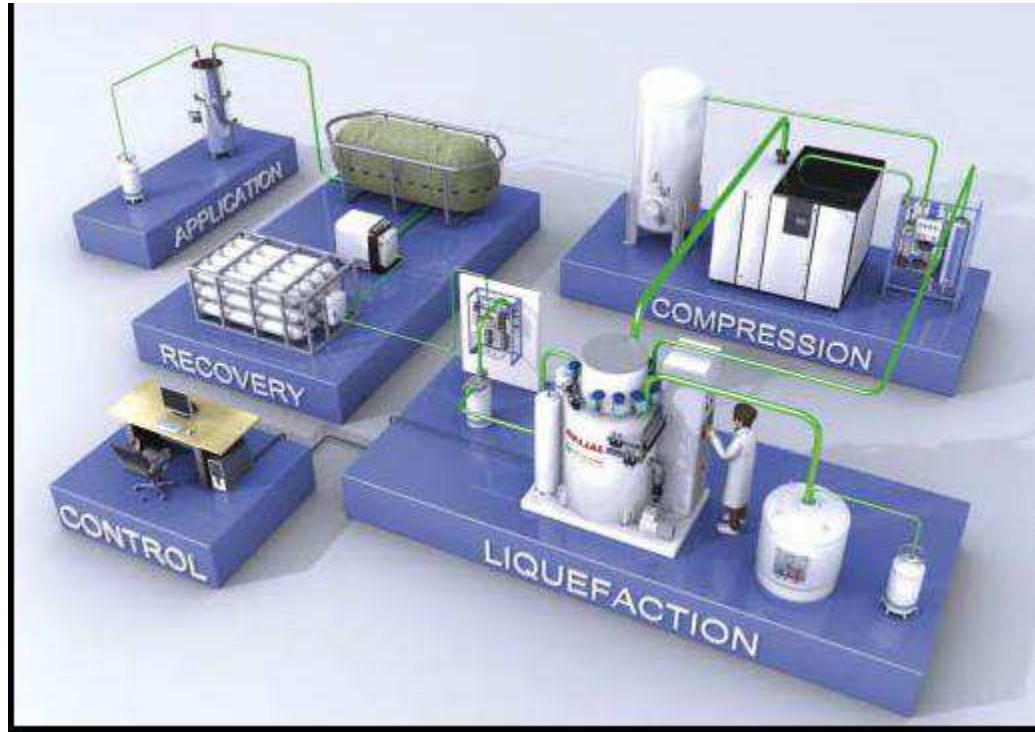
	HELIAL SL	HELIAL ML	HELIAL LL
Max. Liquefaction capacity without LN2	25 L/h	70 L/h	145 L/h
Max. Liquefaction capacity with LN2	50 L/h	150 L/h	330 L/h
Compressor electrical motor	55 kW	132 kW	250 kW
Specific consumption for liquefaction w/o LN2	645 W/W	552 W/W	505 W/W
% Carnot	10%	12%	13%

Firma
Air Liquide



Firma
Linde

	Without LN ₂ precooling	With LN ₂ precooling
L70	20 - 35 l/h	40 - 70 l/h
L140	45 - 70 l/h	90 - 140 l/h
L280	100 - 145 l/h	200 - 290 l/h
LR70	100 - 145 Watt	130 - 190 Watt
LR140	210 - 290 Watt	255 - 400 Watt
LR280	445 - 640 Watt	560 - 900 Watt



- În general, refrigeratoarele recuperative au dimensiuni și puteri frigorifice moderate sau mari (de la 10 W la zeci de kilowatti la 4,5 K),
- eficiențe termodinamice ridicate (10-30 %) și costuri de ordinul 10^5 - 10^7 Euro.
- Sunt sisteme complexe și necesită un suport tehnic considerabil.
- Cele mai mari astfel de sisteme se găsesc în laboratoarele care utilizează acceleratoare de particule.

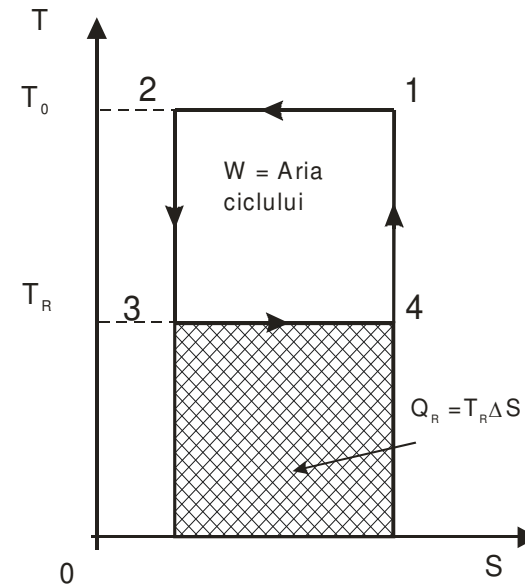
Mașini cu funcționare după un ciclu închis- "cryocoolers"

Ideal -ciclul Carnot inversat

$$COP(Carnot) = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{W}} = \frac{T_R \Delta S}{(T_0 - T_R) \Delta S} = \frac{T_R}{T_0 - T_R}$$

$$COP = \frac{\text{capacitatea frigorifică}}{\text{puterea absorbită}}$$

$$\text{eficienta} = FOM = \frac{COP(\text{real})}{COP(\text{Carnot})}$$



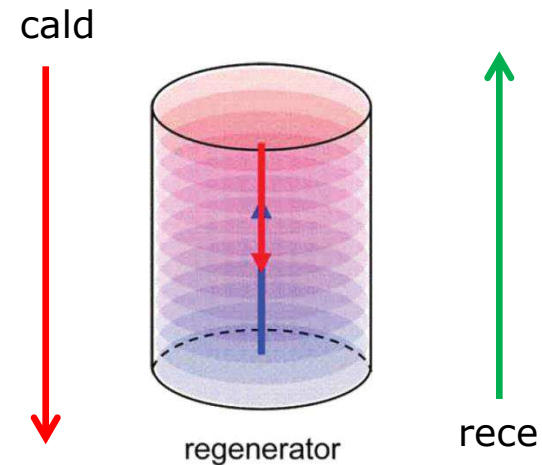
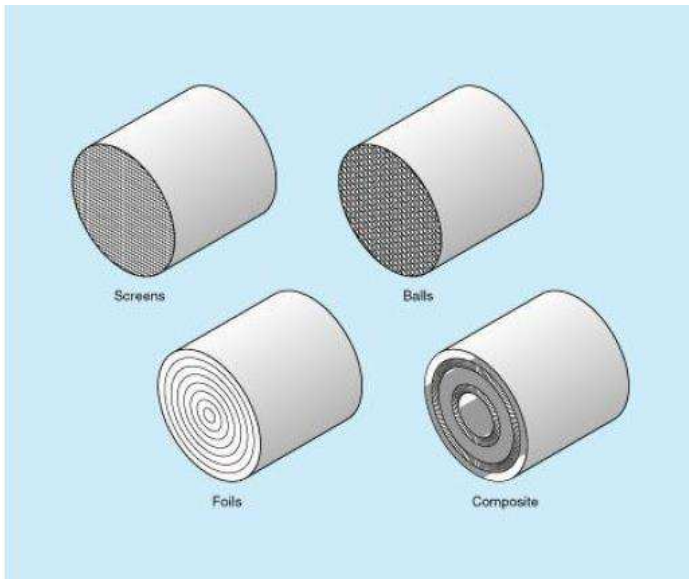
FOM (figure of merit)

- Un refrigerator Carnot ideal necesită 70 W (lucru mecanic-unit timp) ca să furnizeze o putere frigorifică de 1 W la 80 K.
- Un refrigerator real modern necesită 220 W ca să furnizeze o putere frigorifică de 1 W , FOM = 30% la 80 K

Refrigeratoare criogenice regenerative

Refrigeratoarele criogenice *regenerative* utilizează, cel puțin un schimbător de căldură regenerativ, sau un *regenerator*, iar gazul de lucru are **debitul și presiunea oscilante**

Un **schimbător de căldură regenerativ** –sau un *regenerator*– constă dintr-o matrice poroasă, având o **capacitate calorică ridicată**, (alcătuită de obicei dintr-un teanc de site sau sfere metalice) prin care gazul circulă alternativ într-un sens și apoi în sens opus pe durata unui ciclu termodinamic.



❖ gazul cald care intră transferă căldură matricii regenerative, în care căldura este stocată, în prima jumătate a ciclului

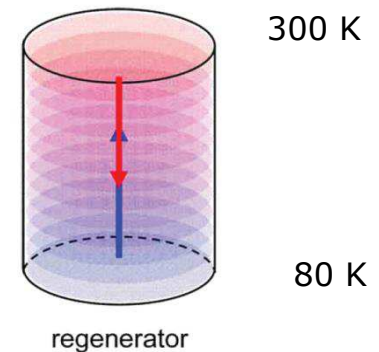
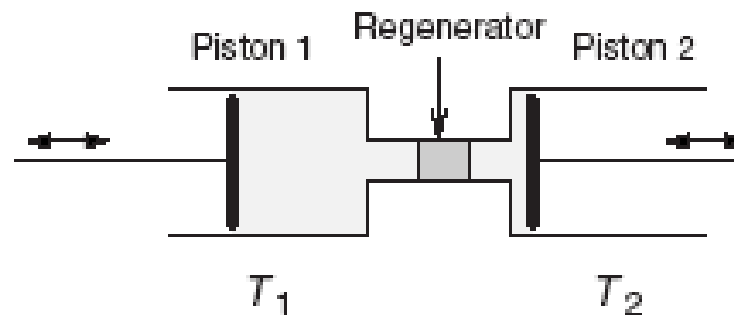
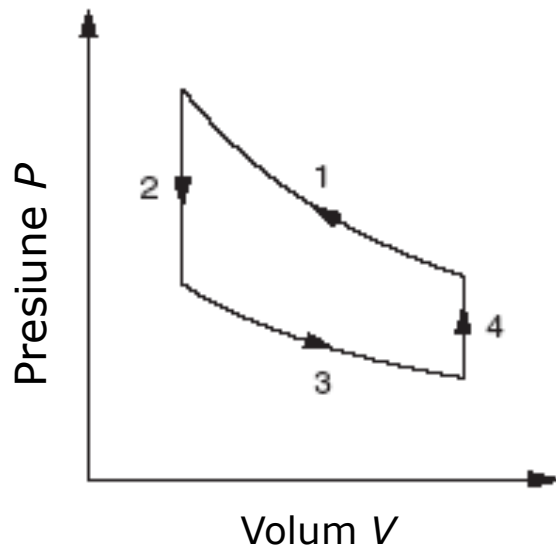
❖ În cea de-a doua jumătate a ciclului, gazul rece care se întoarce, culege căldura stocată acolo și părăsește regeneratorul la temperatura pe care a avut-o inițial la curgerea în sens direct.

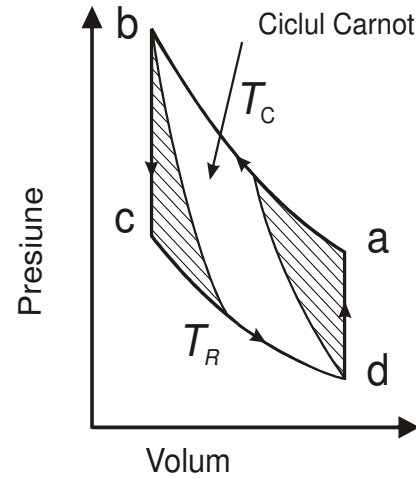
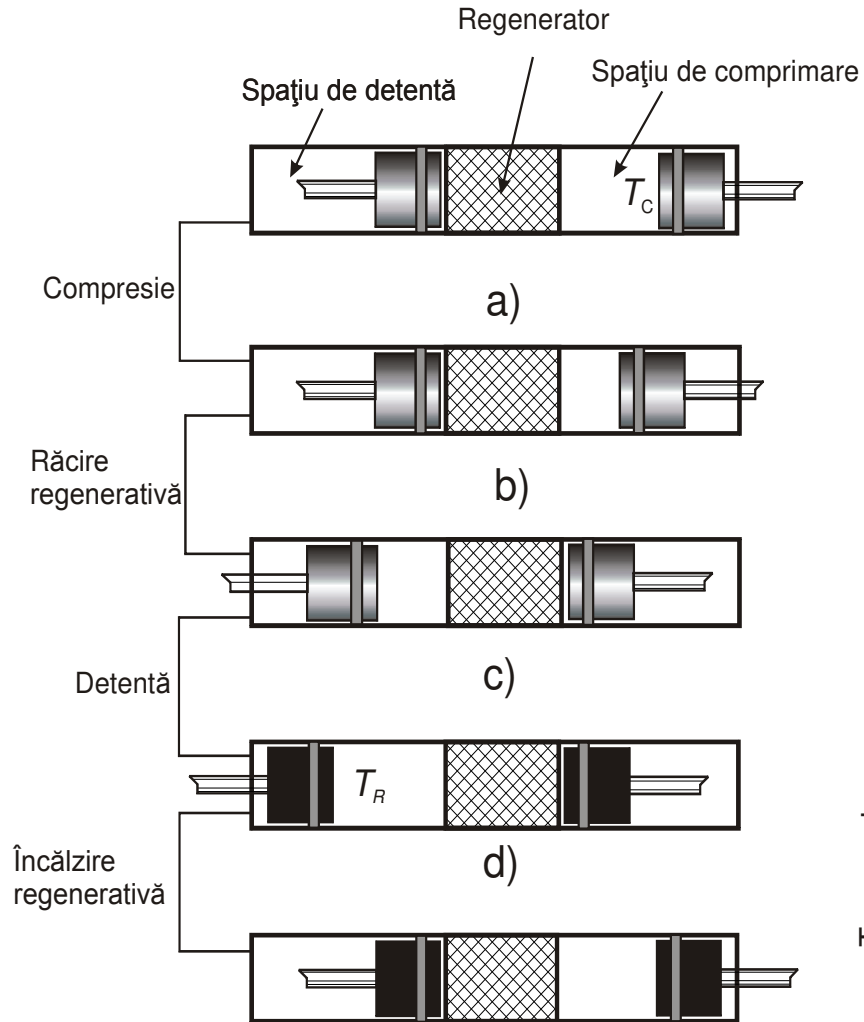
Refrigeratoarele criogenice de tip Stirling

Ciclul Stirling, a fost inventat de către reverendul *Robert Stirling* în 1815 în Scoția și a fost utilizat inițial ca **ciclu motor**.

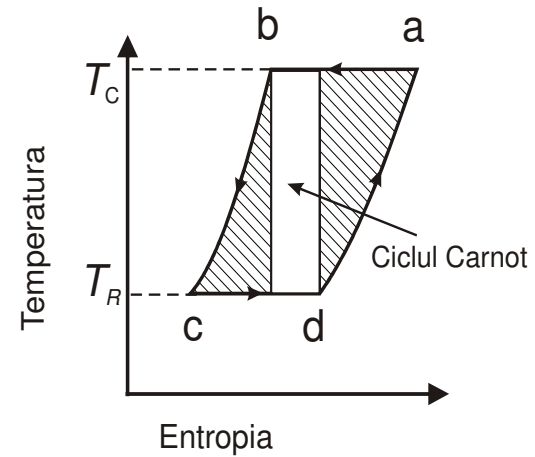
•în 1861 *Alexander Kirk*, un alt scoțian, utilizează **ciclul Stirling inversat** pentru prima dată și construiește un **refrigerator** în care aerul era utilizat ca fluid de lucru.

•în 1946 firma **Philips din Olanda** reușește obținerea temperaturii de 80 K cu un motor Stirling care a fost pus să funcționeze pe ciclul inversat și s-a reușit astfel **lichefierea aerului**.

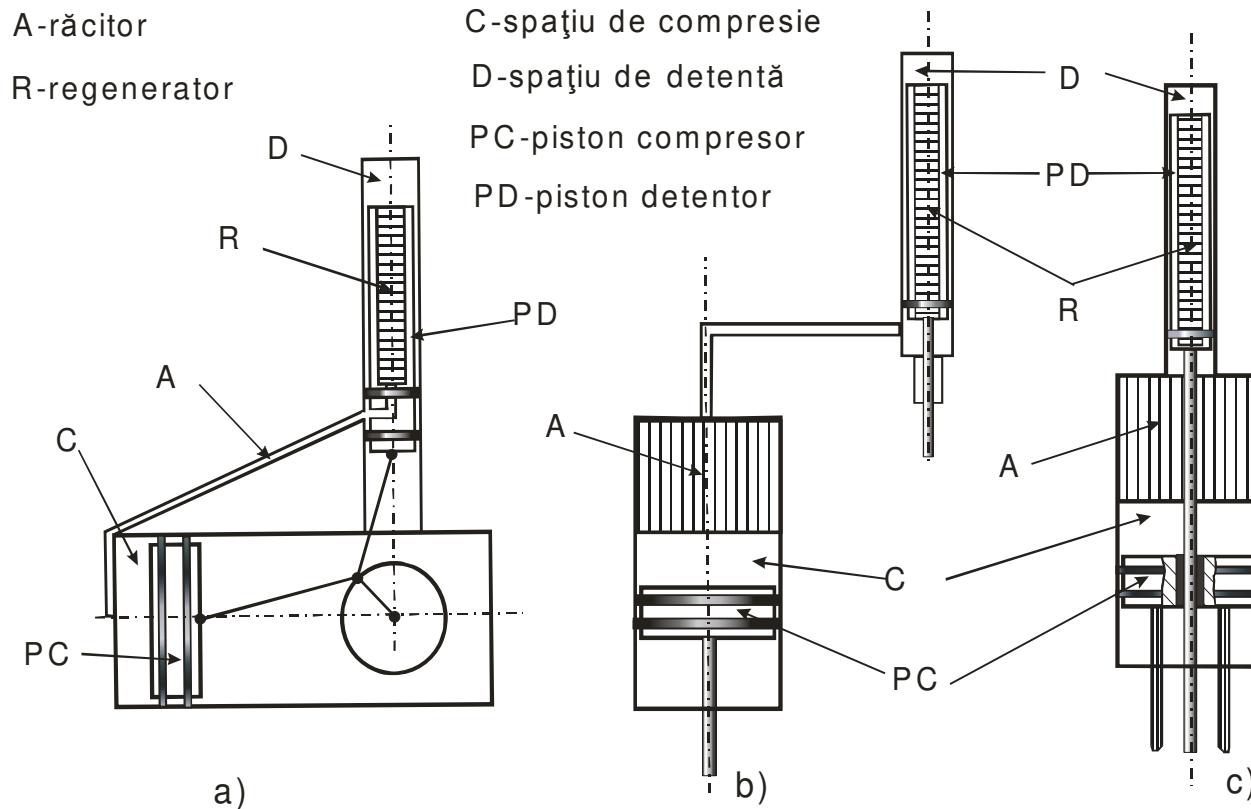




$$COP = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{W}_C} = \frac{T_R}{T_C - T_R}$$



Funcție de aplicațiile în care sunt utilizate, refrigeratoarele Stirling pot avea diferite configurații

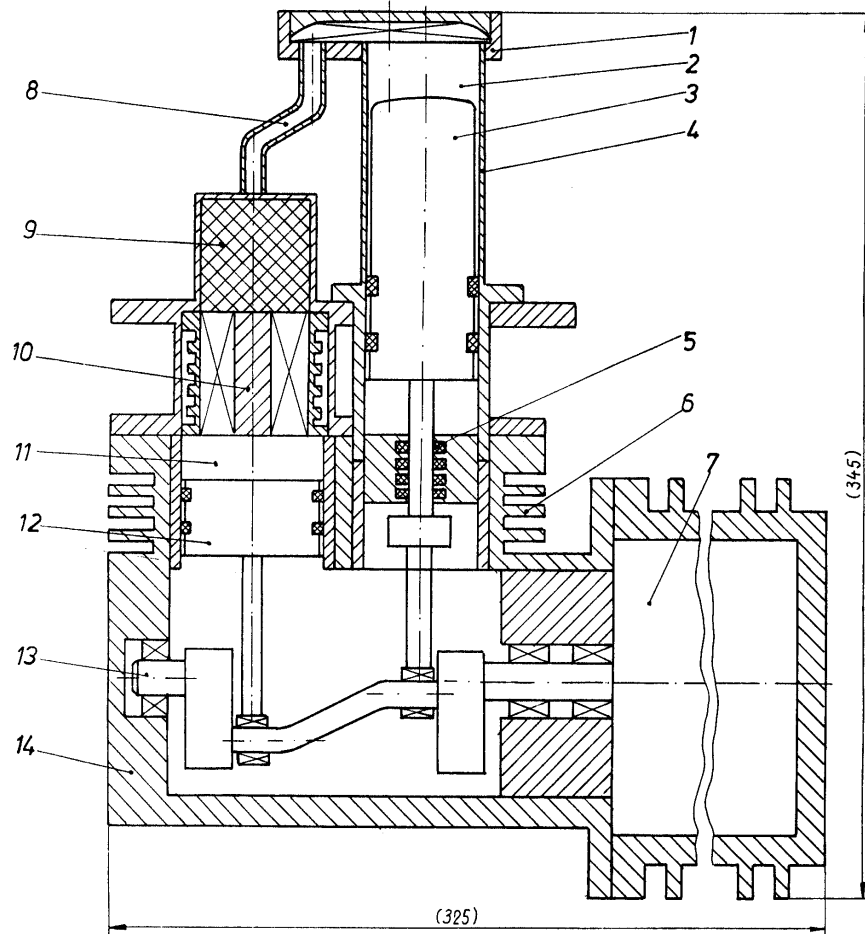


Scheme principale pentru diferite configurații de refrigeratoare criogenice Stirling. a) rectangular; b) split; c) integral (cu cilindri coaxiali).

<http://www.animatedengines.com/vstirling.html>

<http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>

<http://newsjustforyou1.blogspot.ro/2012/09/free-energy-stirling-engine.html>



Refrigerator criogenic
 miniatural pentru răcirea
 unor dispozitive electronice.
 1 Cap de răcire; 2.Spațiu de
 detentă; 3.Detentor; 4.
 Cilindru de detentă; 5.
 Etanșare; 6 .Aripioare
 pentru răcire; 7. Motor
 electric;8. Tub de legătură;
 9. Regenerator; 10. Răcitor
 cu apă; 11. Spațiu de
 compresie; 12. Pistonul
 compresor; 13 Arbore cotit;
 14. Carter

Table 1. Design characteristics of the MC 80K-1 Stirling mini-cryocooler [12]

Working fluid	Helium	Crankshaft rotational speed	1625 [rpm]
Mean filling-up pressure	$5 \cdot 10^3$ Pa	Refrigerating temperature	80 K
Amplitude of pressure variation	$(1.5 + 2) \cdot 10^3$ Pa	Refrigerating load	1 W
Working piston stroke	$5 \cdot 10^{-3}$ m	Total length	$319 \cdot 10^{-3}$ m
Working piston diameter	$28 \cdot 10^{-3}$ m	Total width	$120 \cdot 10^{-3}$ m
Displacer stroke	$5 \cdot 10^{-3}$ m	Total height	$276 \cdot 10^{-3}$ m
Displacer diameter	$10 \cdot 10^{-3}$ m	Net weight	7.73 kg

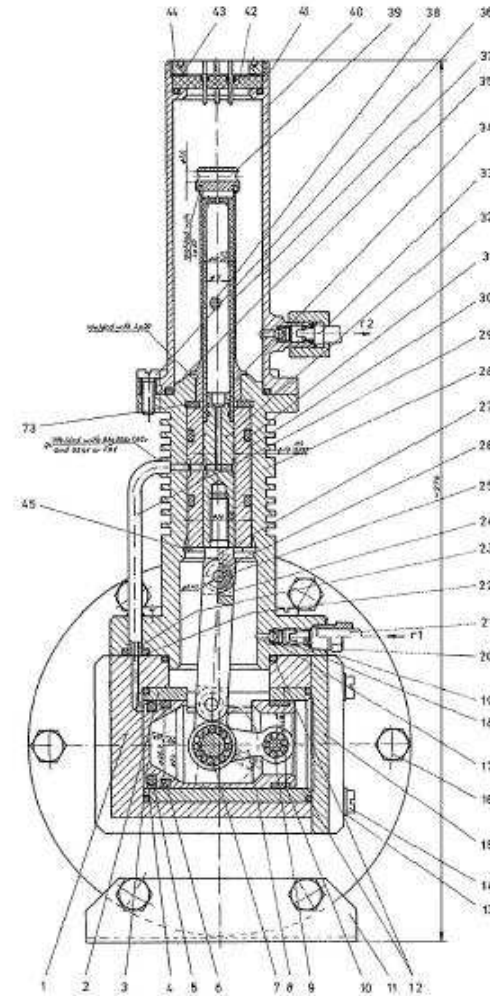


Fig.1. MC 80K-1 Stirling mini-cryocooler scheme [12]

C. PETRE, G. POPESCU, M. COSTEA, S. PETRESCU, I. DEAC – “A Corrected Schmidt Method Analysis of an α -type Stirling Mini-cryocooler”, Vol. Lucrărilor celei de a XII-a Conferințe Naționale de Termotehnică, SRT'02, Academia Navală „Mircea cel Bătrân” Constanța, România, Vol.1, p.383-395, noiembrie 2002.

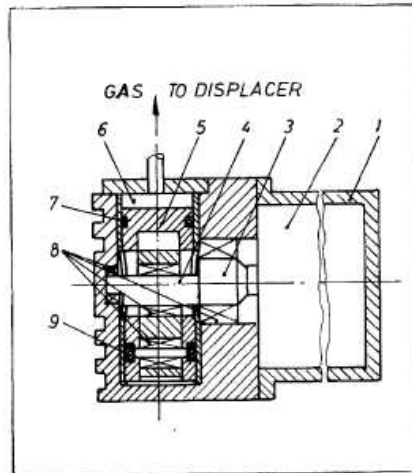


Figure 1 Schematic of compressor

1, housing; 2, electric motor; 3, shaft; 4, eccentric;
5, piston; 6, compression space; 8, bearing;
9, guide

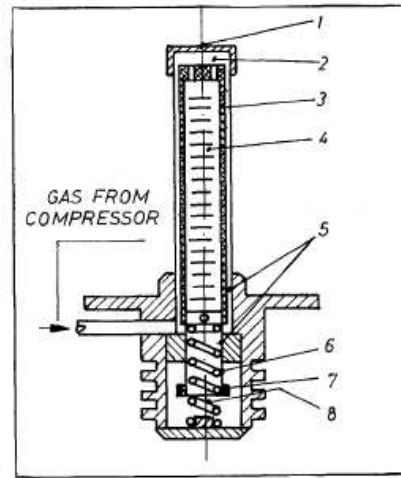


Figure 2 Schematic of displacer

1, cold end; 2, expansion space; 3, displacer;
4, regenerator; 5, clearance seals; 6, drive piston;
7, spring; 8, damper

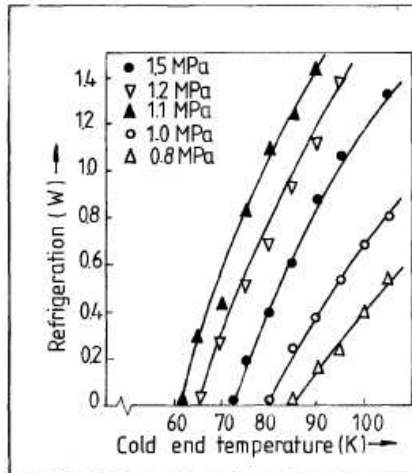


Figure 3 Refrigeration power vs. cold end temperature (the cycle frequency 38 Hz)

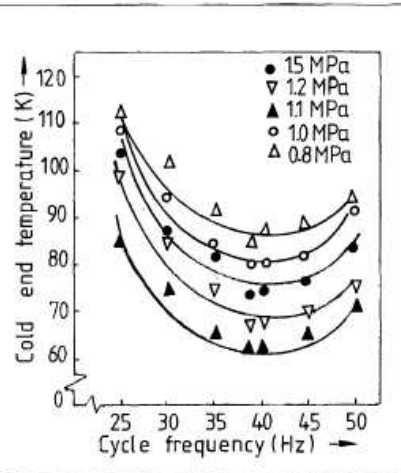
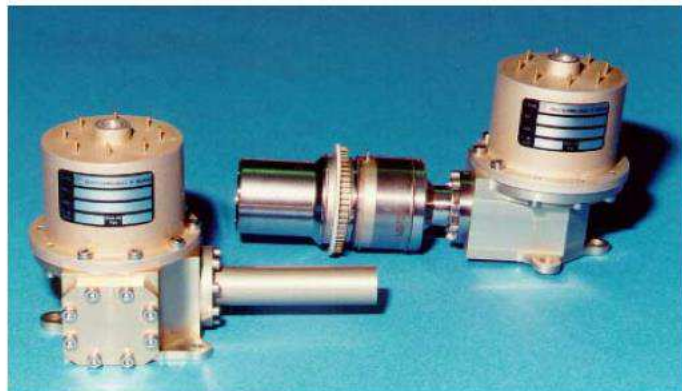
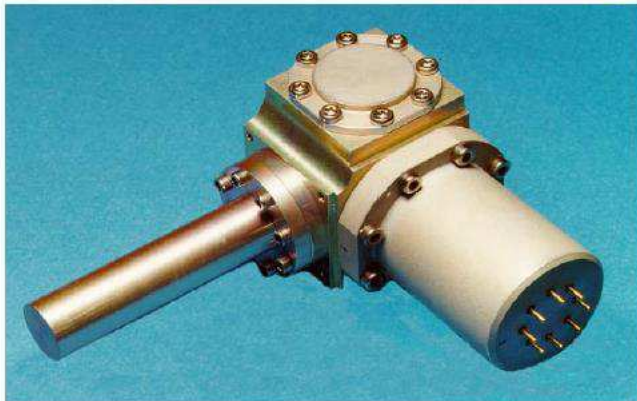


Figure 4 The lowest no-load temperature vs. cycle frequency

Refrigeratoarele de tip Stirling au fost utilizate cu mult succes în ultimii 50 de ani în aplicații militare tactice la răcirea detectorilor în infraroșu pe tancuri și avioane, pentru termoviziune sau vedere pe timp de noapte.

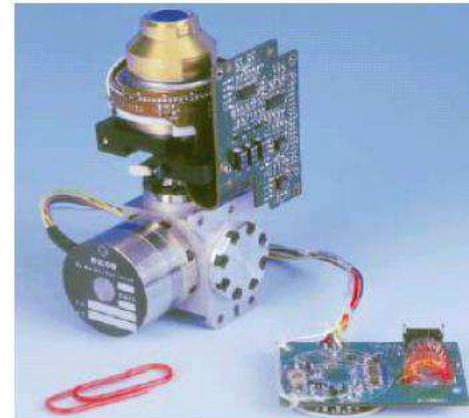
Miniaturizarea acestor refrigeratoare a fost dusă, poate până la extrem, realizându-se modele care cântăresc 100-300 g capabile de a avea puteri de răcire de 0,1 – 1 W la 80 K.

Thales Cryogénie SA: 280g – 1/4 W @ 77K



Thales Cryogénie SA: 340g – 1/2 W @ 77K

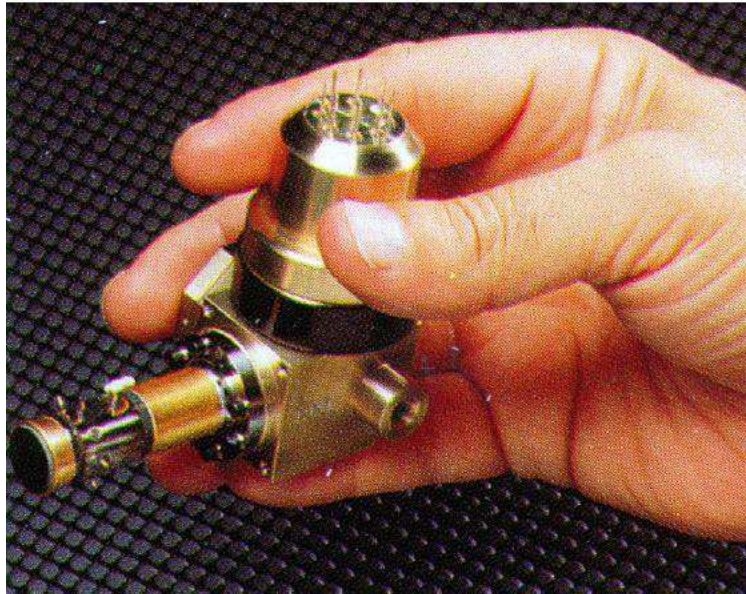
RICOR: 270g – 1/4 W @ 77K



RICOR: 450g – 1/2 W @ 77K

Stirling coolers - Rotary monobloc

Smallest Stirling cooler: 250g – 0,2 W @ 77K - INFRAMETRICS



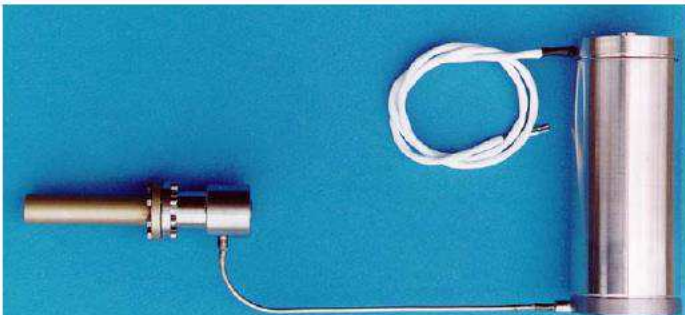
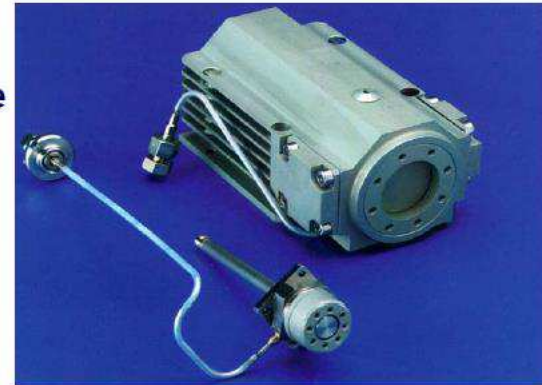
✓ Sliding rotating or linear pressure oscillator + pneumatically driven cold expander: a few 1000 h MTBF

✓ 1/4 to 2W @ 80K

COR

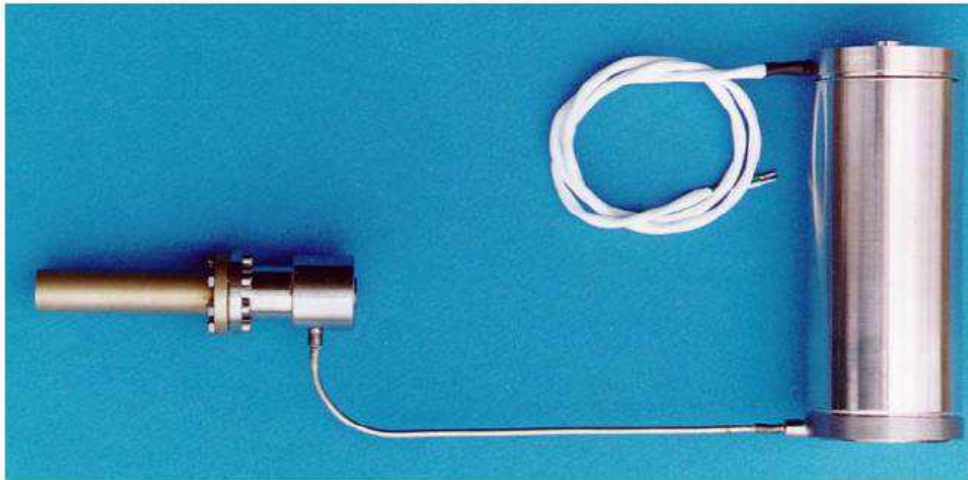


Air Liquide



Thales Cryogenics BV





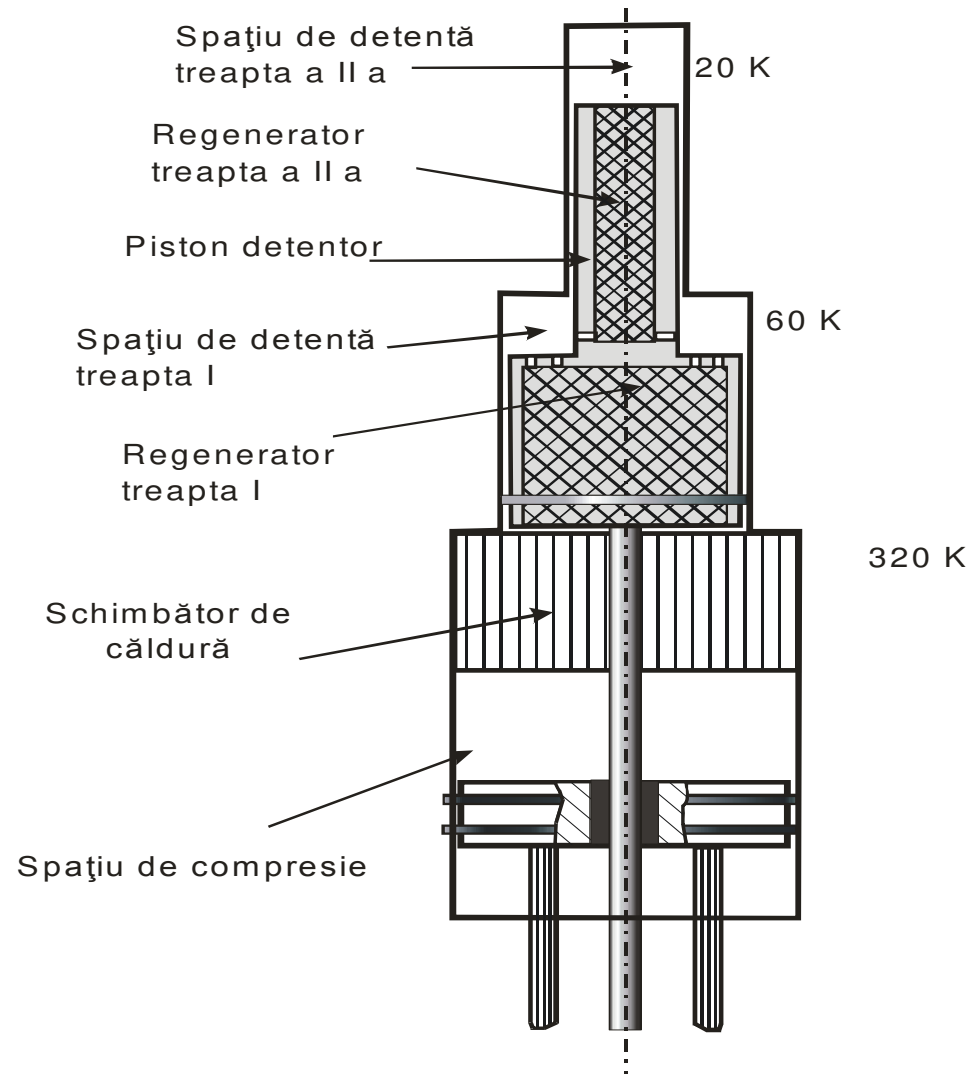
Thales Cryogenics BV



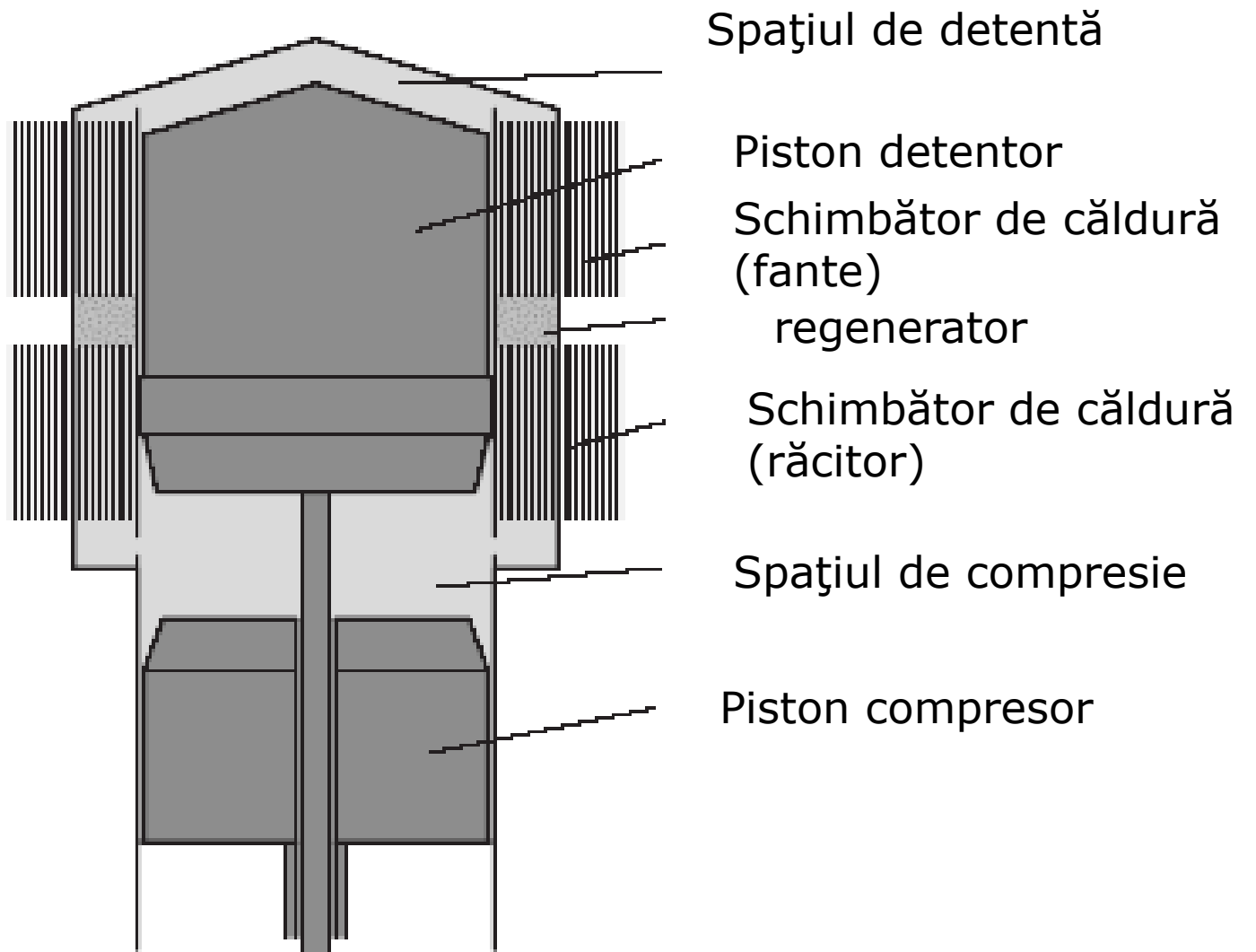
Thales Cryogenics BV



AIM



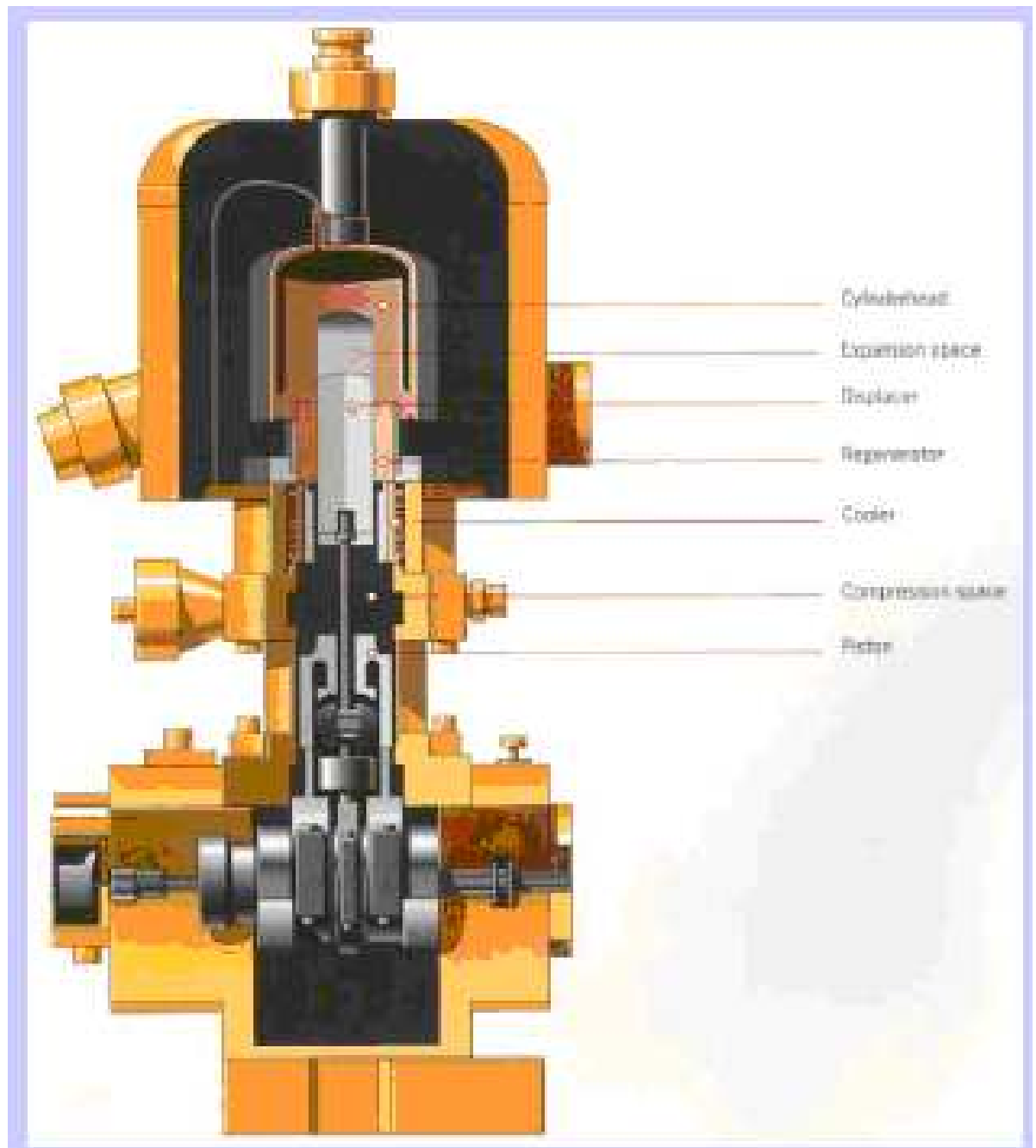
refrigerator de tip Stirling cu două trepte de răcire



Reprezentare schematică a unui criogenerator Philips-Stirling utilizat la lichefierea azotului.



Stirling Cryogenics BV



Large cooling capacity Stirling refrigerators available from Stirling Cryogenics & Refrigeration Bv. (NL)

single piston	single stage	1kW/80K	11.5kW	24% Carnot
four pistons	single stage	4kW/80K	45kW	
single piston	two stages	50W/20K 150W/80K	11,5kW	
four piston	two stages	200W/20K 600W/80K	45kW	

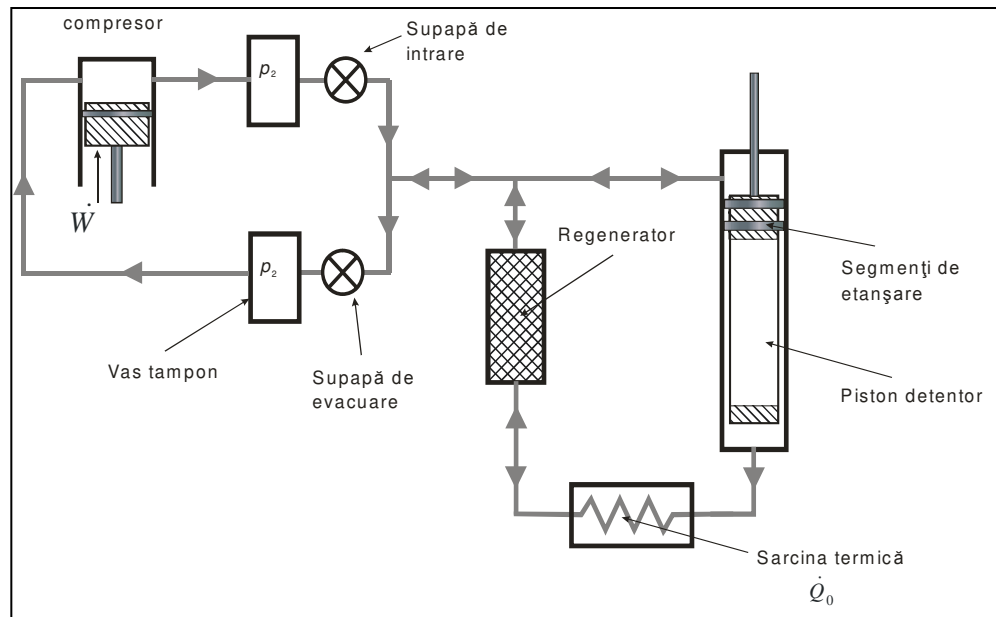


Refrigeratoarele criogenice de tip Gifford-McMahon

Sistemele de tip Stirling au frecvența de lucru ridicată (~ 1000 RPM) \rightarrow uzuri \rightarrow timp de buna funcționare redus.

I.G. Deac, Elemente de criogenie

Pe la mijlocul anilor 1960 *Gifford* și *McMahon* au arătat că oscilațiile presiunii pentru refrigeratoarele criogenice pot fi generate cu ajutorul unei supape rotative care poate comuta între două surse de presiune, una de înaltă presiune (~ 20 bar) și una de joasă presiune (~ 4 bar).

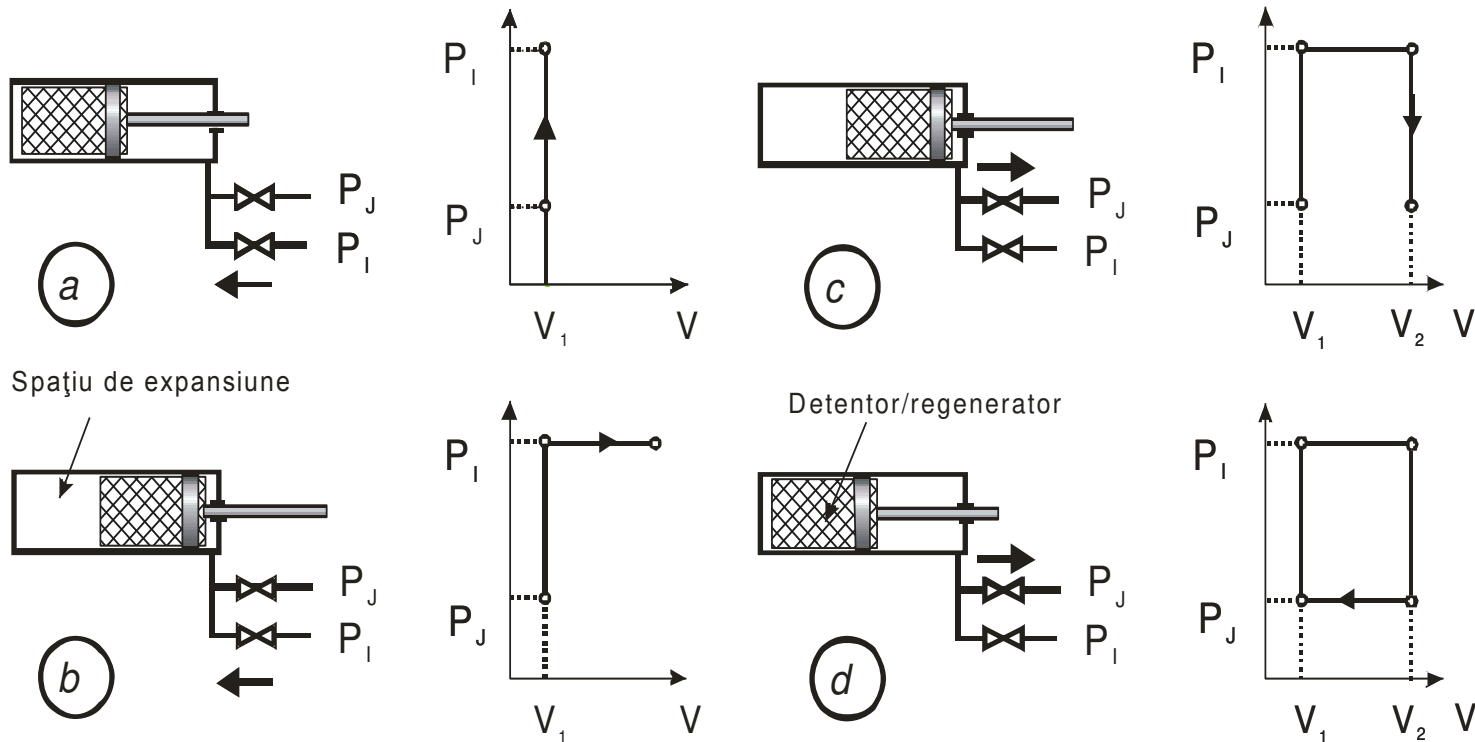


- frecvența joasă: 1-2 Hz
- ungere uscată la detentor, segmenti de etanșare de teflon(PTFE)

Compresorul este o parte separată a sistemului și poate fi amplasat la o distanță convenabilă de partea de răcire.

Schema de principiu a unui refrigerator Gifford-McMahon

Gazul de lucru: Heliu (de obicei) !!!



Principiul de funcționare al refrigeratorului Gifford-McMahon.

Într-o singură treaptă de răcire refrigeratoarele GM pot furniza circa 1 W putere frigorifică la 70 K utilizând compresoare cu un debit, în jur de 5 m³N/h și o putere de 1,5 kW.

Modul compresor, care este partea masivă a sistemului (cântărind în jur de 60 kg) are cam aceeași structură în toate cazurile și furnizează 16-24 bari la refulare iar aspirația este la 3-8 bari.

sunt utilizate compresoare ermetice pentru freon (asemănătoare cu cele de la frigiderele casnice), ca în aparatele de condiționare a aerului

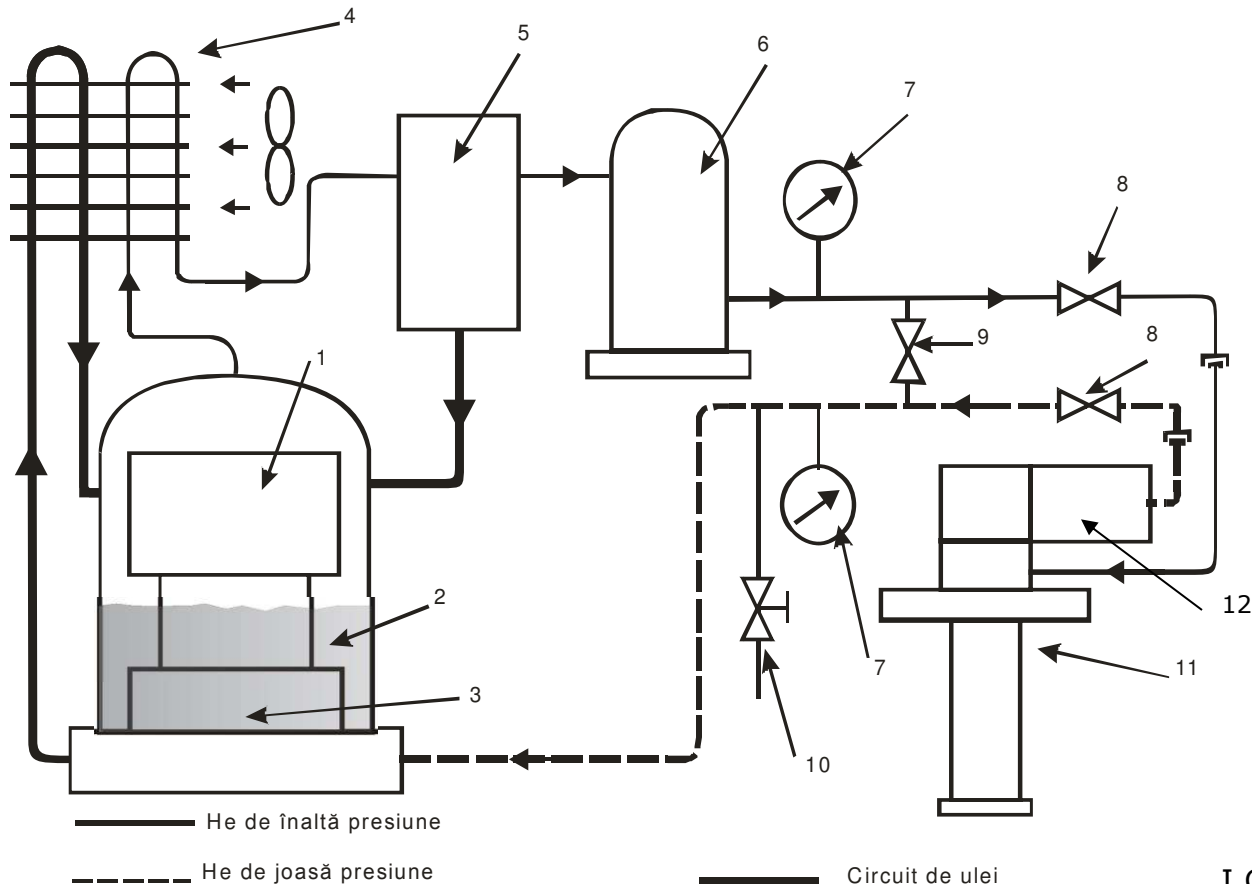
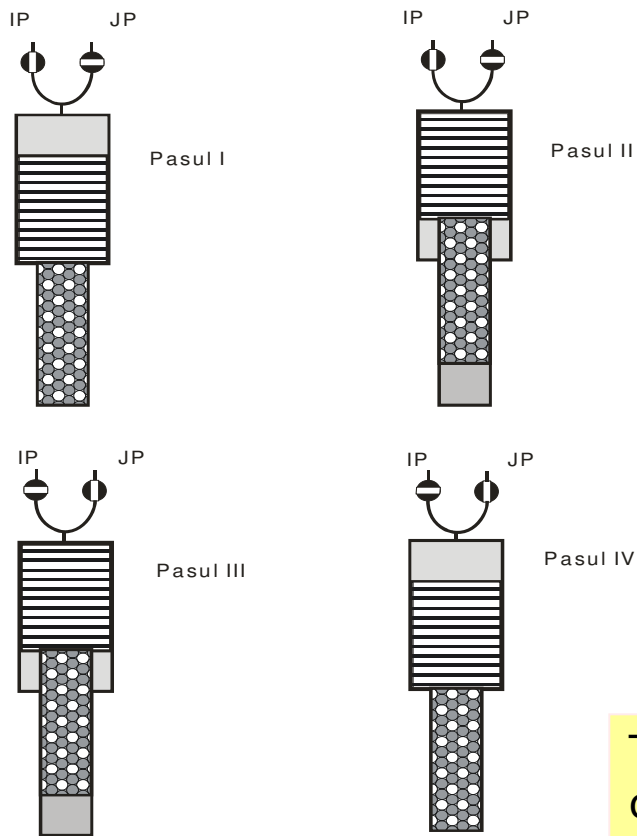
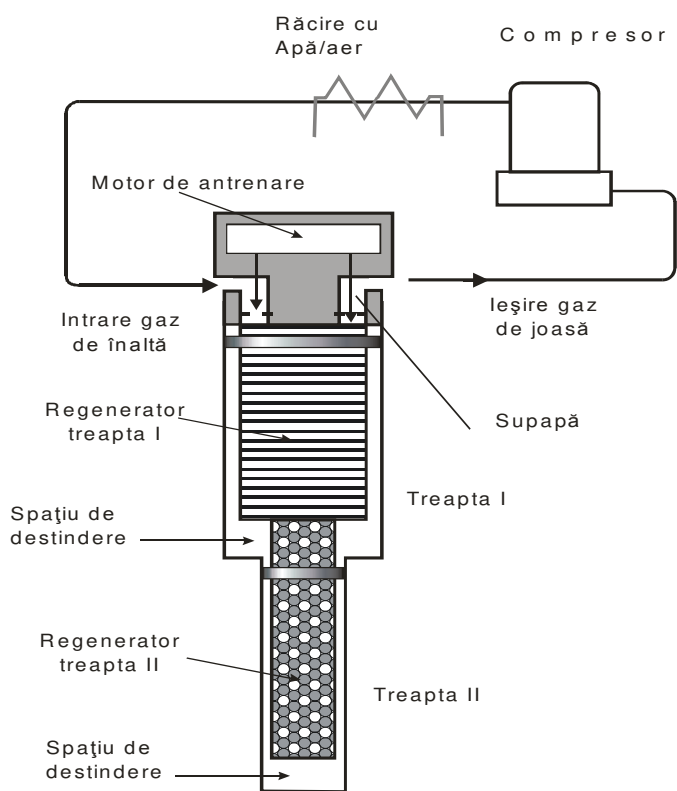


Diagrama schematică a unui modul compresor. 1-motorul compresorului; 2-rezervor cu ulei; 3-compresor; 4-răcire cu aer (apă); 5- separator de ulei; 6-adsorber; 7-manometru; 8-supapă; 9-supapă by pass; 10- linie de umplere cu heliu; 11- detentor GM; 12- motor electric.

Funcționarea în două trepte de răcire

dubla destindere, sau funcționarea în *două trepte de răcire*: o parte din gazul răcit în prima treaptă se destinde și se răcește în treapta a doua

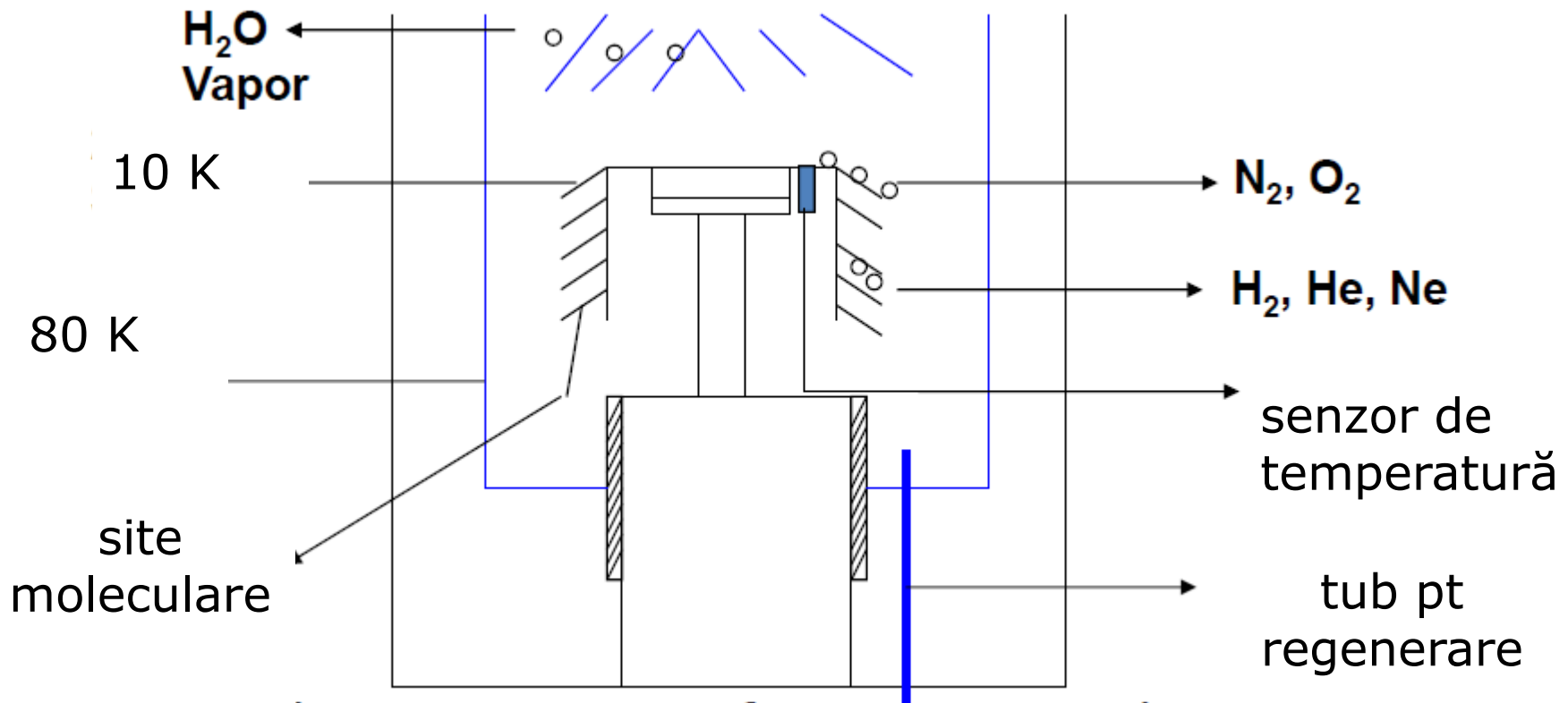


matricea regenerativă a treptei a doua este constituită din sfere de plumb.

Temperatura minimă cca. 10 K !!!

Refrigeratoarele Gifford-McMahon au fost folosite, începând încă din 1980, pentru răcirea adsorbanților (din cărbune activ) din criopompe la 15 K.

Criopompele permit atingerea unui vid ultraînalt (10^{-8} - 10^{-10} mbar) prin „înghețarea” tuturor gazelor care au temperatura de solidificare peste 15 K și adsorbția celor reziduale.





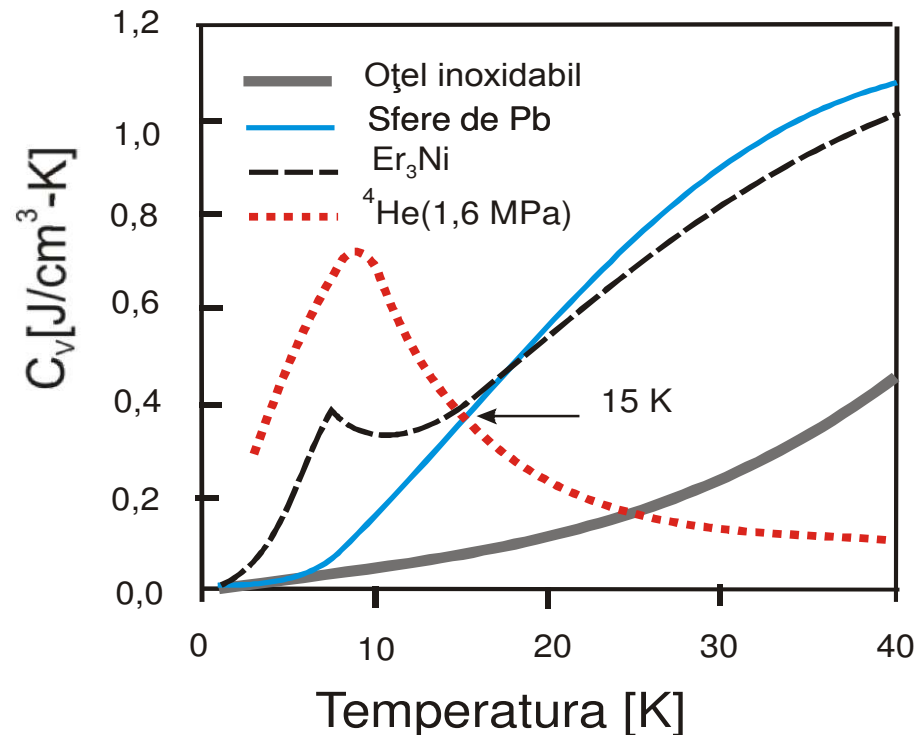
obținerea unui vid curat în industria de dispozitive semiconductoare a creat premisele dezvoltării unei piețe largi pentru aceste sisteme, fiind cea mai importantă aplicație a refrigeratoarelor GM.

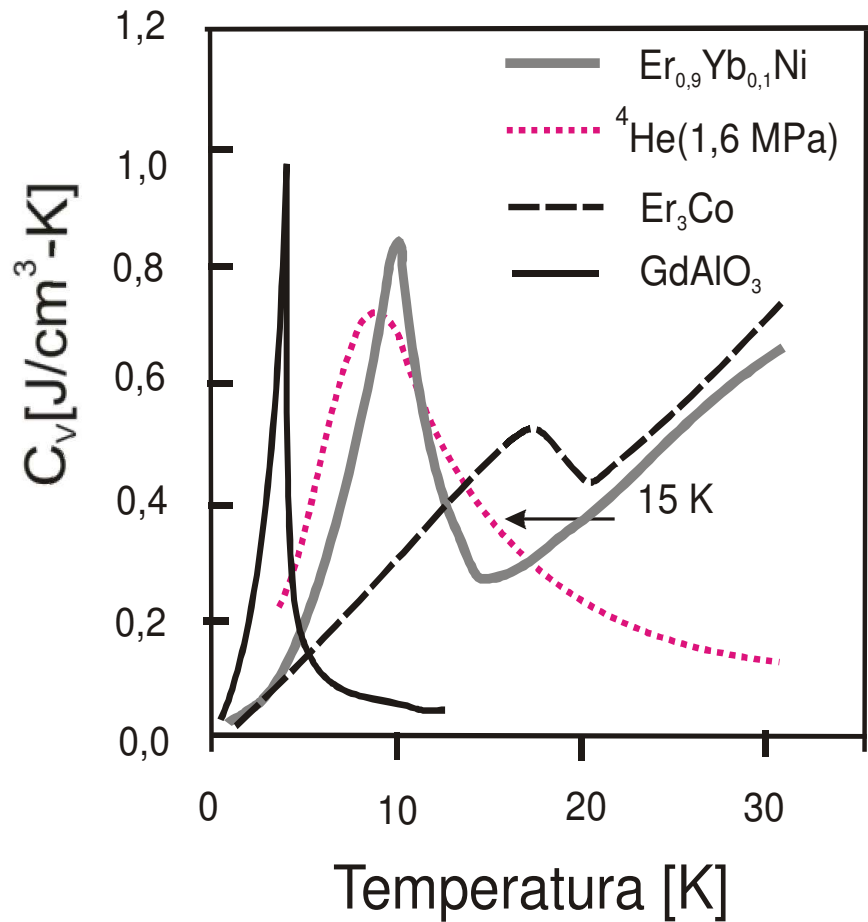
Intervalele tipice de întreținere pentru unele astfel de refrigeratoare criogenice sunt de 1 sau 2 ani, ceea ce a devenit foarte convenabil pentru utilizatori.

Începând din anii 1990, dezvoltarea **regeneratoarelor din materiale magnetice** care au căldura specifică ridicată la temperaturi situate sub 10 K, a permis creșterea puterii frigorifice a refrigeratoarelor criogenice regenerative, la temperaturi joase, permițând obținerea unor temperaturi de lucru situate în domeniul celei de lichefiere a heliului

La temperaturi joase căldura specifică a tuturor materialelor tinde la zero, ajungând să fie mai mică decât cea a heliului. Astfel încât un schimb de căldură între heliu (gazul de lucru) și aceste materiale nu mai poate conduce la răcire heliului.

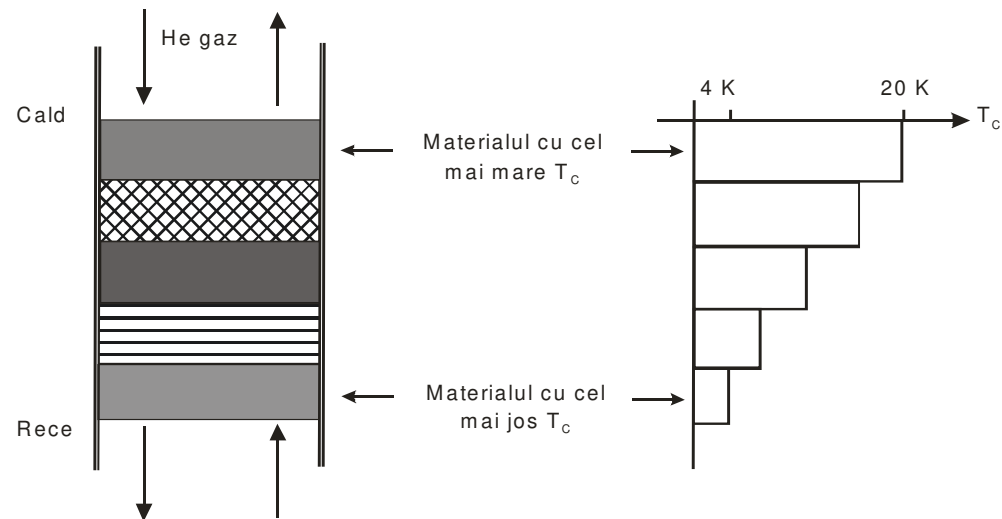
Materialele magnetice (în special compușii pământurilor rare) pot avea călduri specifice mai mari decât cele ale materialelor nemagnetice sub 10 K, datorită anomaliilor care apar în căldura specifică în regiunea tranziției de fază magnetice.





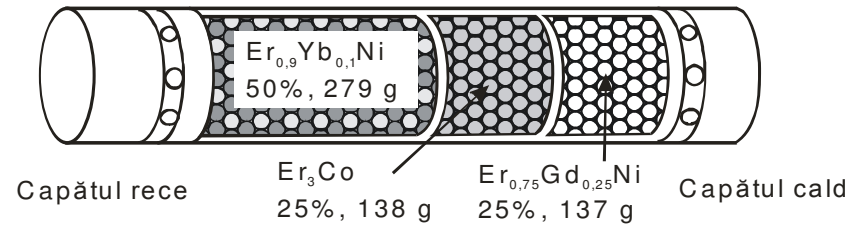
Maxime puțin extinse față de cel al He

Regenerator multistrat

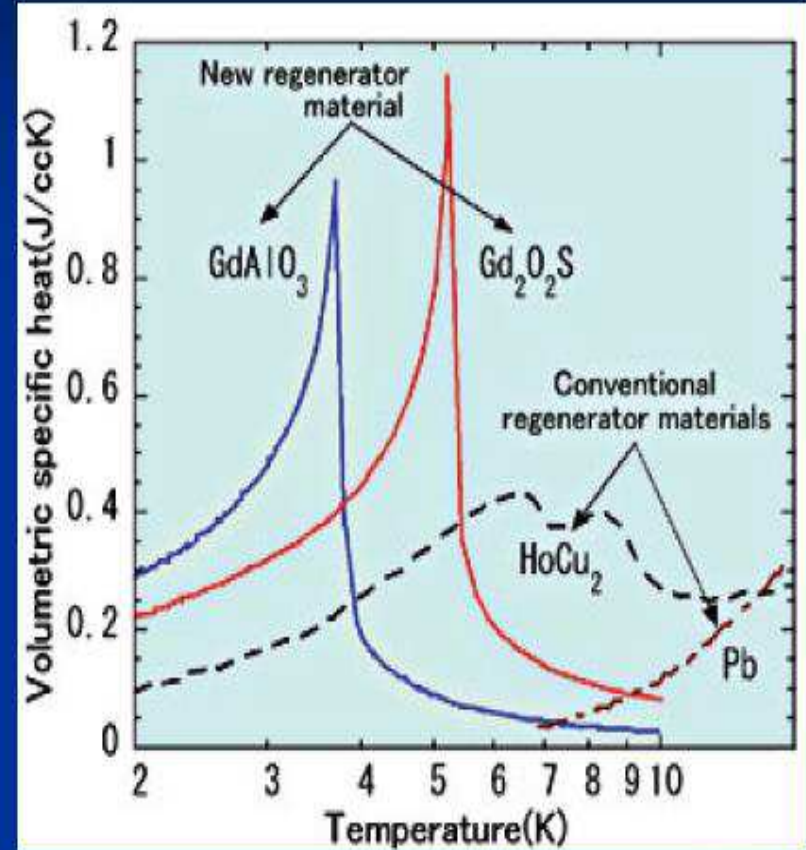
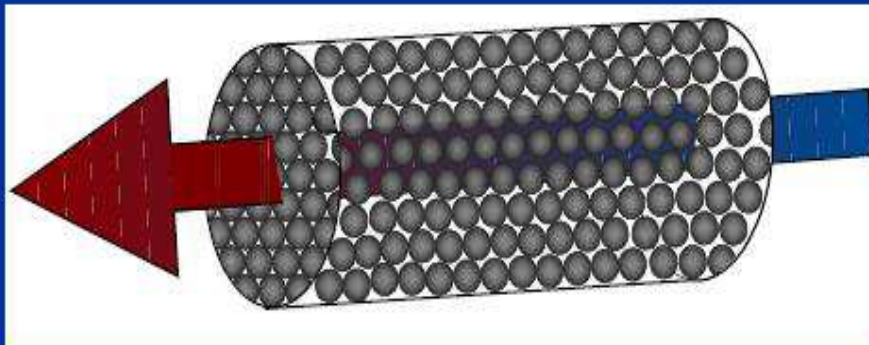
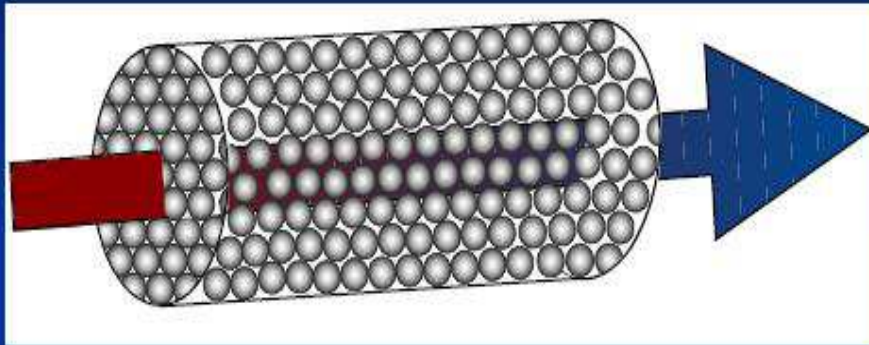


Deac, Elemente de criogenie

$\text{Er}_{0,9}\text{Yb}_{0,1}\text{Ni}$	Er_3Co	$\text{Er}_{0,75}\text{Gd}_{0,25}\text{Ni}$
0,5	0,5-x	x
Capătul rece		Capătul cald



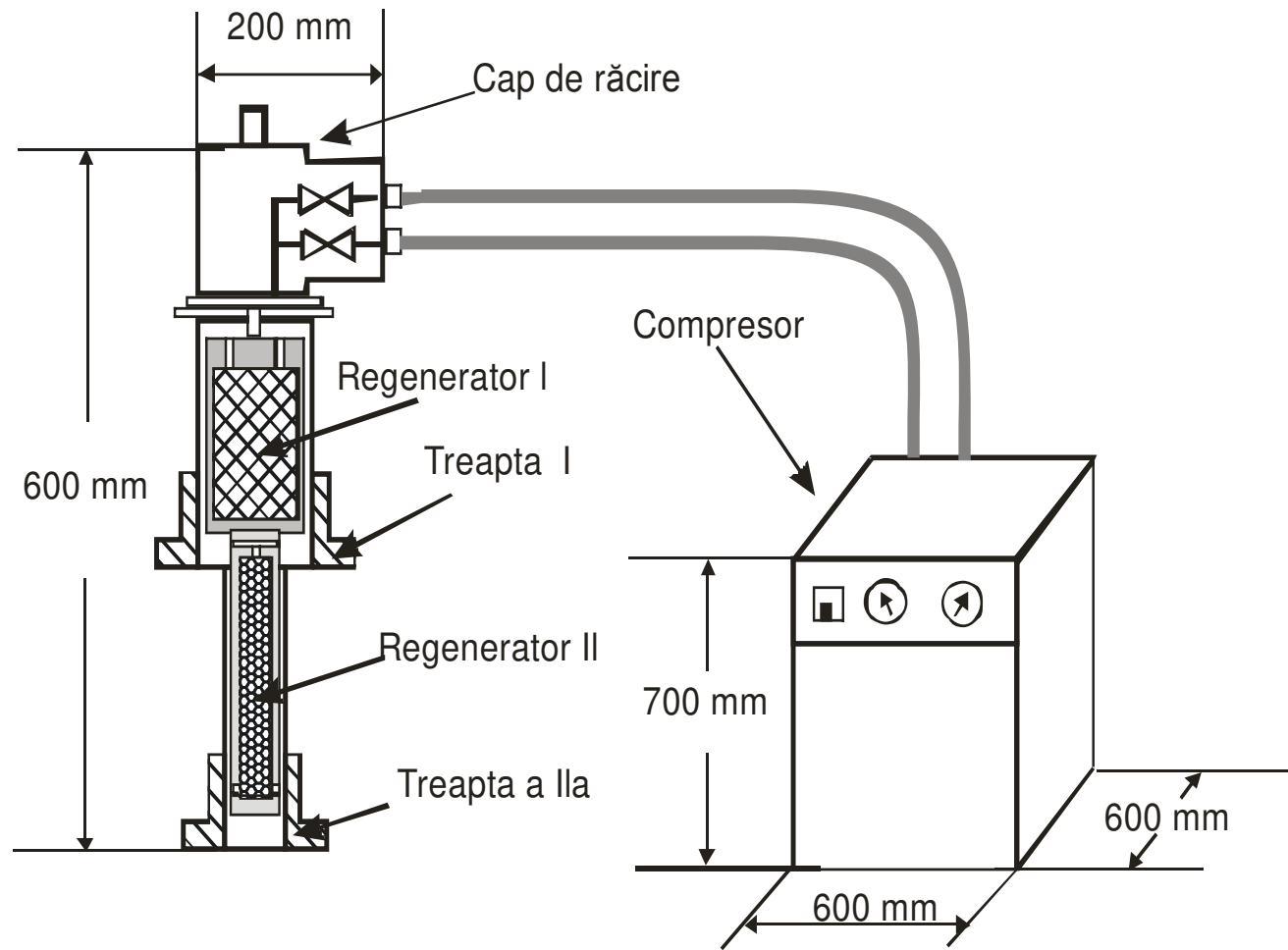
Prezentare schematică a structurii unui regenerador al treptei a doua de răcire pentru un refrigerator GM cu funcționare la temperaturi mai joase de 4 K



Ceramic magnetic regenerator material (Gd_2O_2S) (average grain size: $400\mu m$)

European Course of Cryogenic
CERN, Geneva 30 August, 2010





- 2 stage 4K coolers available from SUMITOMO



RDK 415
1,5W @ 4,2K



RDK 101
0,1W @ 4,2K



Refrigeratoarele criogenice de tip tub pulsator

Majoritatea aplicațiilor refrigeratoarelor criogenice necesită sisteme care să fie **eficiente**, să aibă o **durată de funcționare îndelungată**, un **cost redus** și să funcționeze **fără a interfera** cu obiectul care trebuie răcit.

pistonul detentor este o sursă de vibrații, are o durată de funcționare limitată din cauza uzurilor

refrigeratorul de tip tub pulsator PTR (*pulse tube refrigerator*),

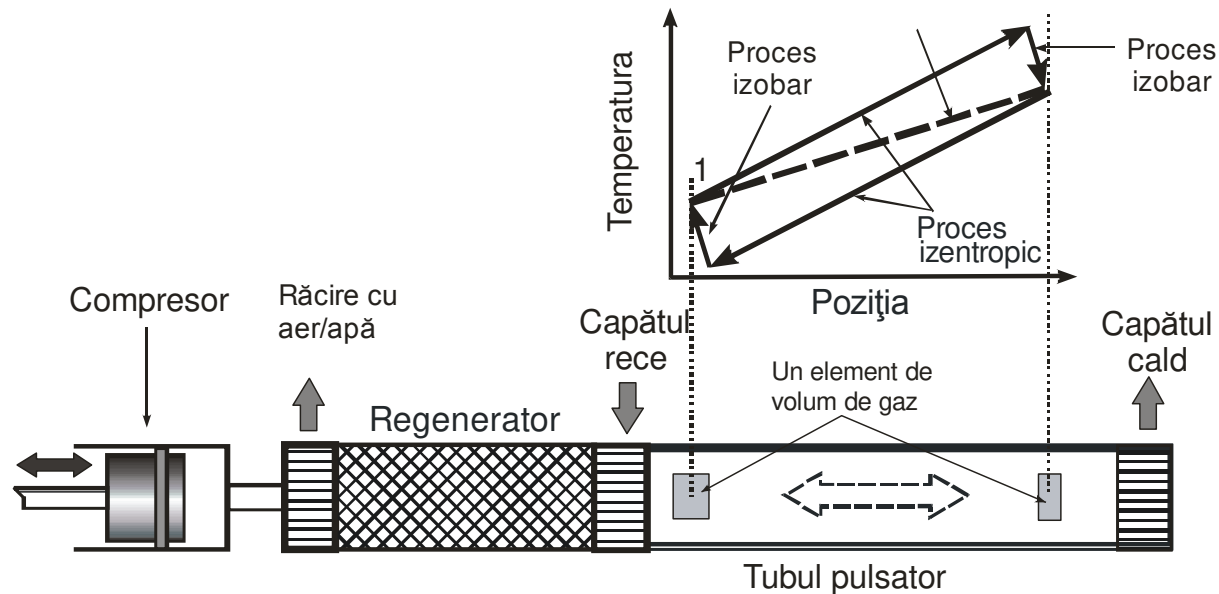
ciclu regenerativ închis și cărui principală caracteristică este absența unei componente mobile la capătul rece

pistonul detentor (solid) al acestora este înlocuit cu un piston detentor de „gaz”

Oscilațiile se produc într-un tub metalic-- gazul de lucru curge printr-un regenerador unde se stochează căldura pentru o jumătate de ciclu și apoi este returnată în cealaltă jumătate de ciclu.

Valorile tipice ale presiunii medii a gazului de lucru sunt cuprinse între 10 și 25 bar iar amplitudinea oscilațiilor între 2 și 7 bar.

PTR a fost inventat de către *W. E. Gifford* și asistentul său *L. C. Longworth* în 1963, varianta care în zilele noastre se numește BPTR (**B**asic **P**ulse **T**ube **R**efrigerator),



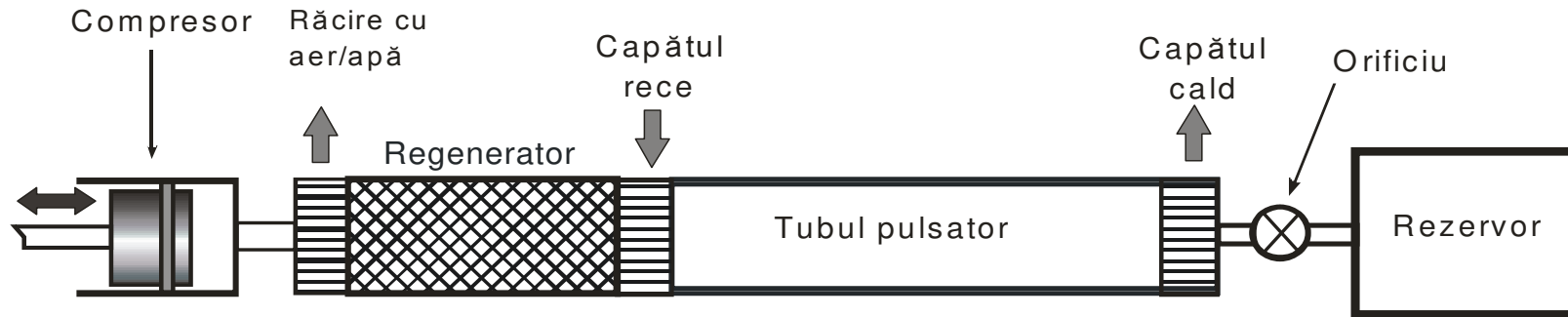
Schema de principiu a refrigeratorului tub pulsator simplu (BPTR). Compresorul induce curgerea oscilatorie a gazului și variațiile presiunii în sistem. Este prezentat aici și un volum elementar de gaz care schimbă căldură cu pereții tubului și transformările pe care le suferă.

- În faza de **temperatură și presiune ridicate**, are loc un transfer de căldură de la un volum elementar de gaz la perete, ceea ce face ca gazul să se răcească.
- În faza de **temperatură și presiune reduse** volumul elementar de gaz absoarbe căldură de la peretele tubului, evident într-o altă poziție de-a lungul tubului. gazul transportă căldură de la **rece** la **cald**.

Cea mai joasă temperatură obținută cu un BPTR a fost de 124 K, într-o singură treaptă de răcire și 79 K pentru un refrigerator cu două trepte

În 1984, Mikulin și colaboratorii tub pulsator cu orificiu OPTR (sau **O**rifice **P**ulse-**T**ube **R**efrigerator –OPTR).

Deac, Elemente de criogenie

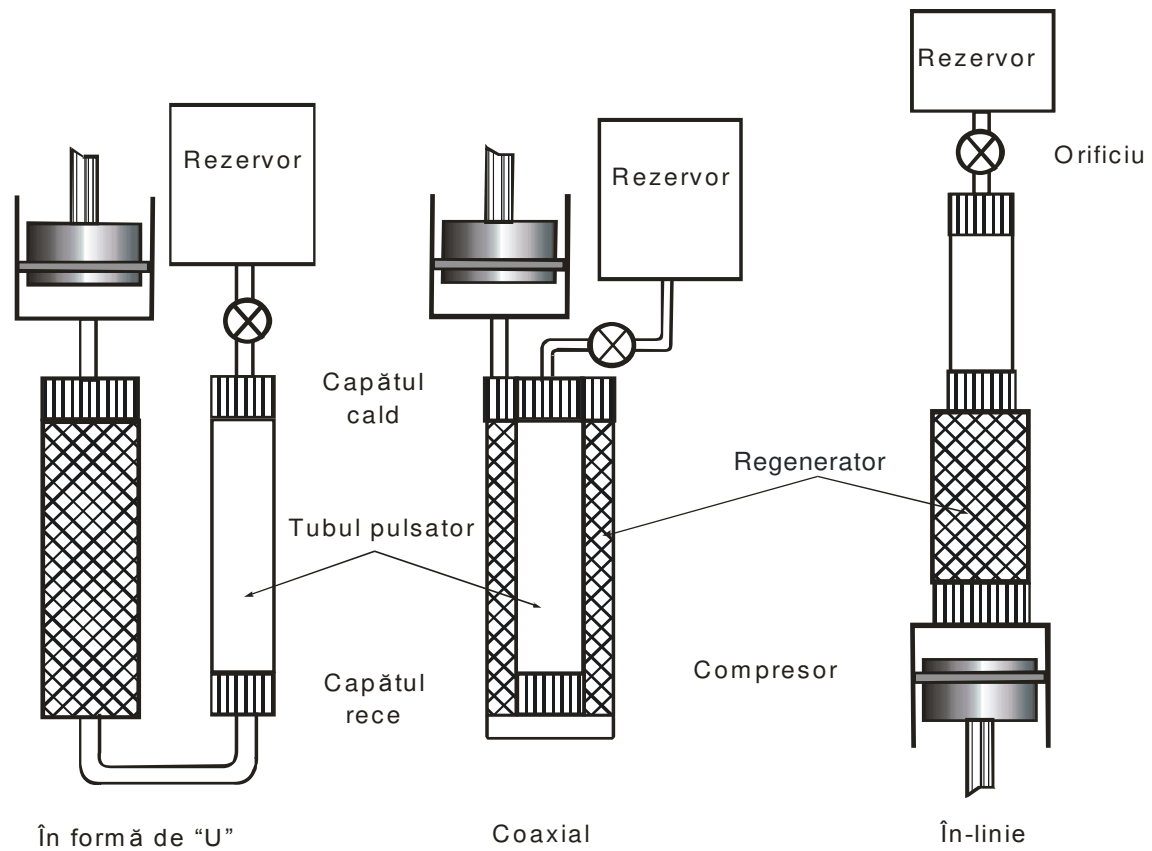


Cu un OPTR într-o singură treaptă de răcire, Mikulin a reușit să atingă o temperatură de 105 K, utilizând aer ca gaz de lucru, în 1984.

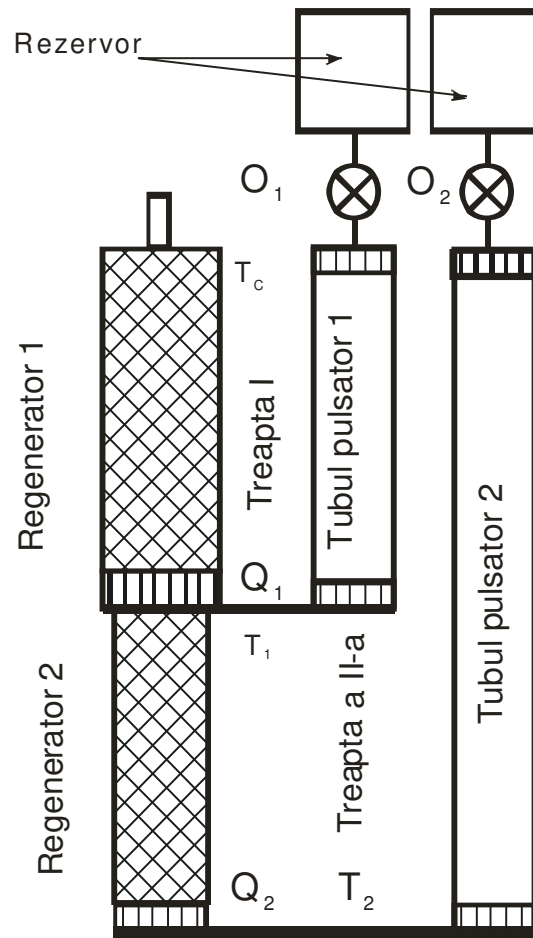
În 1985, Radebaugh și colaboratorii lui reușesc să obțină o temperatură de 60 K cu un sistem asemănător, utilizând heliu ca gaz de lucru.

- frecvențele de lucru între 5 și 10 Hz

Perfecționările ulterioare au condus la obținerea unor modele care să atingă 20 K într-o treaptă și chiar temperaturi sub 2 K în două trepte de răcire



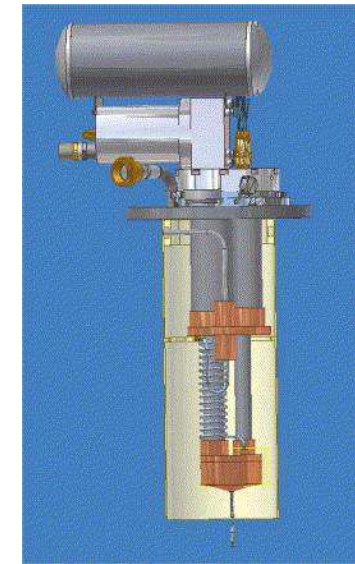
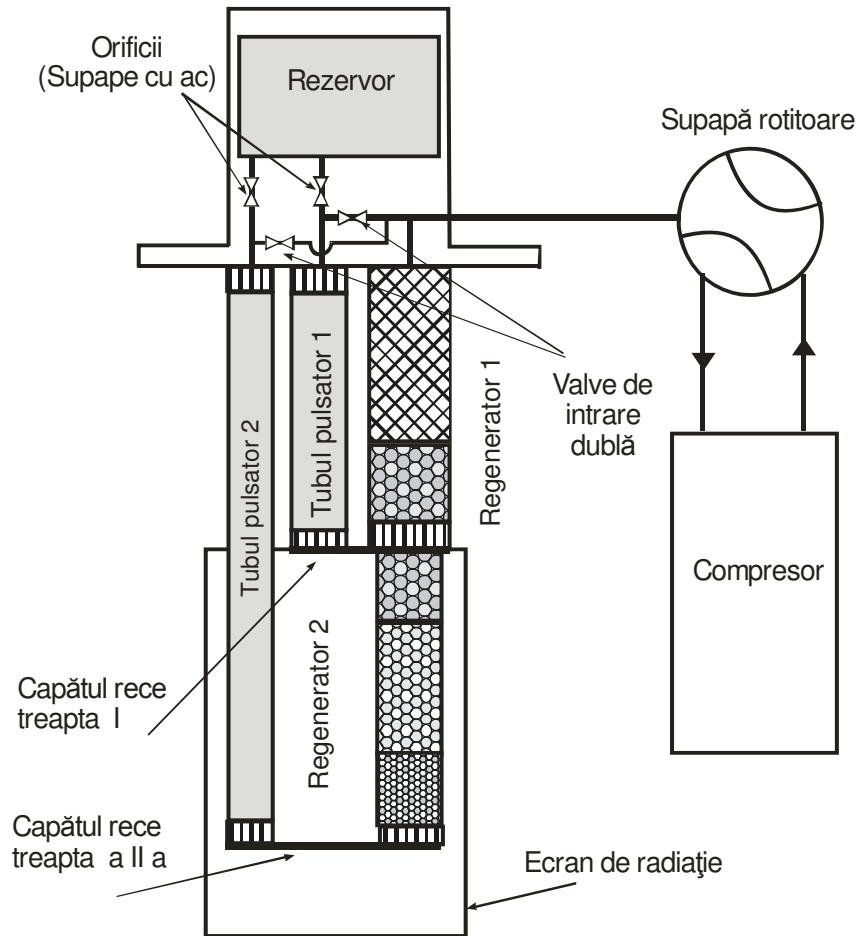
Configurațiile de bază utilizate în realizarea refrigeratoarelor OPTR



Diagramă schematică a unui refrigerator OPTR în două trepte de răcire.

un tub pulsator îl prerăcește pe un altul

regeneratoare cu materiale magnetice

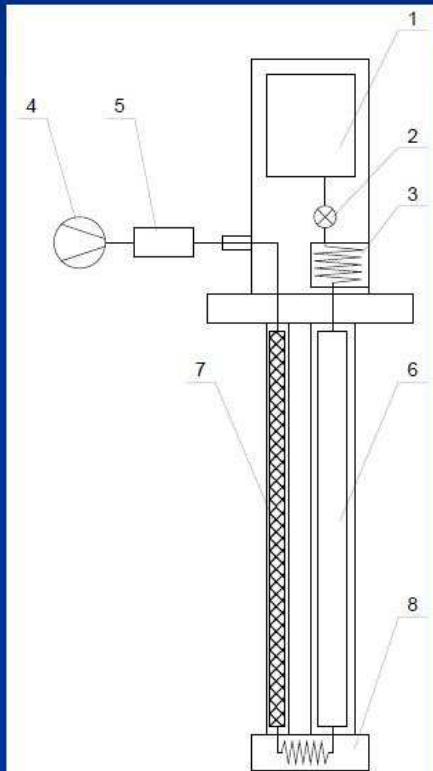


puteri frigorifice de 1 W la 4 K, la treapta a doua de răcire și 35 W la 45 K la prima treaptă.

vezi IGD "Elemente de criogenie" și cryocourse.grenoble

Schema de principiu a unui refrigerador criogenic OPTR cu intrare dublă în două trepte de răcire. Regeneratorul treptei a doua are trei secțiuni, sfere de Pb, sfere de ErNi și granule de $\text{ErNi}_{0,9}\text{Co}_{0,1}$.

Pulse tube cryocoolers



European Course of Cryogenic
CERN, Geneva 30 August, 2010

Pulse tube



Cryo course
Grenoble

SRP-082B PULSE TUBE 1.0W@4.2K



Cooling Capacity:

1st stage: 40W at 45K (50/60Hz)

2nd stage: 1.0W at 4.2K (50/60Hz)

Lowest Temperature:

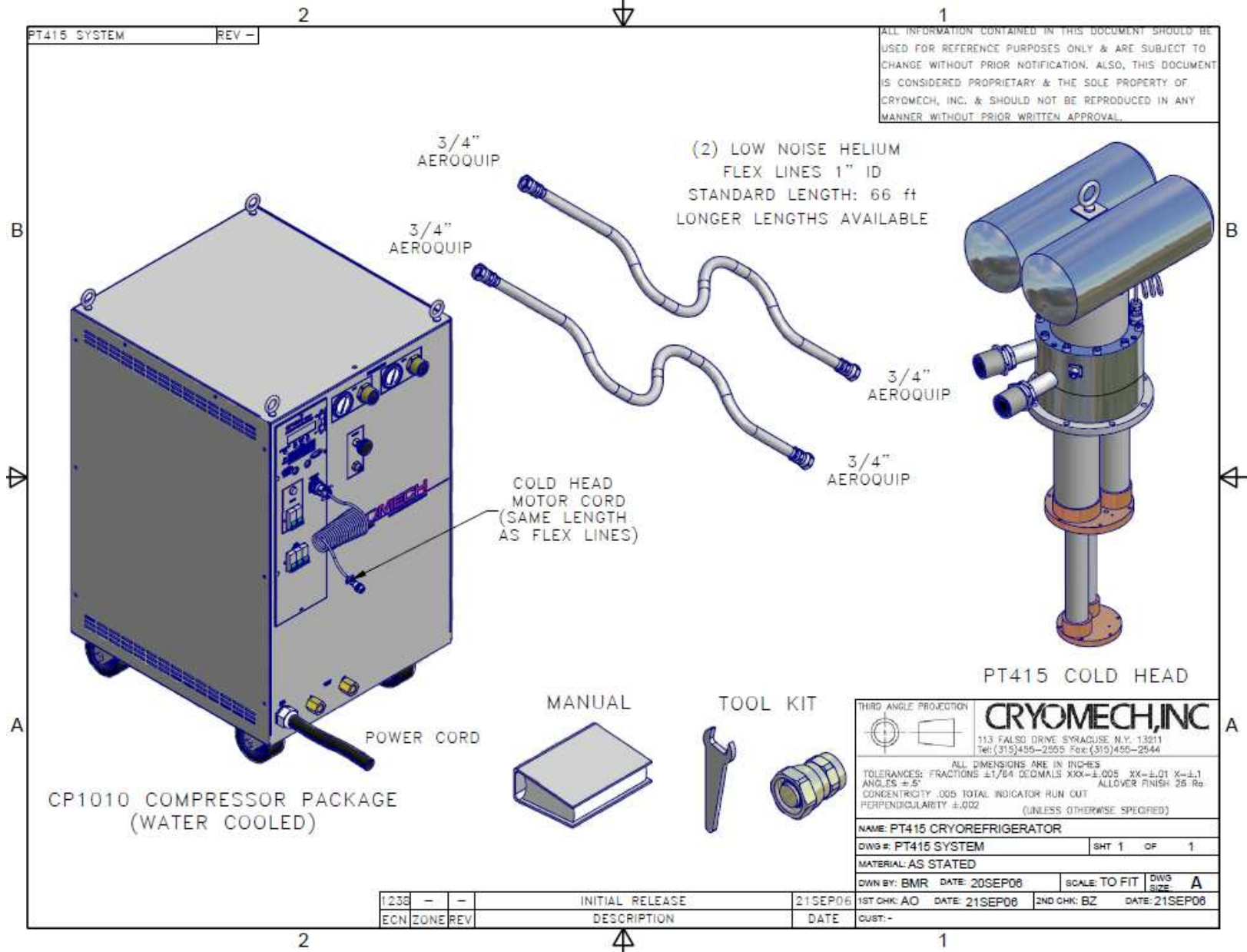
<3.0K

Cooldown Time:

<80 minutes



2nd stage and 1st stage combined 1.5W @ 4.2K with 40W @ 45K
 Lowest Temperature: 0W @ 2.8K



ALL INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT SHOULD BE USED FOR REFERENCE PURPOSES ONLY & ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT PRIOR NOTIFICATION. ALSO, THIS DOCUMENT IS CONSIDERED PROPRIETARY & THE SOLE PROPERTY OF CRYOMECH, INC. & SHOULD NOT BE REPRODUCED IN ANY MANNER WITHOUT PRIOR WRITTEN APPROVAL.

THIRD ANGLE PROJECTION		CRYOMECH, INC	
113 FALSO DRIVE SYRACUSE N.Y. 13211		Tel: (315)455-2555 Fax: (315)455-2544	
ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES			
TOLERANCES: FRACTIONS ±1/64 DECIMALS .005 .01 .02		XX ±.01 X ±.1	
ANGLES ±5°		ALLOWER FINISH 25 Ra	
CONCENTRICITY .005 TOTAL INDICATOR RUN OUT		(UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)	
PERPENDICULARITY ±.002			
NAME: PT415 CRYOREFRIGERATOR			
DWG #: PT415 SYSTEM		SHT 1 OF 1	
MATERIAL: AS STATED			
DWN BY: BMR DATE: 20SEP06		SCALE: TO FIT	
1ST CHK: AO DATE: 21SEP06		DWS SIZE: A	
2ND CHK: BZ DATE: 21SEP06			

1238	-	-	INITIAL RELEASE	21SEP06
ECN	ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE





