

CRIOGENIA



PULArC – Criostato de LAr
 $T_{\min} \sim 89 \text{ K} \sim -184 \text{ }^{\circ}\text{C}$

F-640 – 2S2024

Prof. Pascoal Pagliuso

DEQ-GPOMS Ramal 15501

pagliuso@ifi.unicamp.br



Criostatos de ^3He

$T_{\min} \sim 0.3 \text{ K} \sim -272.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

O que iremos estudar ao longo do semestre:

→ Criogenia - Estudo de tecnologias (produção) e materiais em temperaturas muito baixas ($T \ll 300 \text{ K}$).

Nitrogênio líquido

Fonte de nitrogênio: atmosfera

Extração do N_2 : compressão e adsorção

Temperatura de liquefação: 77K

Distribuição no IFGW: dewars

Armazenagem no IFGW : dewars

Recuperação? NÃO

Preço ~ R\$ 2 /L

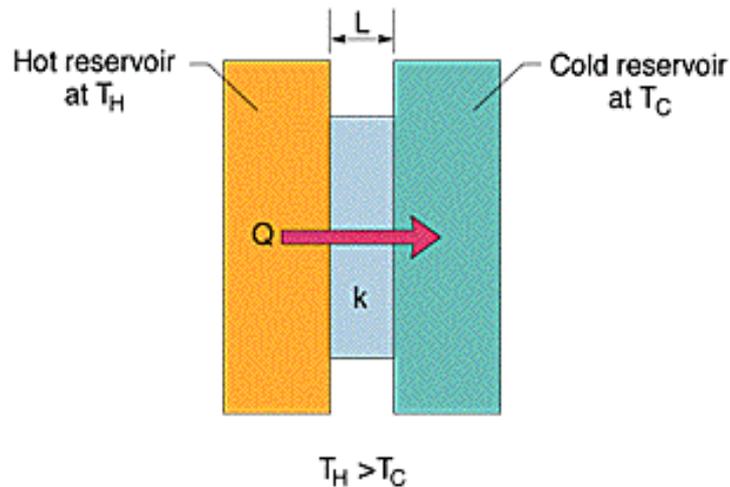
COMPOSIÇÃO DO AR SECO

GÁS	% VOLUME
Nitrogênio	78,08
Oxigênio	20,95
Argônio	0,93
Dióxido de Carbono	0,033
Neon	0,001 8
Hélio	0,000 524
Metano	0,000 2
Criptônio	0,000 11
Hidrogênio	0,000 05
Xenônio	0,000 008 7



Mecanismos de transferência de calor

- **Condução:** energia transferida átomo a átomo.



$$H = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_H - T_C}{L}$$

k – a condutividade térmica do material.

$$R = \frac{L}{k}$$

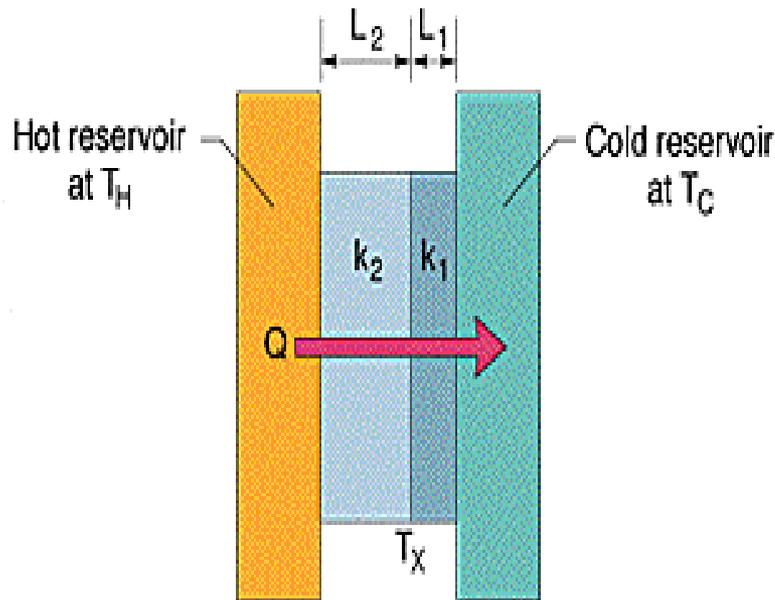
TABLE 19-6 SOME THERMAL CONDUCTIVITIES ^a

	k (W/m-K)		(W/m-K)
<i>Metals</i>		<i>Building Materials</i>	
Stainless steel	14	Polyurethane foam	0.024
Lead	35	Rock wool	0.043
Aluminum	235	Fiberglass	0.048
Copper	401	White pine	0.11
Silver	428	Window glass	1.0
<i>Gases</i>			
Air (dry)	0.026		
Helium	0.15		
Hydrogen	0.18		

R – a resistência térmica a condução de calor.

Mecanismos de transferência de calor

Condução através de uma parede composta



$$H = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_X - T_C)}{L_1}$$

$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$

$$H = \frac{A (T_H - T_C)}{L_1/k_1 + L_2/k_2}$$

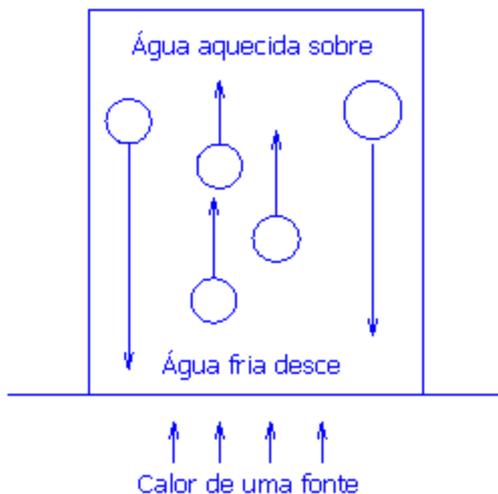
$$H = \frac{A (T_H - T_C)}{\sum (L/k)} = \frac{A (T_H - T_C)}{\sum R}$$

R – a resistência térmica a condução de calor. **Sistema de isolamento em multicamadas.**

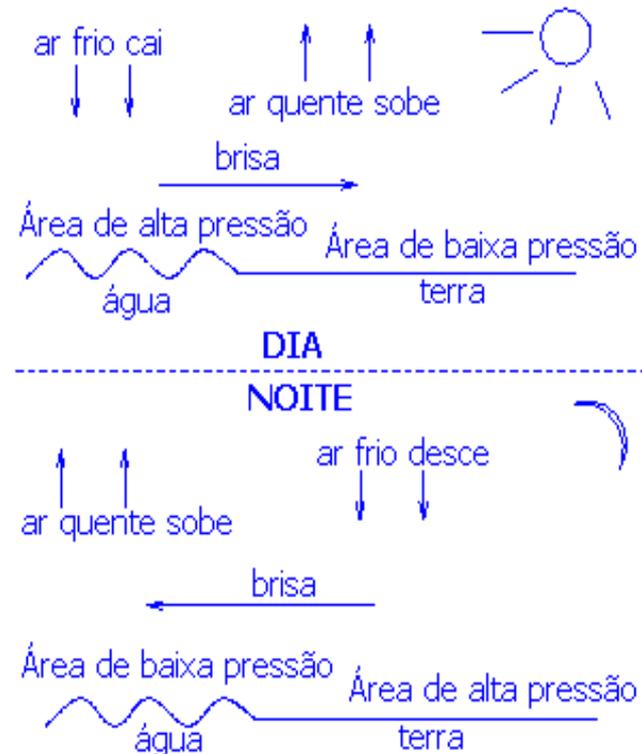
A resistência térmica se soma quando em série.

Mecanismos de transferência de calor

- **Convecção:** sistemática de movimento dos fluídos em resposta a variações de densidade associadas a variações de temperatura. Ar quente é menos denso e sobe. O ar frio é mais denso e desce. Correntes de convecção são efetivas formas de trocar calor.



Formação de brisas próximas à grandes quantidades de água.



Mecanismos de transferência de calor

1) Transferência de calor por condução em gases

O mecanismo de transferência de calor em gases depende da pressão. Vamos dividir em duas partes: (a) gases rarefeitos, onde a distância entre as placas é da ordem do livre caminho médio e (b) gases em atmosfera onde a distância entre as placas é muito maior do que o livre caminho médio. No primeiro caso podemos estudar sistemas sob vácuo, enquanto no segundo caso, situações em atmosfera ambiente, por exemplo.

(a) Transferência de calor por condução em gases rarefeitos (vácuo)

Se a pressão do sistema é baixa, a potência de transferência de calor por condução gasosa, dq/dt , na pressão p , entre duas placas paralelas de mesmo material, de área A , nas temperaturas T_1 e T_2 é dada pela expressão (2):

$$P_{\text{condução em gás rarefeito}} = dq/dt = C a_0 p A \Delta T \quad (\text{SI}) \quad (2)$$

onde C é uma constante, a_0 é o coeficiente de acomodação e $\Delta T = T_2 - T_1$ (para $T_2 > T_1$) é a diferença de temperatura entre as placas. A constante C tem os valores 0,028; 0,059 e 0,016 (no SI) respectivamente para o hélio, hidrogênio e ar. O coeficiente de acomodação a_0 depende do gás e do material das placas. Para ar entre placas de aço, $a_0 = 0,33$ (no SI).

No caso de duas cascas cilíndricas com pouca diferença entre seus diâmetros, podemos usar esta equação (2) como aproximação.

(a) Transferência de calor por condução em gases não rarefeitos

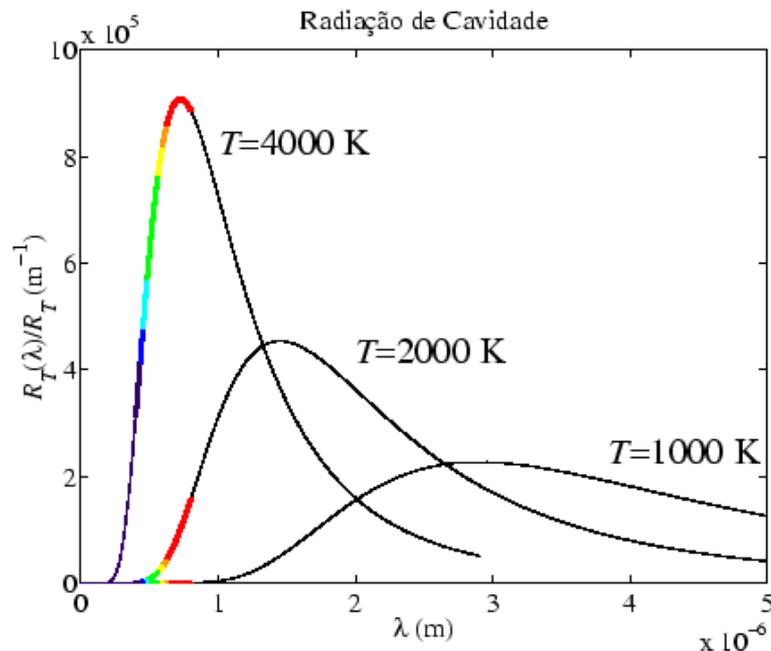
Neste caso a equação é similar à condução em sólidos (ver item 3):

$$P_{\text{condução em atmosfera gasosa}} = k A \Delta T / z \quad (3)$$

onde k é condutividade térmica do gás ($k_{\text{ar}} \sim k_{\text{N}_2} = 0,026 \text{ W/m.K}$) e z é a distância entre as placas.

Mecanismos de transferência de calor

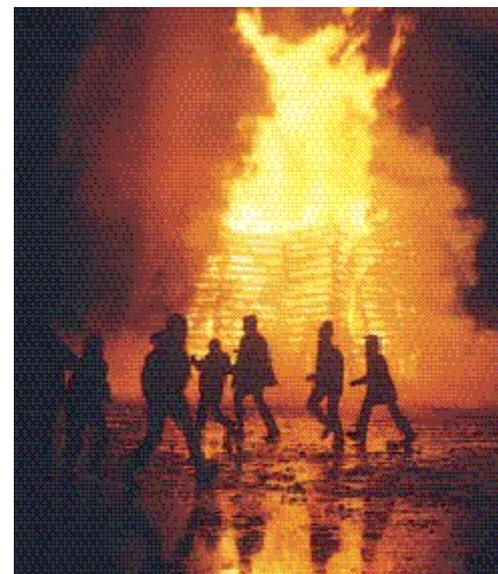
- **Radiação:** Um corpo absorve e libera calor através de ondas eletromagnéticas. Radiação Térmica. Este troca de calor é a única que ocorre no vácuo.



Potência térmica irradiada.

$$P_\gamma = \sigma \varepsilon A T^4$$

σ é a constante de Stefan-Boltzmann
 ε é a emissividade (varia entre 0 e 1 (corpo negro)).



Potência térmica absorvida.

$$P_a = \sigma \varepsilon A T_{amb}^4$$

$$P_{liq} = P_a - P_\gamma = \sigma \varepsilon A (T_{amb}^4 - T^4)$$

Mecanismos de transferência de calor

- **Radiação:** Um corpo absorve e libera calor através de ondas eletromagnéticas. Radiação Térmica. Este troca de calor é a única que ocorre no vácuo.

- **Multicamada**

Isolação térmica por múltiplas paredes Consideremos um dewar com um anteparo de radiação no espaço em vácuo semelhante ao da Fig. 6. Se a emissividade do anteparo for a mesma que a das paredes do espaço em vácuo, a transferência de calor por radiação entre paredes será reduzida à metade daquela que seria sem a blindagem. Isso sugere que aumentar o número de anteparos de radiação aumentaria ainda mais a capacidade de isolação térmica de um dewar.

De fato, se N anteparos de radiação, todos no volume em vácuo, forem interpostos entre a parede do núcleo contendo o líquido criogênico e a parede externa do dewar, a potência de radiação (em W/cm^2) emitida pela parede externa será

$$dq/dt = (1/2) (N + 1) - 1 \varepsilon \sigma (T_E^4 - T_0^4)$$

onde T_E e T_0 são as temperaturas da face externa e da face do núcleo contendo o líquido, respectivamente.

σ é a constante de Stefan-Boltzmann

ε é a emissividade (varia entre 0 e 1 (corpo negro)).

Mecanismos de transferência de calor

- **Radiação:** Um corpo absorve e libera calor através de ondas eletromagnéticas. Radiação Térmica. Este troca de calor é a única que ocorre no vácuo.

- **Multicamada**



Figura 6. Dewar de metal mostrando o anteparo de radiação de cobre no espaço em vácuo e o reservatório de carvão ativado (em baixo).

Product Performance Index

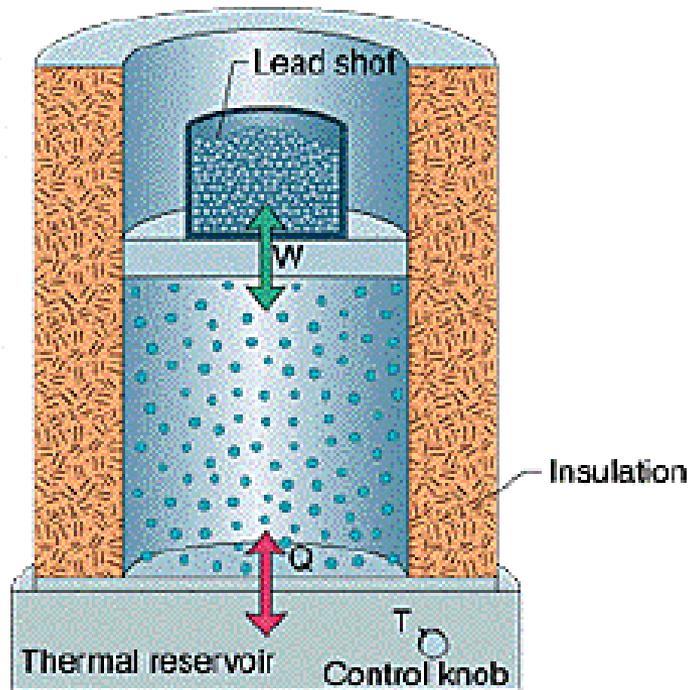
Performance	Unit	Aluminum Foil	Cryogenic Insulation Paper
Weight	g/m ²	16±2	12±2
Thickness	mm	0.0065	≤0.06
Tensile Strength	KN/m	/	≥0.03
Harmful Elements	%	pb<0.01cd<0.01As<0.01	No
Width	mm	40-2400	40-2400
Thermal Conductivity	w/mk	<0.00015	



Pó	Tamanho	Densidade (g/cm ³)	k[microwatt/(cm K)]
Silica aerogel	0,025 μm	0,10	21
Silica	0,015-0,02 μm	0,06	21
Perlite expandida	-80 mesh	0,14	10
Alumina	-50-100mesh	2,0	18
Esferas fenólicas	25-100 μm	0,2	13
Silicato de cálcio	0,02-0,07 μm	0,36	5,5

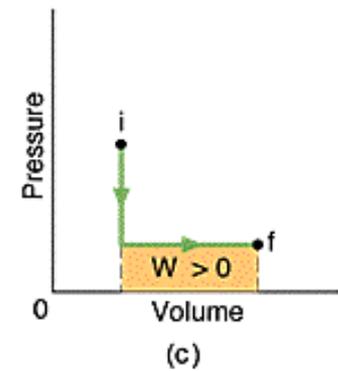
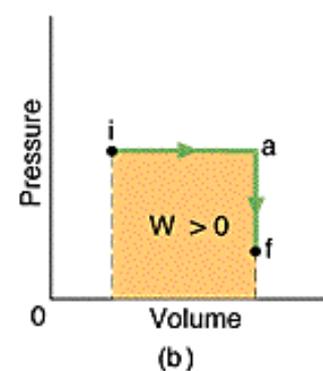
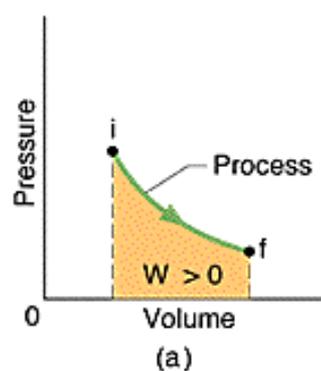
Primeira Lei da Termodinâmica

- Conservação de energia: relação entre calor, temperatura?



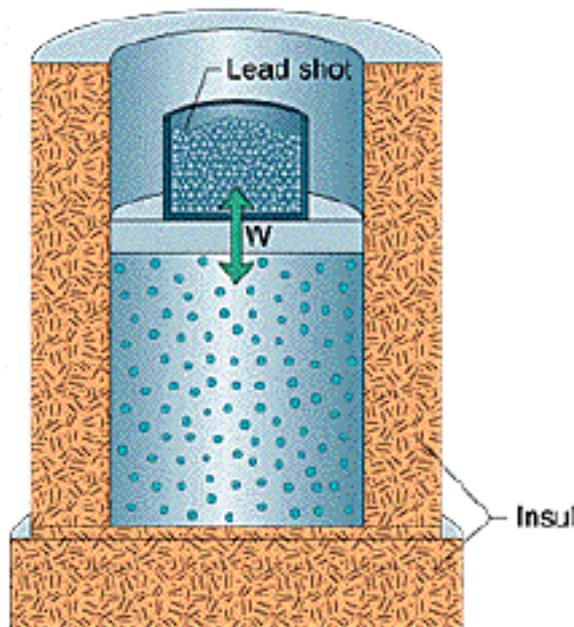
$$Q = W + \Delta E_i$$

$$E_i \propto T$$



Primeira Lei da Termodinâmica

- **Processos Adiabáticos:** É um processo que ocorre tão rapidamente ou em um sistema tão isolado que não há transferência de calor.



$$Q = W + \Delta E_i$$

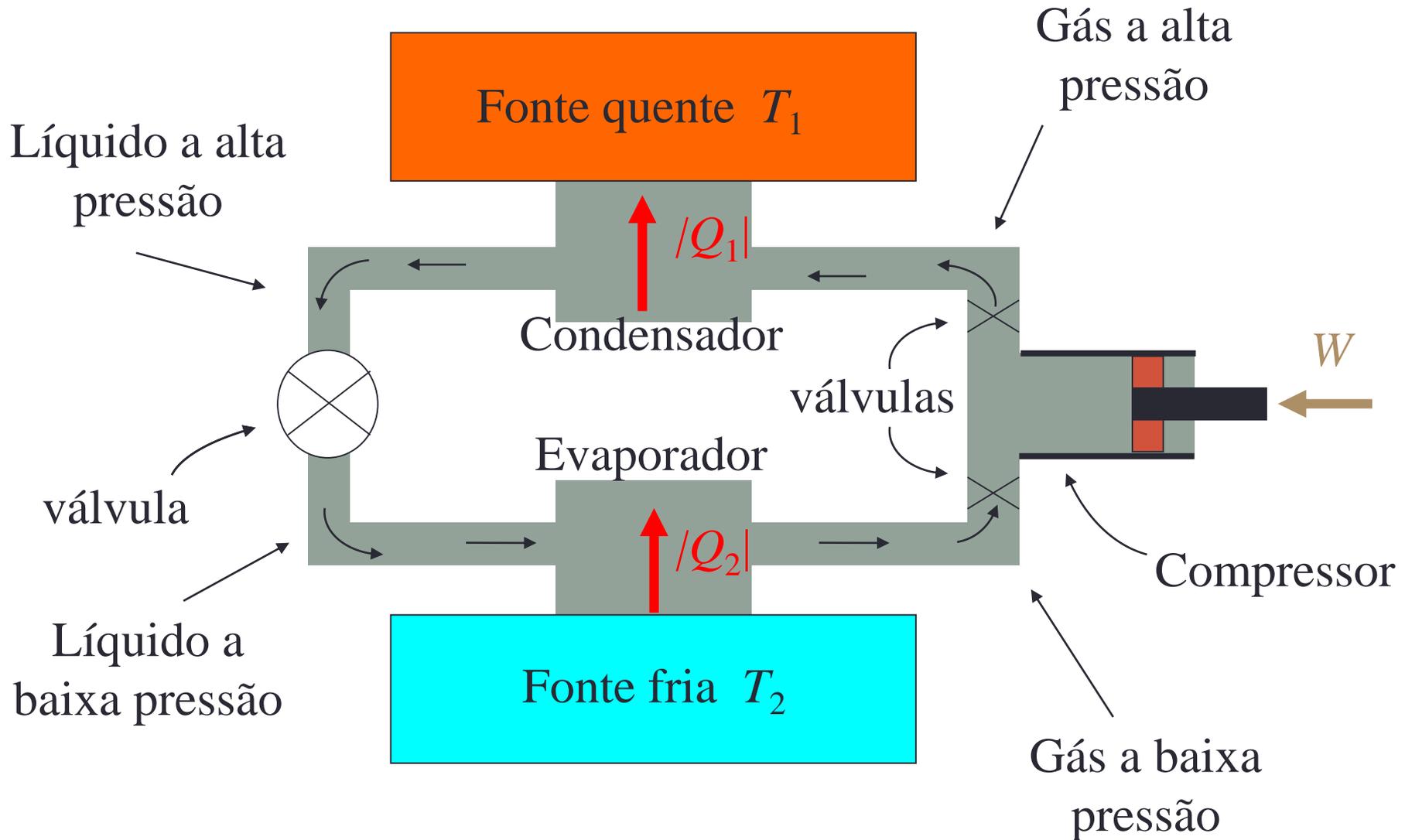
$$Q = 0$$

$$\Delta E_i = -W$$

Quando gás passa por uma expansão adiabática,
Sua temperatura diminui.

Quando gás passa por uma compressão adiabática,
Sua temperatura aumenta.

Refrigerador



Refrigerador

O diagrama ao lado representa o processo cíclico de um refrigerador e $T_1 > T_2$

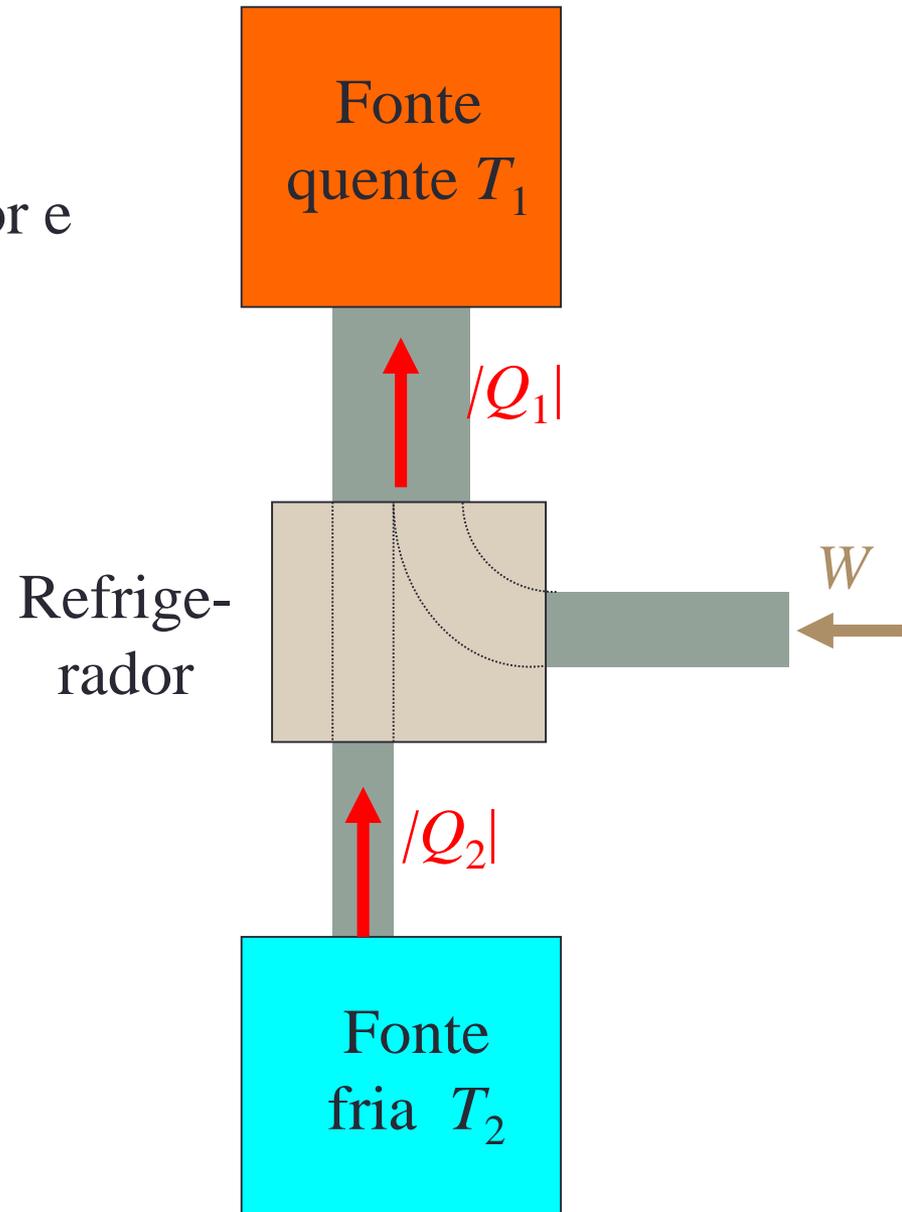


$$\Delta U = 0 \Rightarrow W = Q_1 + Q_2$$

Como $Q_1 < 0$, $Q_2 > 0$ e $W < 0$



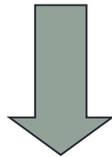
$$|W| = |Q_1| - |Q_2|$$



Refrigerador

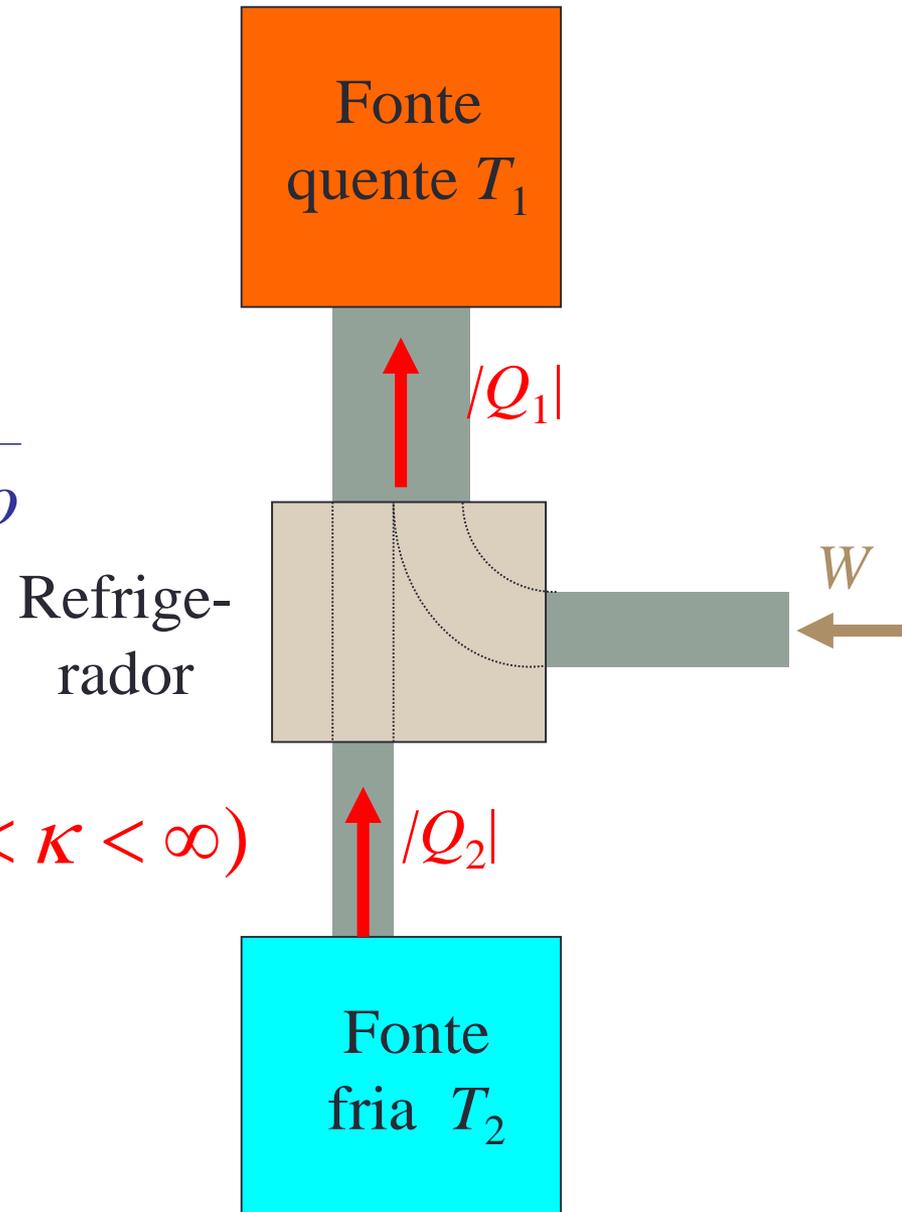
O coeficiente de desempenho de um refrigerador

$$\kappa = \frac{|Q_2|}{|W|} = \frac{\text{calor absorvido}}{\text{trabalho fornecido}}$$



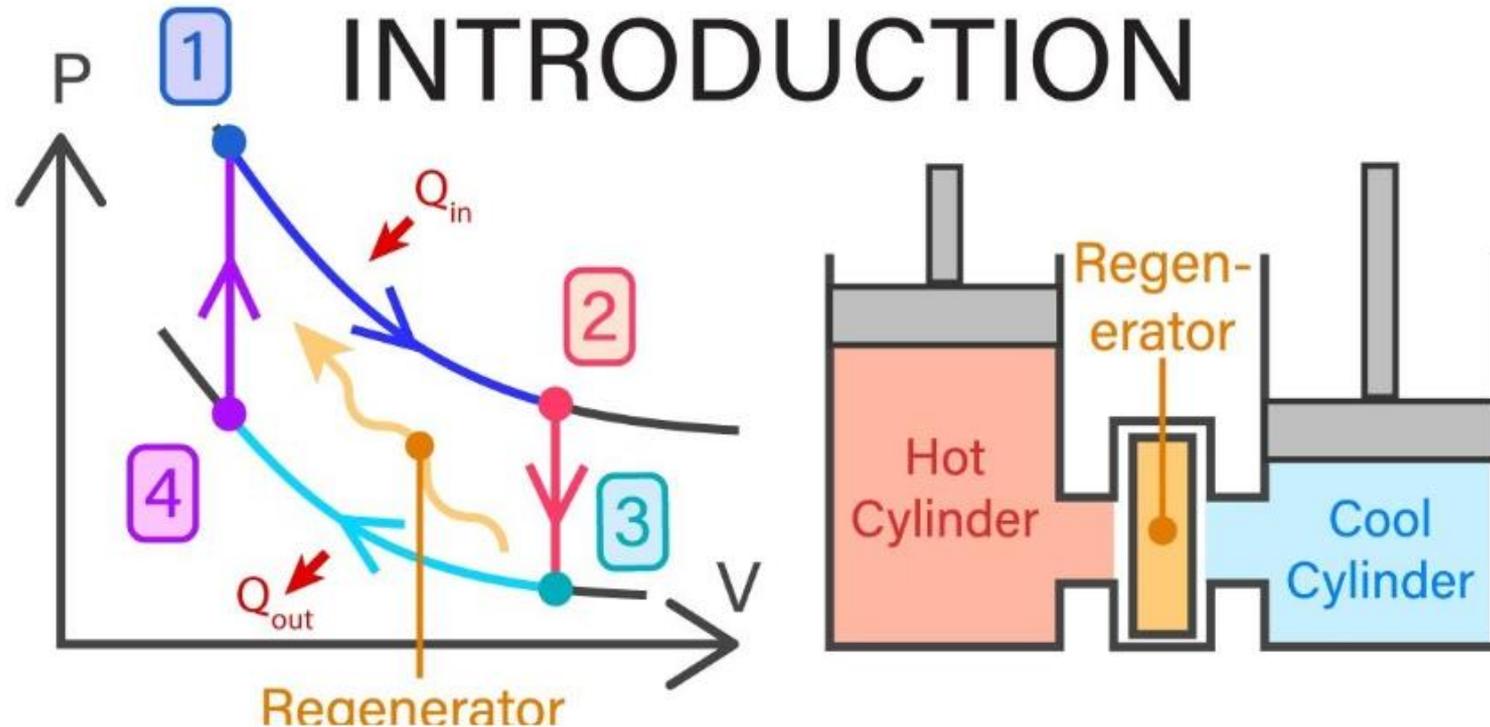
$$\kappa = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|}$$

$$(0 < \kappa < \infty)$$



Ciclo de Stirling: Duas isotermas e duas isocóricas.

STIRLING CYCLE INTRODUCTION



Ciclo de Collins: Liquefatores de He e N₂

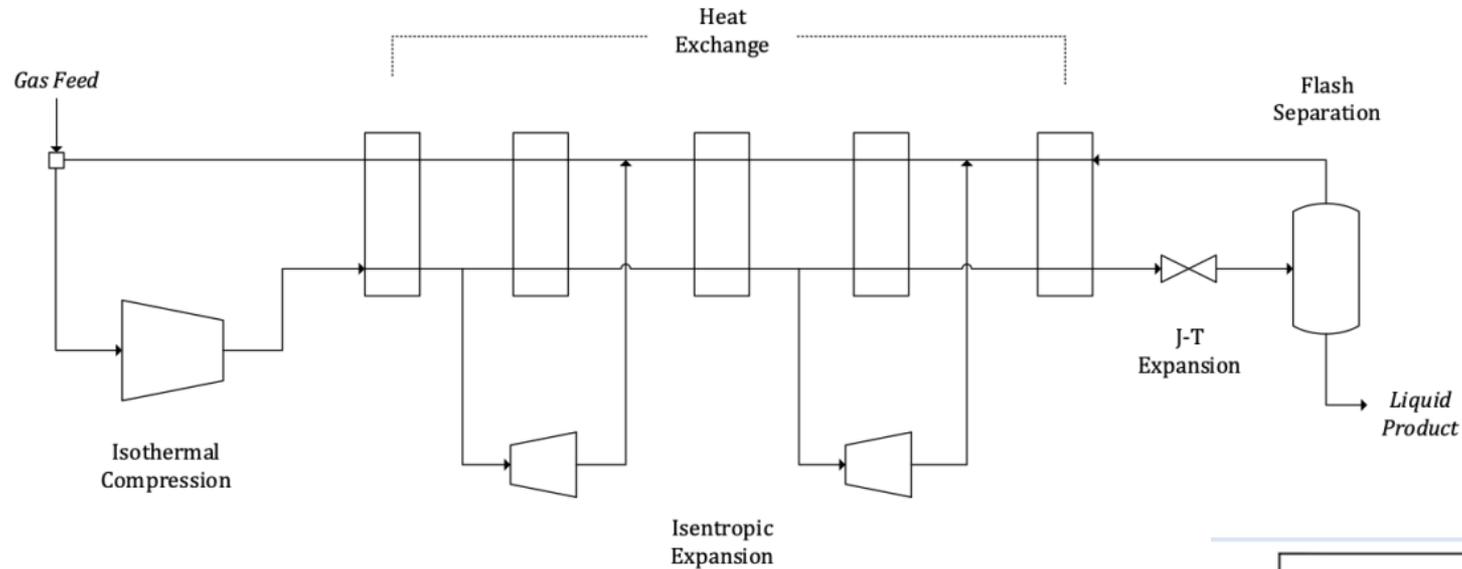


Figure 1. Diagram of the standard Collins cycle.

O método de expansão Joule-Thompson envolve um gás ou líquido à pressão P_1 fluir para uma região de pressão mais baixa P_2 sem alteração significativa na energia cinética. A expansão é um processo irreversível no qual a entalpia permanece constante. Nos liquefatores, na expansão, o trabalho é realizado pelo fluido, causando uma diminuição da energia interna e de sua temperatura.

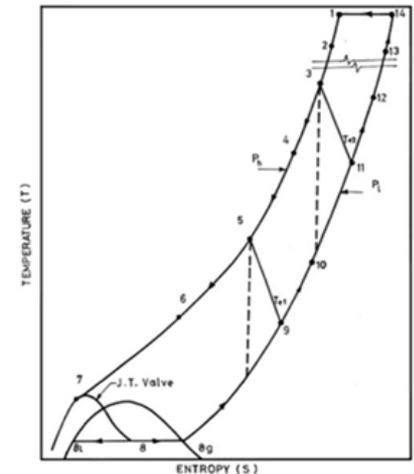


Figure 2.4. T-S diagram of Collins Helium Liquefaction Cycle

Ciclo de Collins: Liquefatores de He e N₂

O método de expansão Joule-Thompson (ou Joule-Kevin) envolve um gás ou líquido à pressão P_1 fluir para uma região de pressão mais baixa P_2 sem alteração na entalpia ($H = \Delta U + PV$) que permanece constante. Nos liquefatores, na expansão, o trabalho é realizado pelo fluido, causando uma diminuição da energia interna e de sua temperatura.

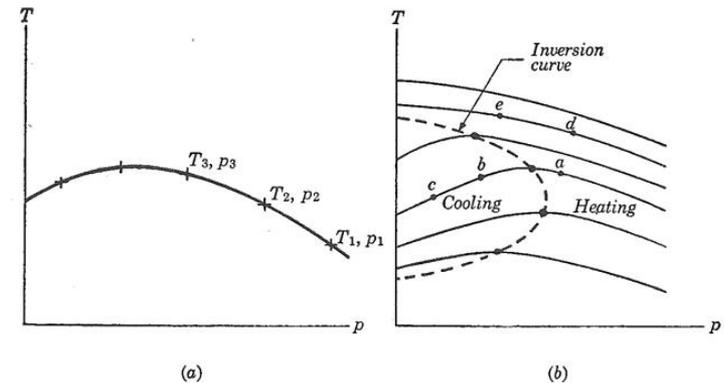
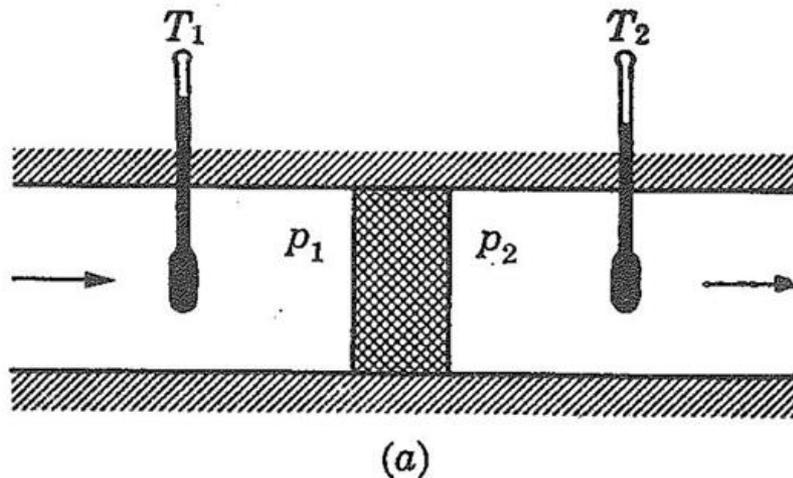


Figura 2.2. (a) Pontos de igual entalpia (compartmento 2). (b) Família de curvas isentálpicas para um mesmo gás, e curva de inversão (compartmento 2).

LHe

Hélio líquido

De onde vem o He: vem do gás natural (geralmente metano), que pode ter até 0,5 % de hélio em alguns lugares.

Temperatura de liquefação: 4 K

Distribuição no IFGW: Dewars

Armazenamento: Dewars

Recuperação no IFGW: SIM

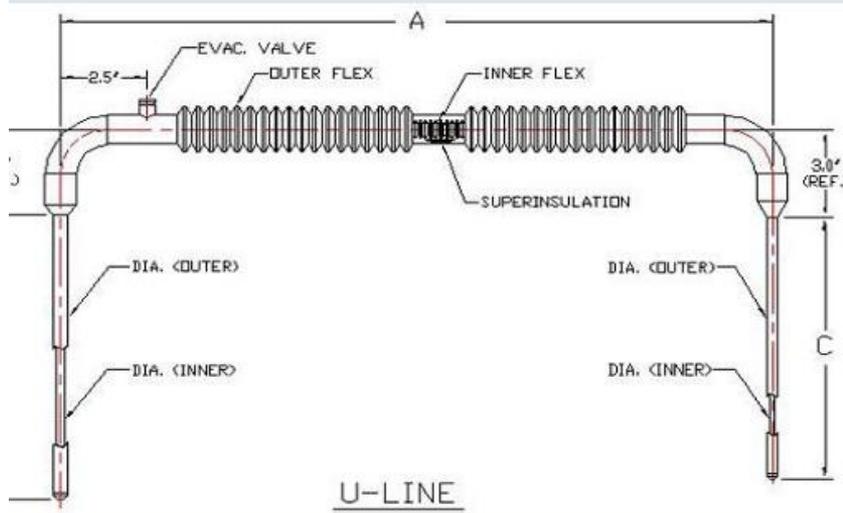
Preço ~ R\$ 500-1000 /L
(baixa disponibilidade)

Preço (GHe) ~ R\$ 200 /m³
- 1 /LHe

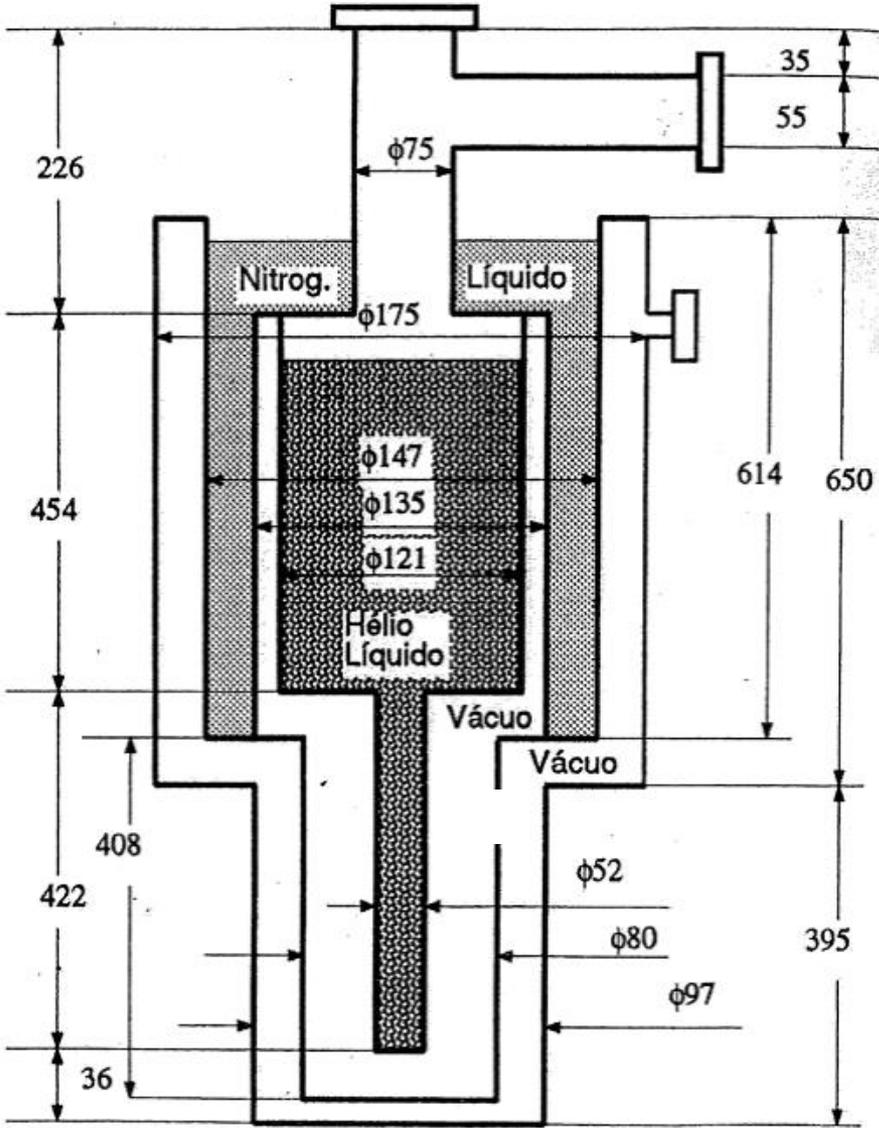
GÁS	% VOLUME
Nitrogênio	78,08
Oxigênio	20,95
Argônio	0,93
Dióxido de Carbono	0,033
Neon	0,001 8
Hélio	0,000 524
Metano	0,000 2
Criptônio	0,000 11
Hidrogênio	0,000 05
Xenônio	0,000 008 7



Linhas de Transferência de LHe



Criostatos



Criostatos (PuLArC – 100 L) Preço LAr ~ R\$ 30 / L

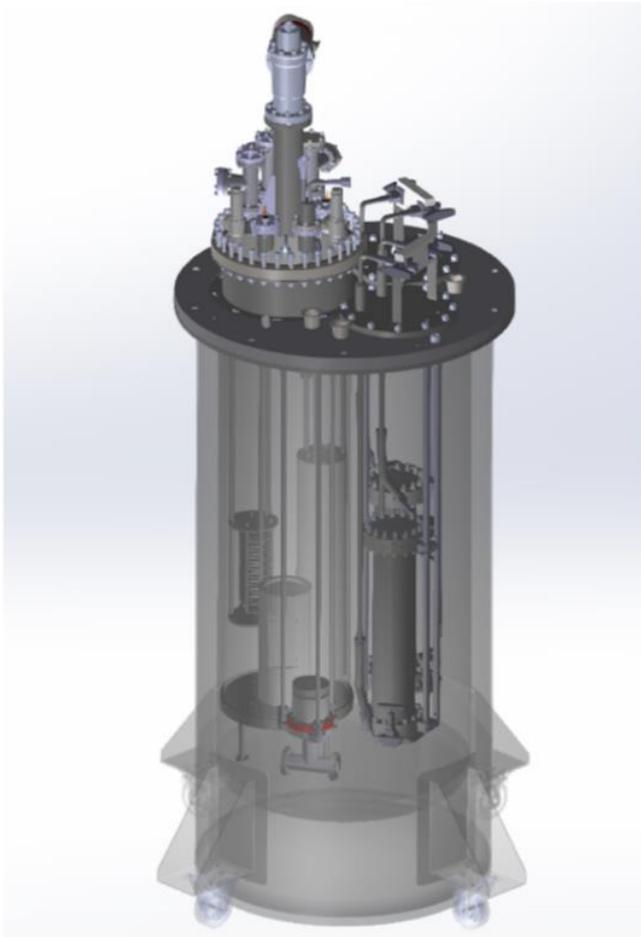
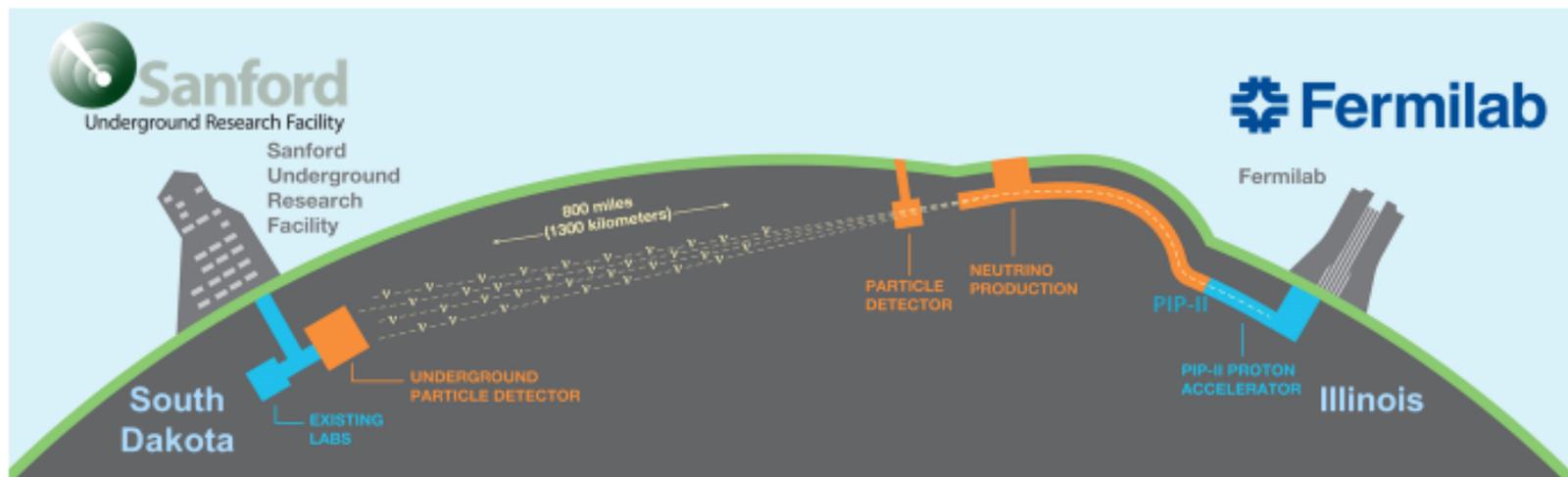


FIG. 6. UNILArC



<https://edms.cern.ch/ui/#!master/navigator/document?P:100896923:101077088:subDocs>

The LBNF/DUNE vision is achieved by groundbreaking international partnerships



Long Baseline Neutrino Facility – facilities with partner in-kind contributions

LBNF

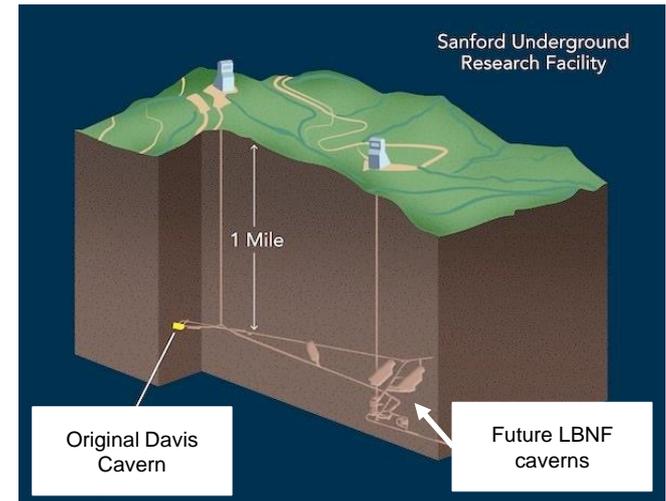
Deep Underground Neutrino Experiment – internationally led scientific collaboration that has major contributions from multiple international funding agencies, including DOE

DUNE

LBNF/DUNE: From Illinois to a mile underground in South Dakota

South Dakota:

- Surface and underground facilities
- Cryostats - Massive membrane cryostats to hold liquid argon
- Cryogenic systems (Nitrogen and Argon)
- DUNE “far” detectors – up to four liquid argon detector modules



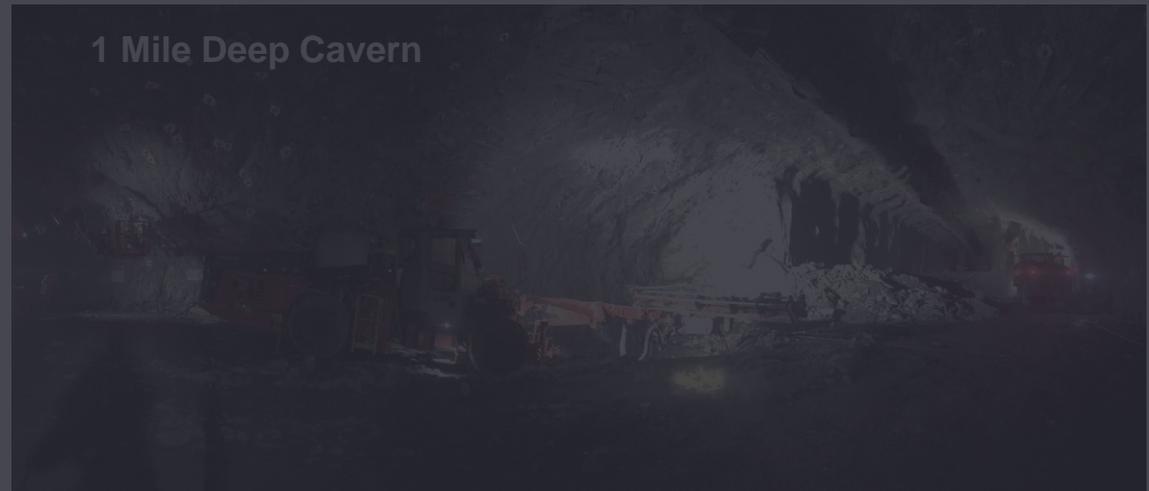
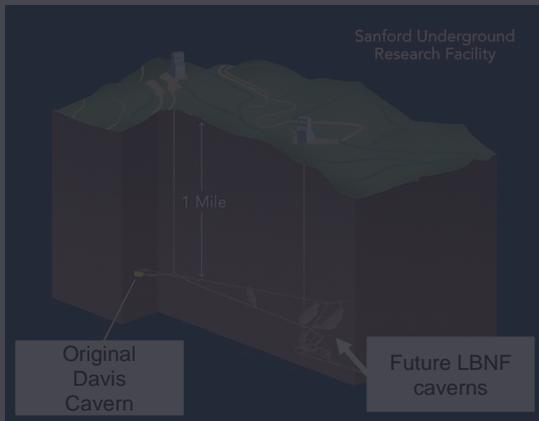
<https://unicamp.br/noticias/2024/08/16/evento-marca-fim-das-escavacoes-para-instalacao-de-laboratorio-subterraneo/>

LBNF/DUNE: From Illinois to a mile underground in South Dakota

South Dakota:

- Surface and underground facilities
- Cryostats - Massive membrane cryostats to hold liquid argon
- Cryogenic systems (Nitrogen and Argon)
- DUNE "far" detectors – up to four liquid argon detector modules

70,000 tons of LAr
(Purity < 100 part per trillion)



LBNF/DUNE: From Illinois to a mile underground in South Dakota

South Dakota:

- Surface and underground facilities
- Cryostats - Massive membrane cryostats to hold liquid argon
- Cryogenic systems (Nitrogen and Argon)
- DUNE "far" detectors – up to four liquid argon detector modules

70,000 tons of LAr (Purity 10 part per trillion)

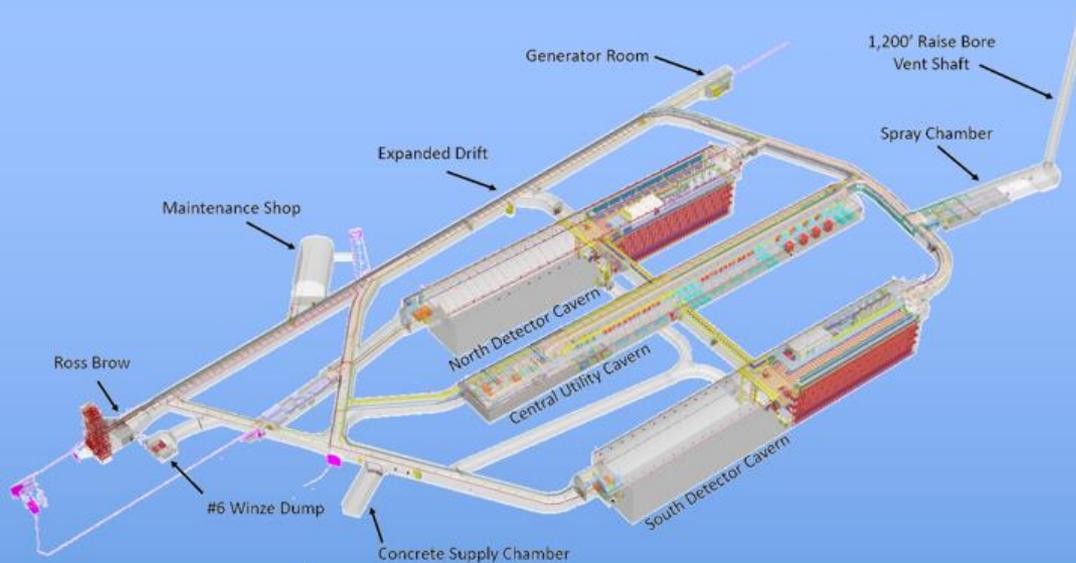


Olympic Pool full of Liquid Argon
(50m x 25m x 2m = 2.5M liters)



≈500 droplets of Oxygen
(25 mL)

DOE Project Scope – Far Site



At the far site, the LBNF project scope includes committed critical in-kind contributions from:



CERN – Membrane cryostats and portions of argon receiving facility (tanks)



Brazil/UNICAMP – Argon purification and recirculation systems



Switzerland/SERI – Argon condensing system



Poland/WUST – Internal cryogenics systems

and the DUNE international collaboration, consortia, and partners.

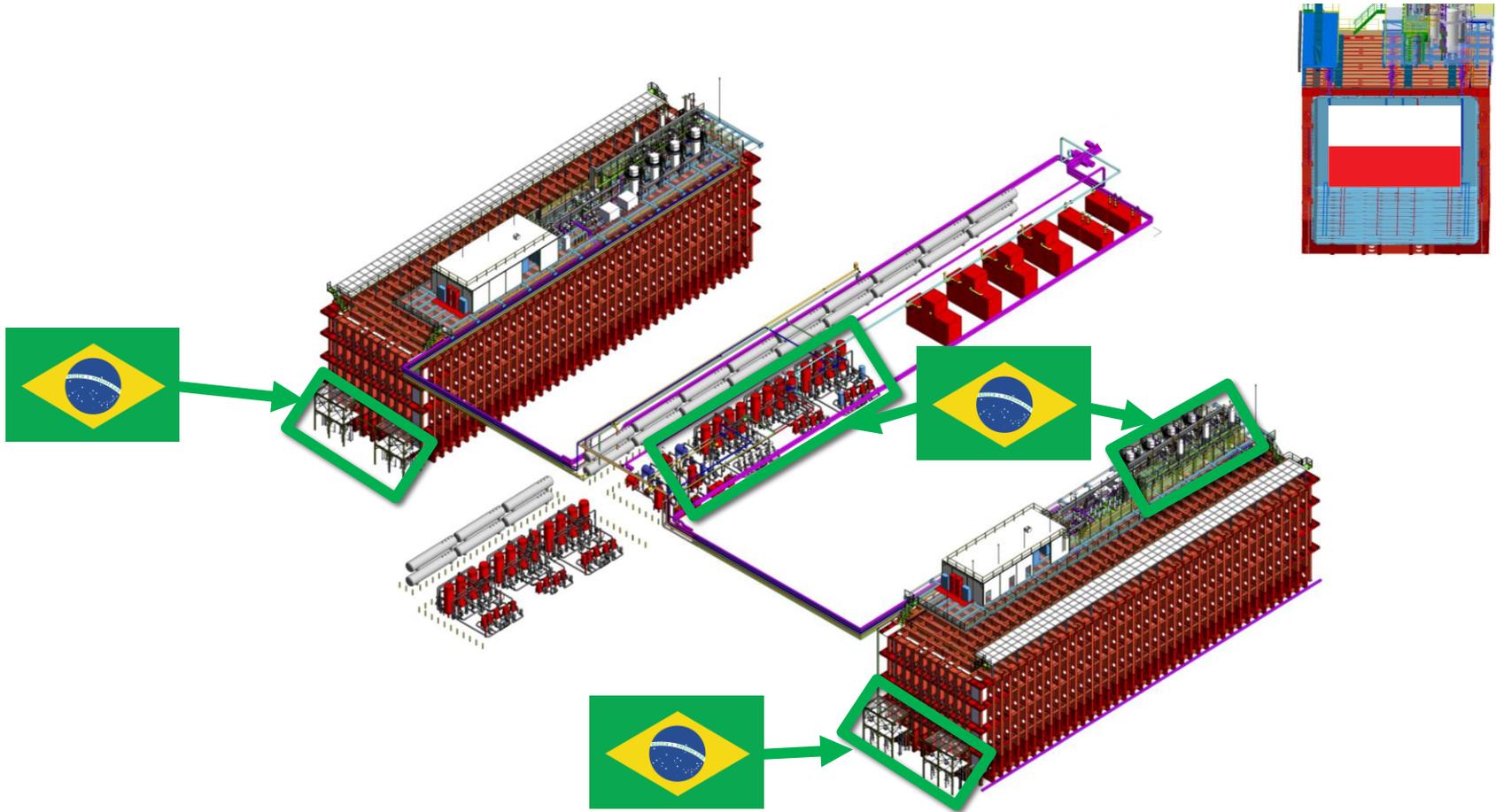


Thank you to all our partners!

WBS/Subproject	Scope
131.FSCFEXC/FSCF-Excavation	Project management, preliminary and final design, reliability/infrastructure upgrades, pre-excavation systems, and excavation work to support 4 detector modules.
131.FSCFBSI/FSCF-Building & Site Infrastructure	Project management, preliminary and final design, and construction of surface and underground utilities, and infrastructure outfitting of spaces for detector modules.
131.FDC/Far Detectors and Far Site Cryogenic Infrastructure	DUNE-US contributions to two DUNE detector modules; two cryostats & associated liquid argon; cryogenic systems to support two detector modules; installation and integration for two detector modules and cryogenic infrastructure

26 Sep 2022

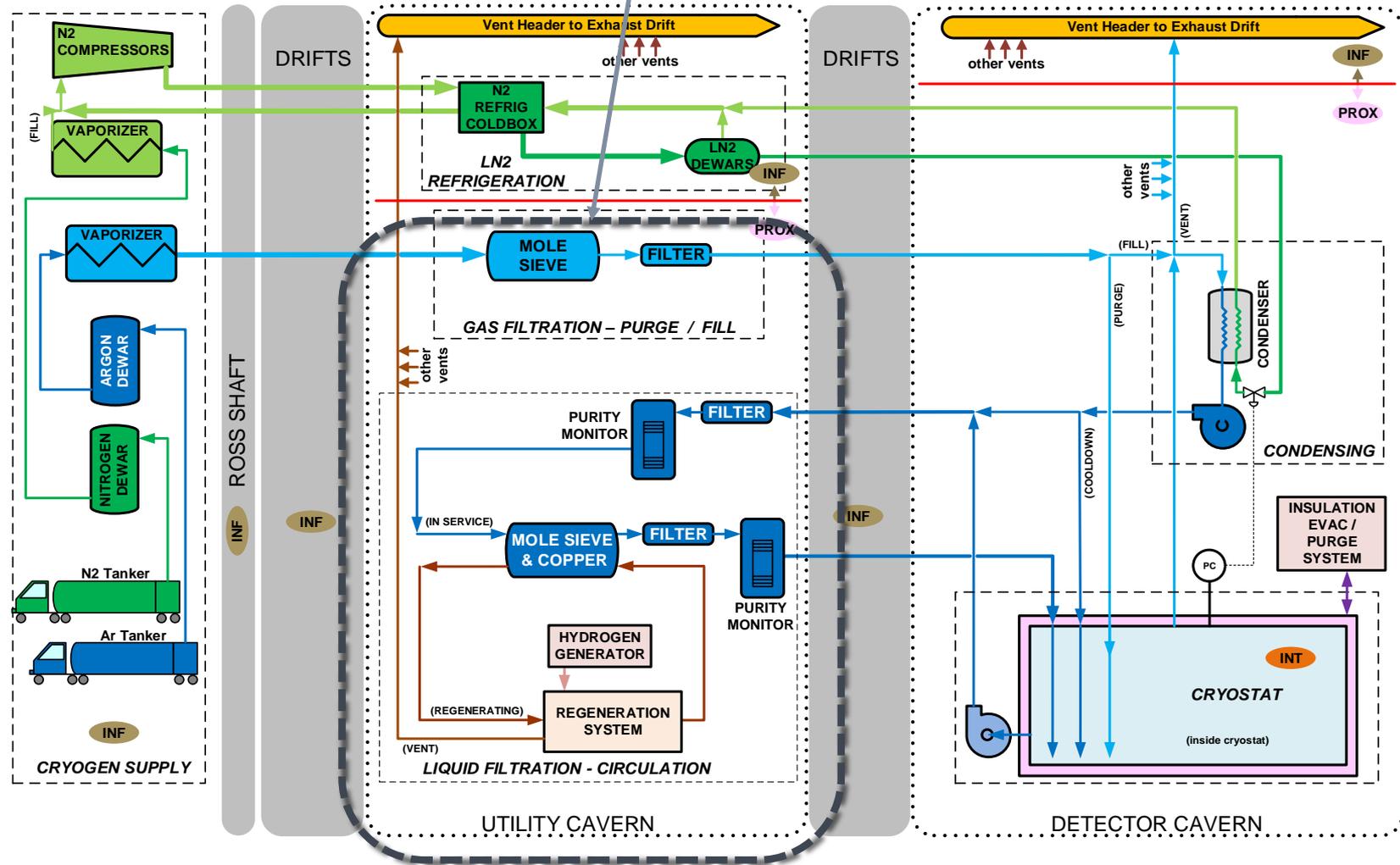
Far Site Cryogenics – Underground



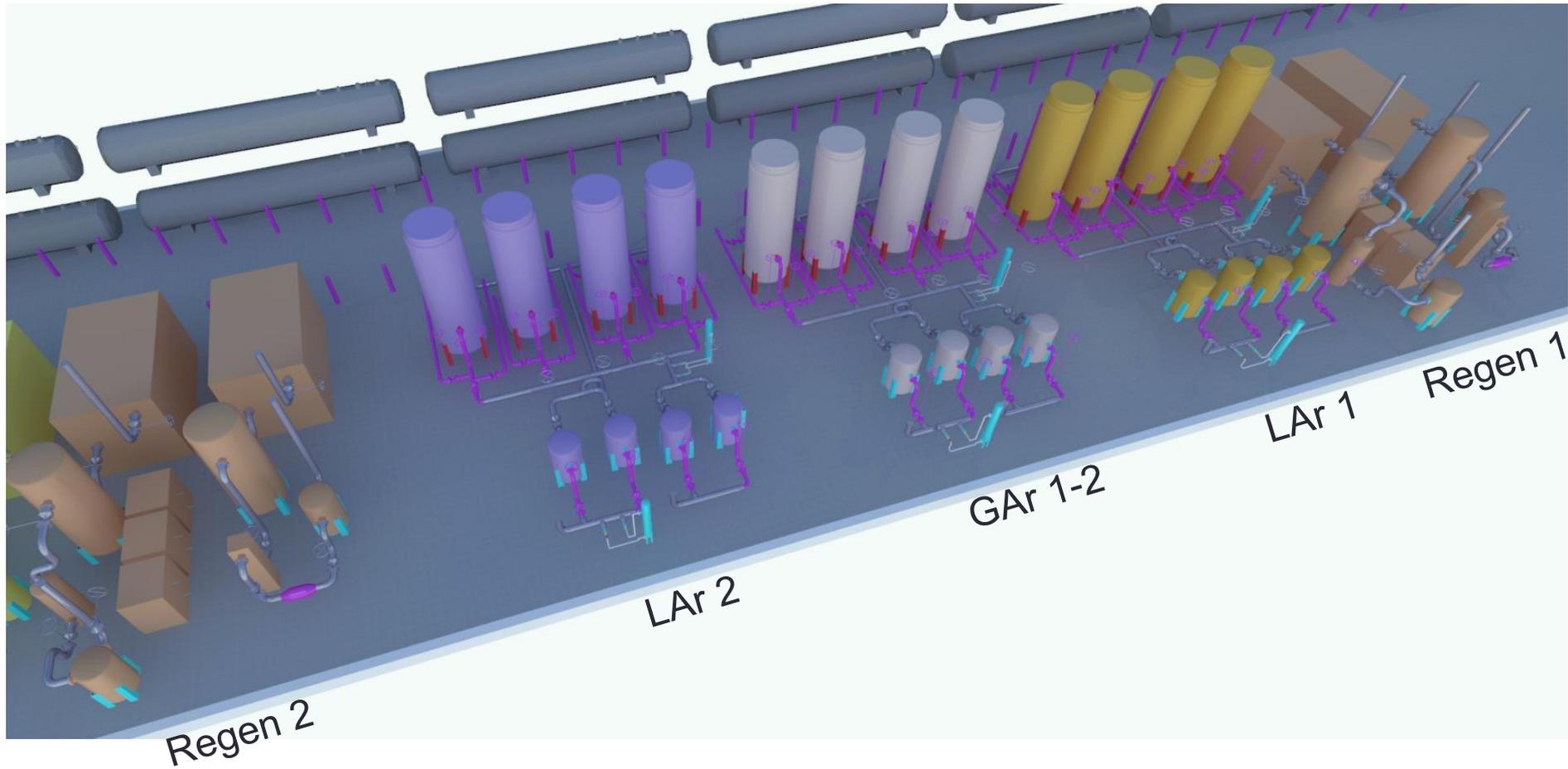
LBNF Cryogenics Process Flow Diagram

CUC scope to meet requirements

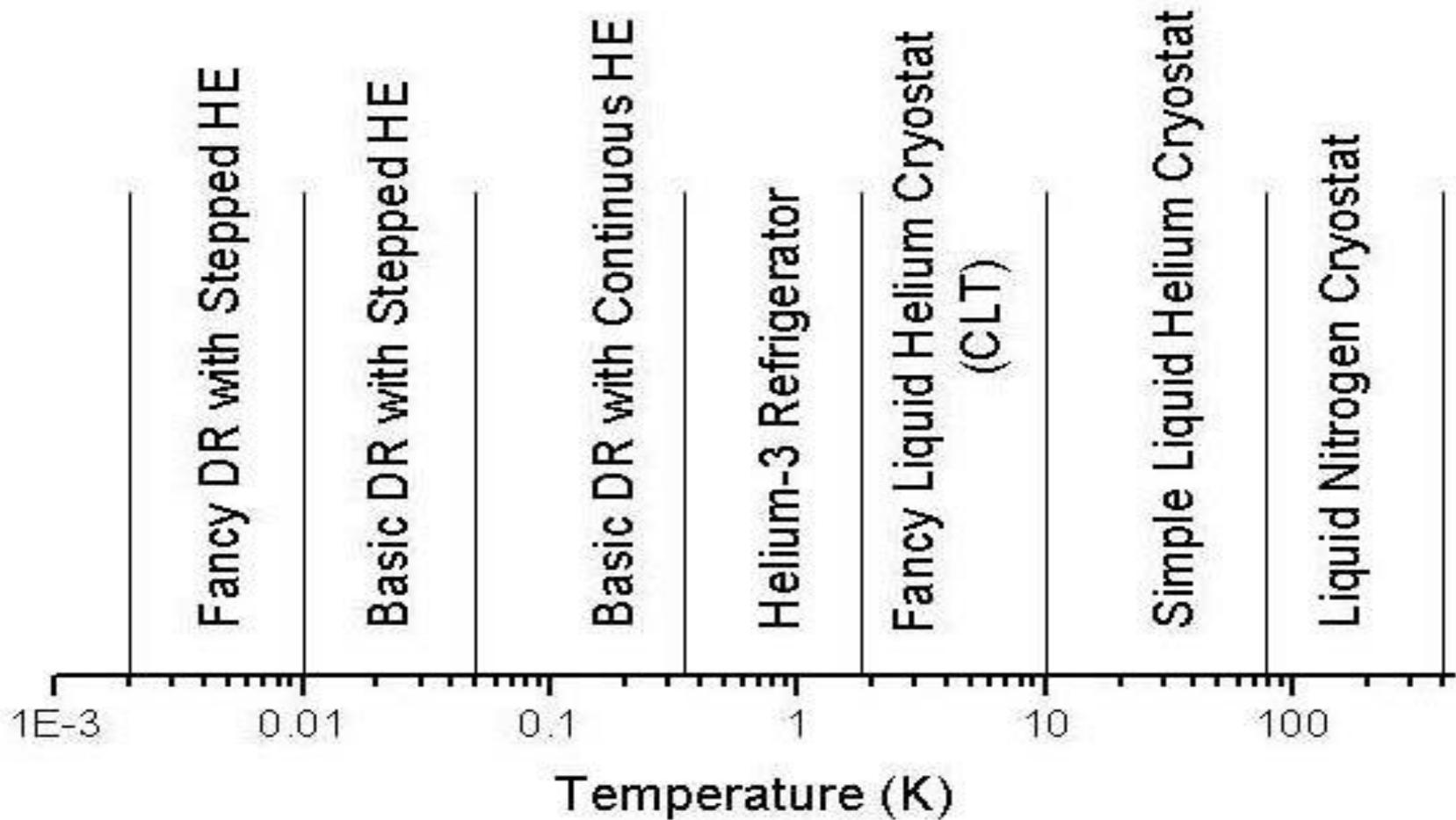
- Infrastructure
- Proximity
- Internal



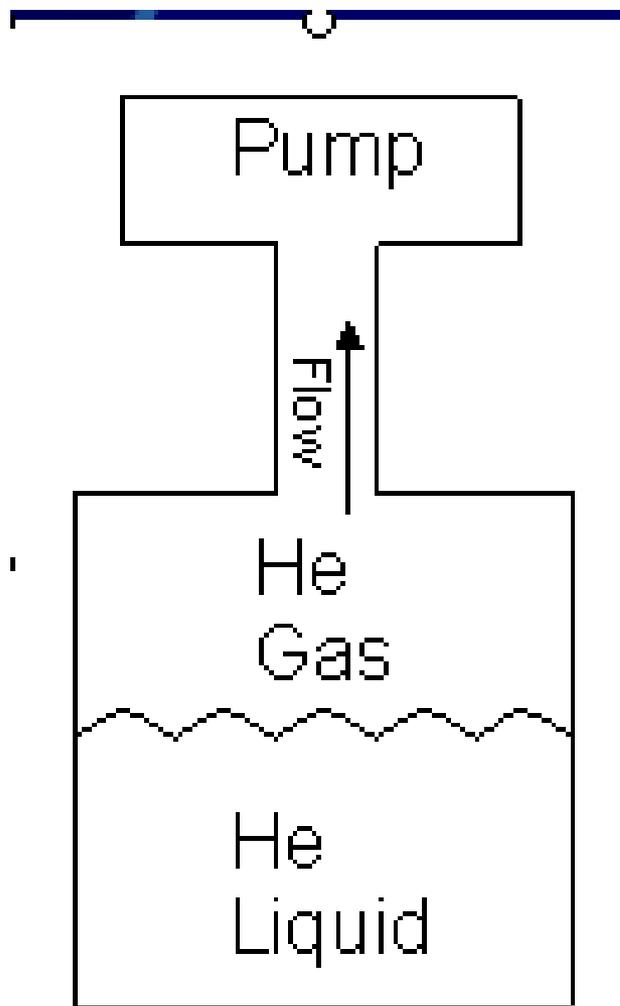
CUC Proximity Cryo 1 & 2 Layout



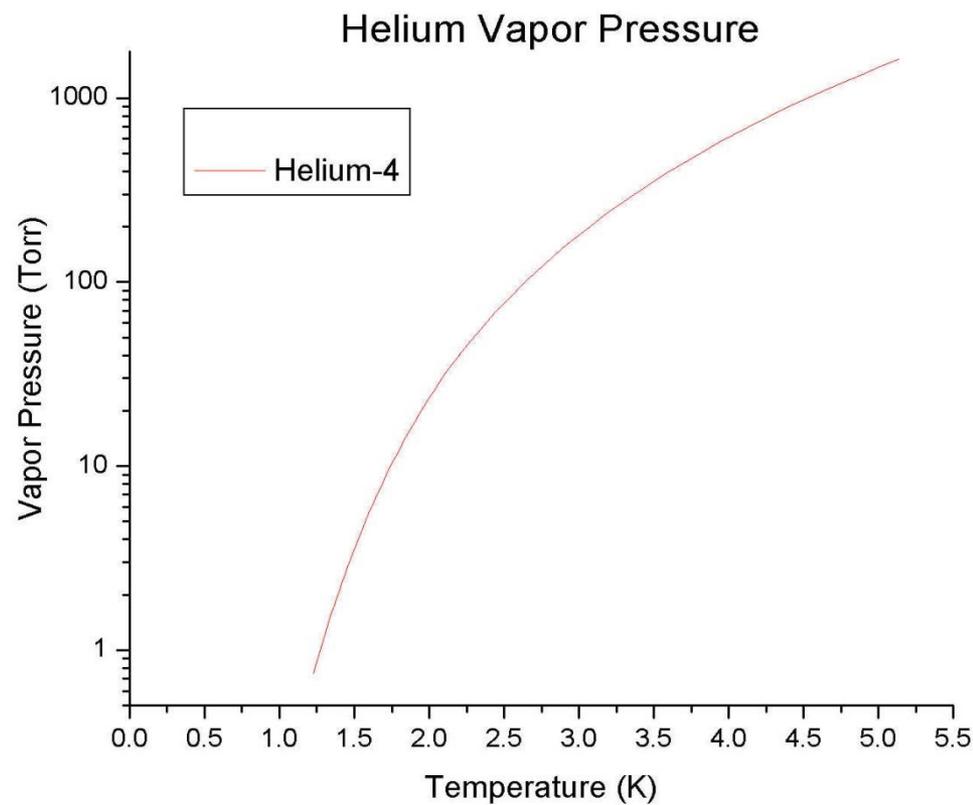
Temperature Ranges for Various Fridges (Approximate)

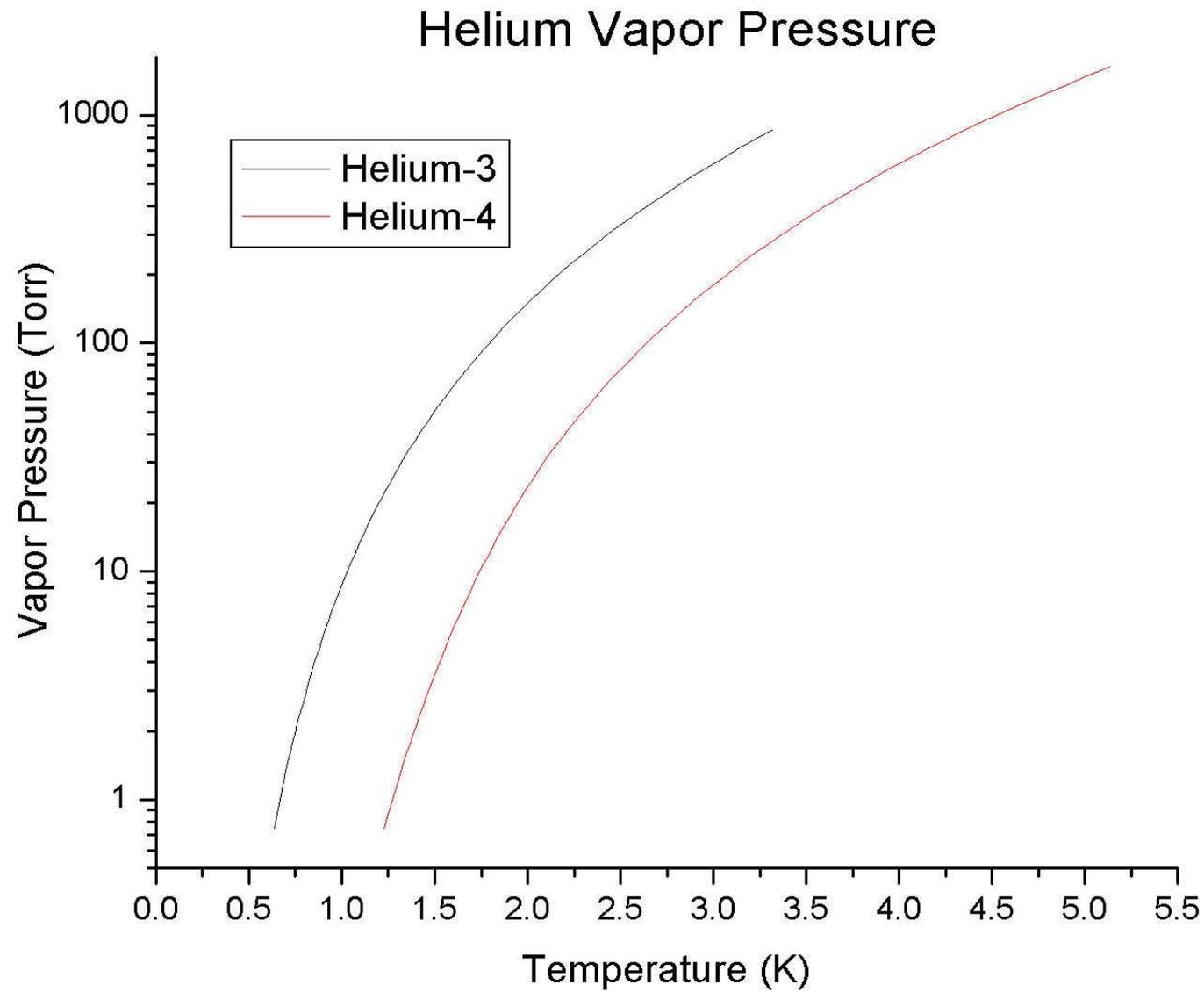


Bombeando He4



$$PV = nRT$$





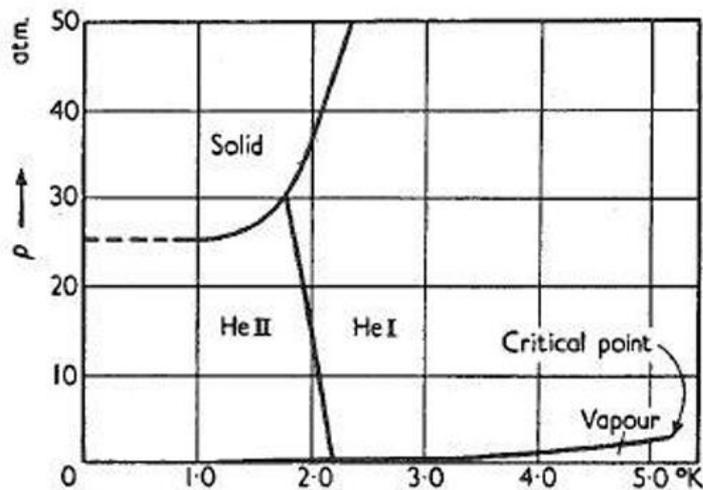
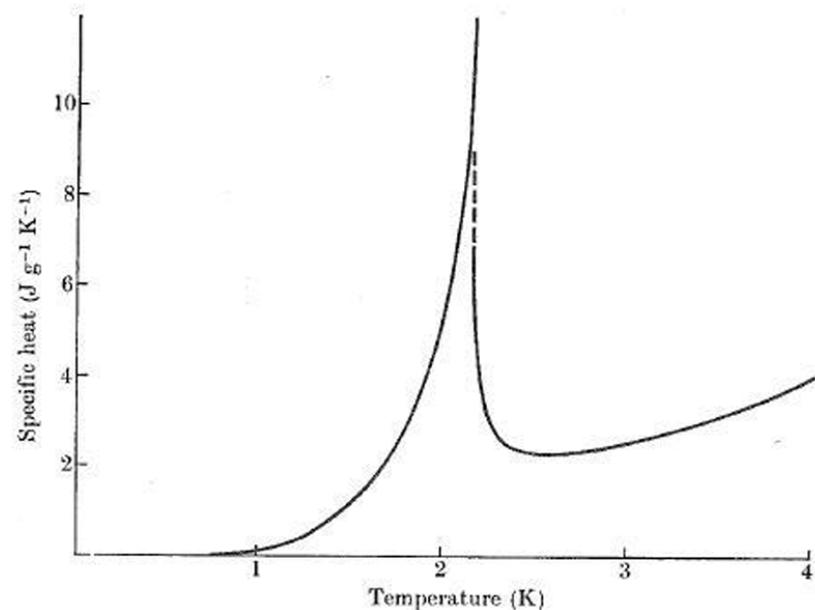


Figura 3. Curva pressão-temperatura para hélio



Transição de Fase λ (He superfluido) para $T \sim 2.2$ K em 1 atm. Uma transição de Fase que envolve uma mudança de entropia contínua de uma fase para outra (parâmetro de ordem) gera um pico no calor específico. (transição de segunda ordem!

Uma transição de fase de primeira ordem gera uma descontinuidade do calor específico devido a presença de um calor latente.

Refrigerador de diluição

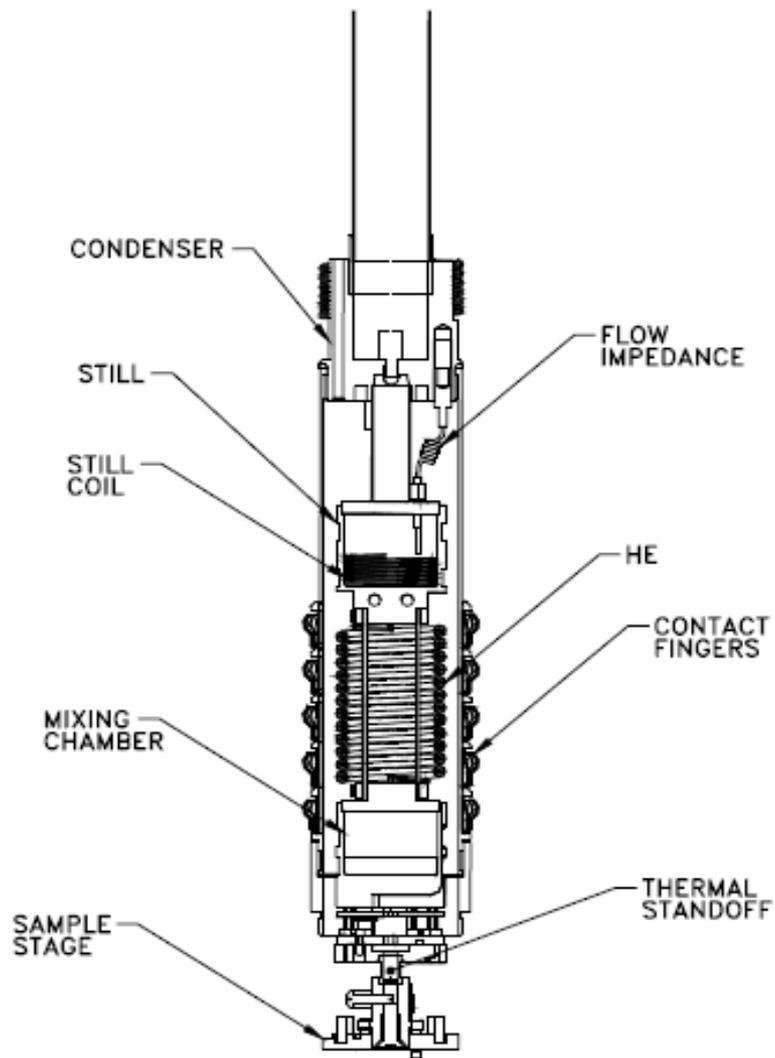
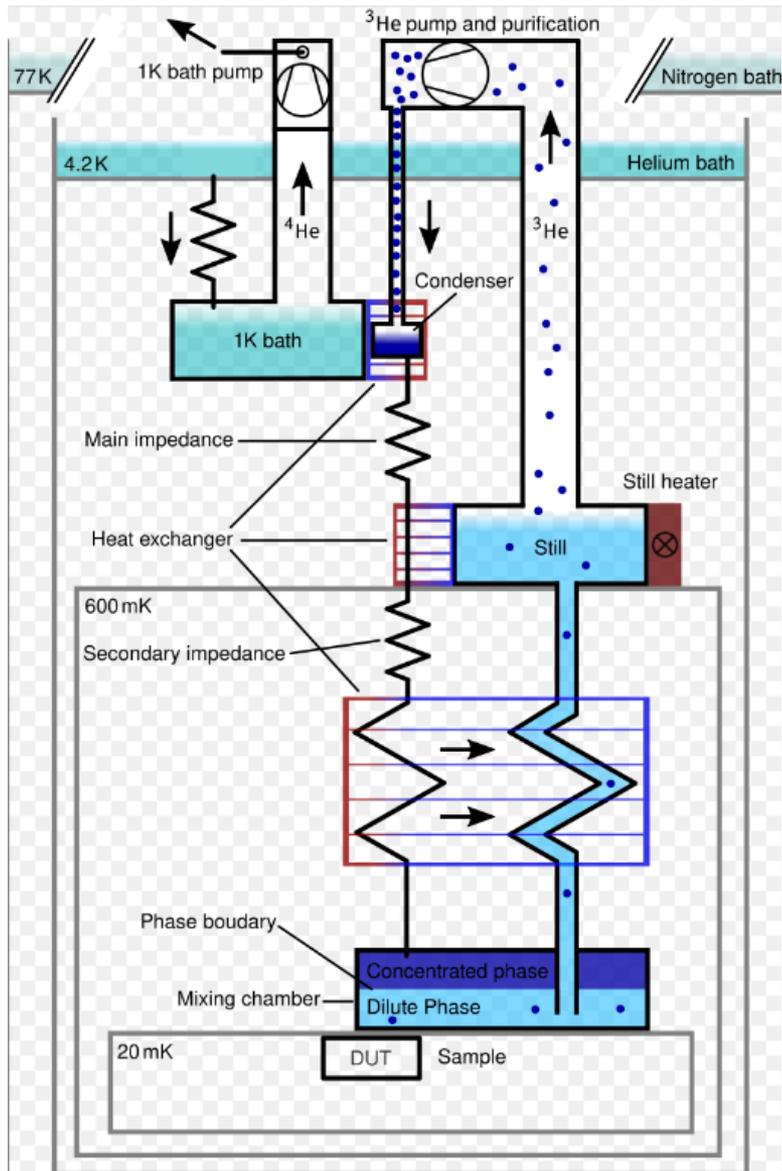


Figure 2-2. Dilution unit and condenser tube.



$$T_{\min} = 50 \text{ mK.}$$

Refrigerador de diluição



Este processo de refrigeração se utiliza de uma mistura de dois isótopos de hélio: hélio-3 e hélio-4. Quando resfriada abaixo de aproximadamente 900 mK a mistura passa por uma separação de fases espontânea para formar uma fase rica em ^3He (a fase concentrada) e uma fase pobre em ^3He (a fase diluída). Concentração finita da ^3He na Fase Líquida Diluída.

Poder de Resfriamento está na interface das fases na câmara da mistura.

Demagnetização Adiabática

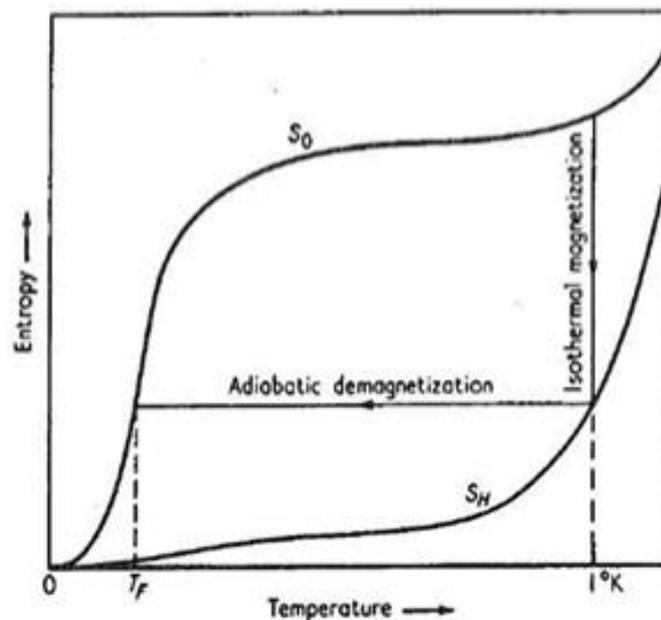
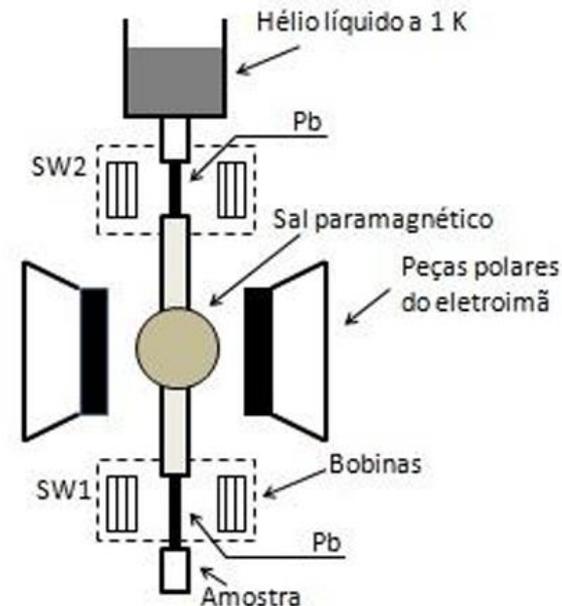


Figura1. Entropia de um sal paramagnético sem campo magnético aplicado (curva S_0) e com campo aplicado (curva S_H).



As equações abaixo^(*) (sistema SI) possibilitam determinar a queda de temperatura da substância no processo de desmagnetização adiabática.

$$T_F^2 = T_I^2 - 2T_I q/c$$

com q definido por

$$q = -\mu_0 C v H^2 / 2T_I$$

onde T_I e T_F são as temperaturas inicial e final da substância, H o campo magnético, C a constante de Curie da substância, v o volume por unidade de massa, c o calor específico e μ_0 a constante de permeabilidade.

Experimentos das próximas aulas

[6] Filmes finos - preparação e aplicações

[7] Criostatos

[8] Supercondutividade

[9] Superfluidez do hélio

Revezamento na ordem de [6]-[9]