



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“LOM3228 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS DA FÍSICA I”

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Universidade de São Paulo (USP)

Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970

durval@demar.eel.usp.br

www.eel.usp.br – Comunidade – Docentes (Página dos professores)

Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3133
Tel. (Direto) (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena
www.eel.usp.br

Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3006
Tel. (PABX) (12) 3159-9900

CRIOGENIA E BAIXAS TEMPERATURAS

■ Bibliografia

- ROTH, A. Vacuum Technology, North-Holland, 1990.
- HARRIS, N. S. Modern Vacuum Practice, McGraw-Hill, 1989.
- HABLANIAN, M. H. High-Vacuum Technology, Marcel Dekker, 1997.
- BARRON, R. F. Cryogenic Systems, Oxford University Press, 1985.
- WEISEND, J. G. The Handbook of Cryogenic Engineering, Boca Raton: CRC Press, 1998.
- IWASA, Yukikazu. Case Studies in Superconducting Magnets – Design and Operational Issues, Plenum Press, 1994.
- EKIN, Jack W. Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements, Oxford University Press, 2006.

- Agradecimentos: Ao Prof. MSc. Johnson Ordoñez, IFGW, UNICAMP.

Os Líquidos Criogênicos

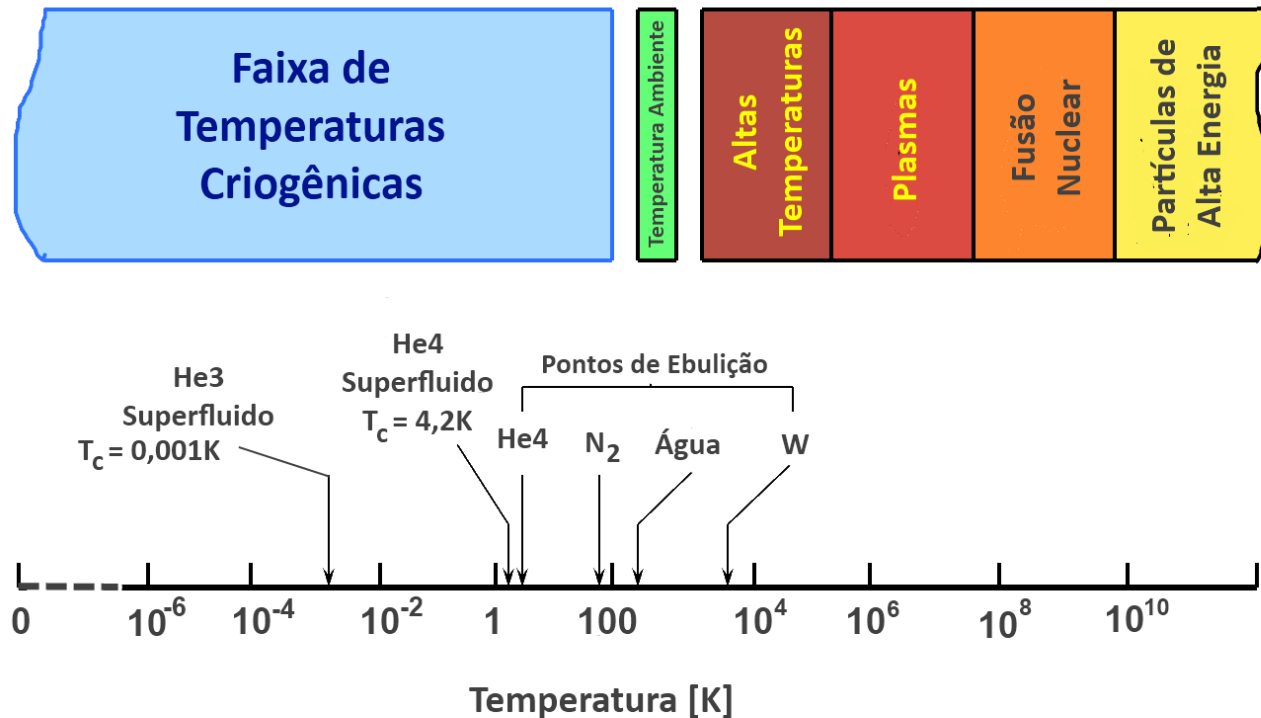
CRIOGENIA

- ✓ A CRIOGENIA é a ciência das temperaturas muito baixas. O prefixo “crio” provém do grego “kruos” que significa extremamente frio.
- ✓ A temperatura mais baixa que se pode obter é o “ZERO ABSOLUTO”, que corresponde a ZERO na escala Kelvin e a - 273,15 na escala de graus Celsius.
- ✓ A CRIOGENIA é um ramo da ciência que estuda:
 - ✓ As tecnologias para a produção de temperaturas muito baixas, inferiores a -150°C (123 K), até a temperatura de ebulição do hélio líquido (4,2K), ou ainda mais próximas do zero absoluto.
 - ✓ As tecnologias para o armazenamento e uso de baixas temperaturas.
 - ✓ As propriedades físico-químicas dos elementos e materiais em baixas temperaturas.
 - ✓ Os fenômenos e efeitos da transferência térmica entre um agente e o meio nessas baixas temperaturas.

Os Líquidos Criogênicos

Os Limites do Frio

- ✓ Temperaturas Criogênicas, em geral, são conseguidas pelo resfriamento e liquefação de gases em temperaturas abaixo das encontradas em condições naturais.



Faixa de Temperaturas Criogênicas

Os Líquidos Criogênicos

Fontes e Produção

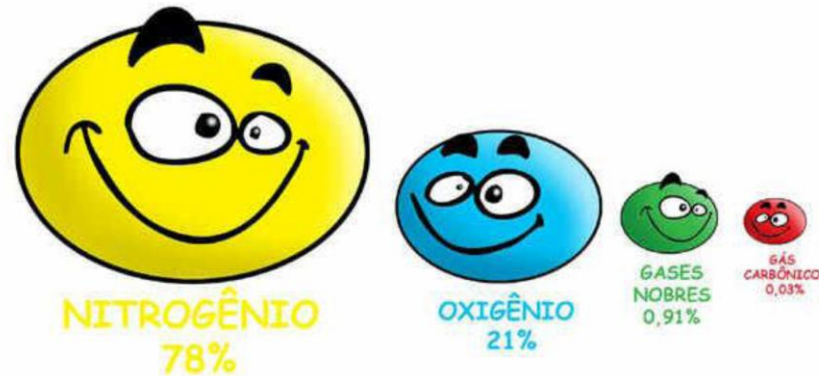
Os líquidos Criogênicos, produzidos em maior quantidade são extraídos do ar atmosférico.

Os principais são o nitrogênio, oxigênio e argônio, que depois de resfriados tornam-se líquidos extremamente frios.

O gás hélio é conseguido de algumas reservas de gás natural e é o líquido criogênico de mais baixa temperatura.

O Gás Natural Liquefeito, GNL, já tem sido usado em muitos países e o hidrogênio líquido tem grande promessa para ser o combustível do futuro.

COMPONENTES CONSTANTES NO AR ATMOSFÉRICO



Os Líquidos Criogênicos

Coluna de Produção de Líquidos do ar

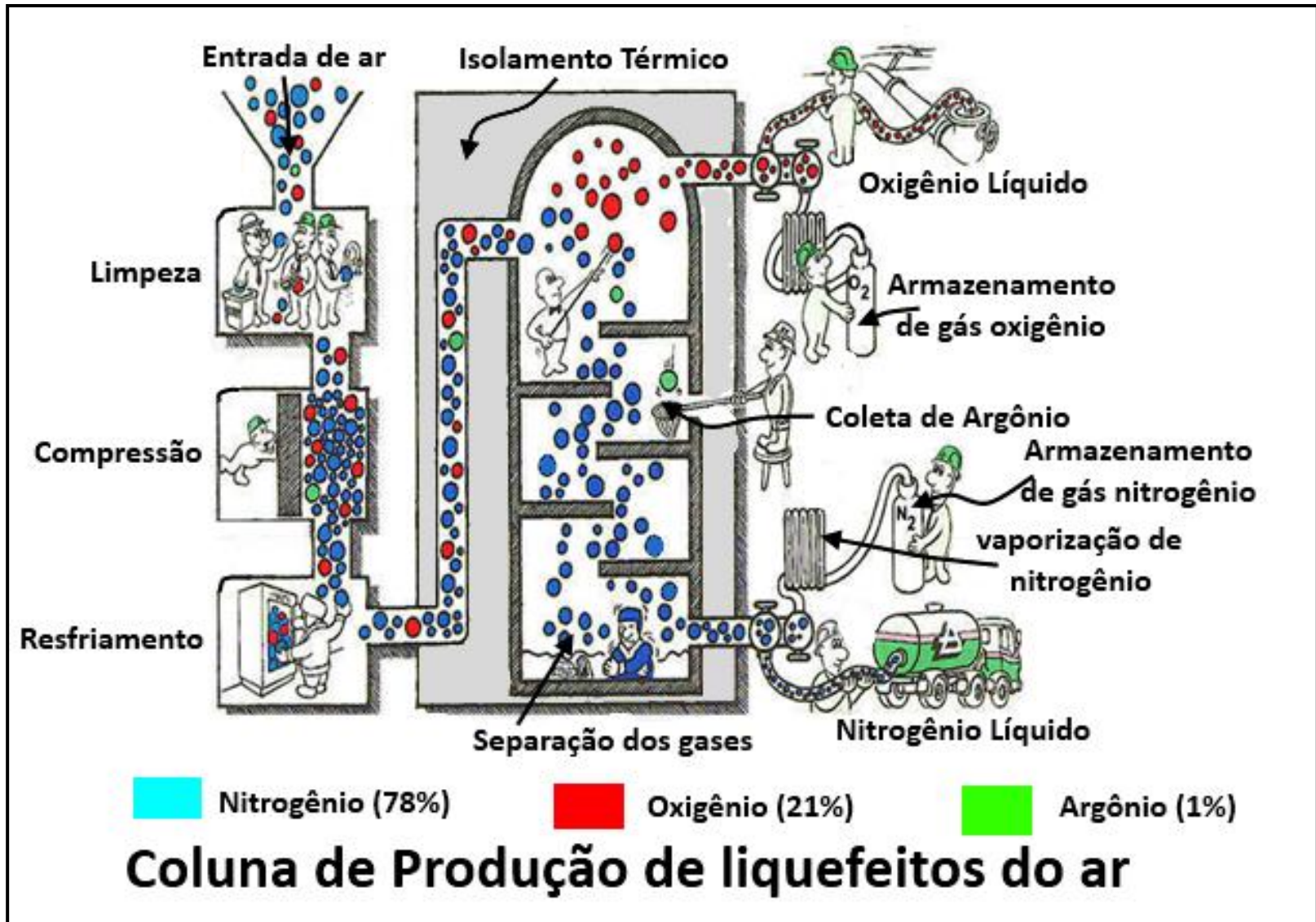
Gases industriais como nitrogênio, oxigênio, argônio, neônio, criptônio, e xenônio, são obtidos do ar por um processo chamado Destilação Fracionada Industrial.

O ar é liquefeito e então separado por pontos de ebulição de cada componente.



Os Líquidos Criogênicos

Coluna de Produção de Líquidos do ar



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Nitrogênio Líquido

LN₂

- ✓ Líquido incolor, inodoro e não inflamável.
- ✓ Na forma gasosa é o maior constituinte da atmosfera (78,03% em volume), retirado por destilação fracionada do ar liquefeito.
- ✓ Em excesso, o gás pode produzir narcose ou asfixia.

Peso Molecular	28,0134 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-195,9°C (77K)
Temperatura de solidificação	-210°C (63K)
Temperatura crítica	-147°C (126K)
Pressão crítica	33,49 atm
Densidade do líquido (1 atm)	808 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	691 vol/vol
Entalpia de Vaporização (77 K, 1atm)	198,38 kJ/kg
Entalpia de Fusão (no ponto triplo, 1 atm)	25,73 kJ/kg



Os Líquidos Criogênicos

Nitrogênio Líquido



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Oxigênio Líquido

LO₂
OU
LOX

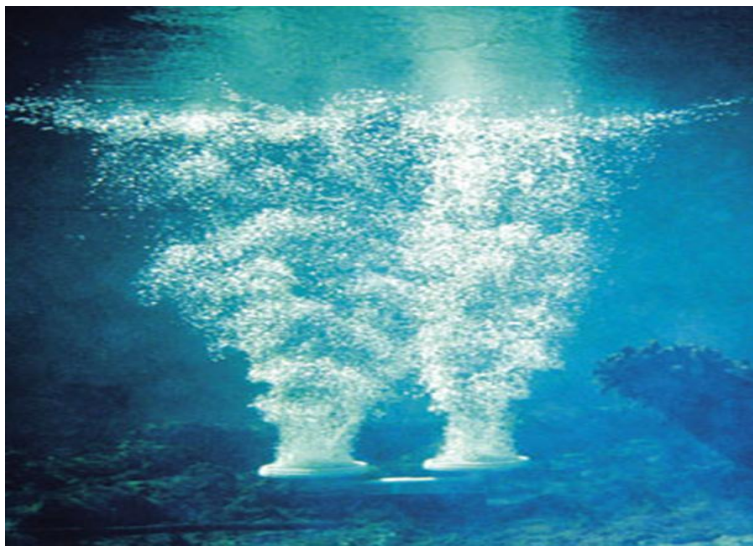
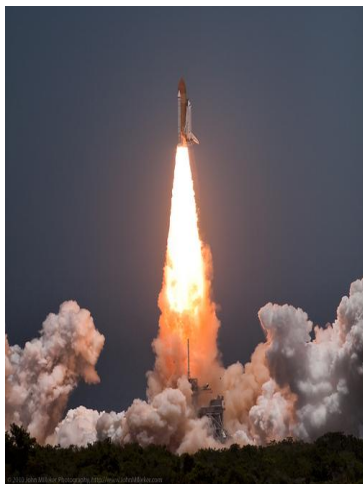
- ✓ Líquido levemente azulado, inodoro, e inflamável quando em contato com hidrocarbonetos.
- ✓ Na forma gasosa é o segundo maior constituinte da atmosfera (20,99% em volume). Retirado por destilação fracionada.
- ✓ Muito usado na indústria em diversas aplicações.



Peso Molecular	31,9988 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-183°C (90K)
Temperatura de solidificação	-218,8°C (54K)
Temperatura crítica	-118,6°C (154,58 K)
Pressão crítica	50,43 bar
Densidade do líquido (1 atm)	1141 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	854 vol/vol
Entalpia de Vaporização (1 atm)	212,98 kJ/kg
Entalpia de Fusão (no ponto triplo, 1 atm)	13,9 kJ/kg

Os Líquidos Criogênicos

Oxigênio Líquido



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Argônio Líquido

LAR

- ✓ Líquido incolor, inodoro e não inflamável.
- ✓ Conseguído a partir da destilação fracionada do ar.
- ✓ Muito usado em processos de soldagem e tratamentos térmicos, como atmosfera inerte, para evitar o contato com os gases constituintes do ar.



Peso Molecular	39,948 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-185,9°C (87,2 K)
Temperatura de solidificação	-189°C (84,1 K)
Temperatura crítica	-122,3°C (150,8 K)
Pressão crítica	48,98 bar
Densidade do líquido (1 atm)	1392,8 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	835 vol/vol
Entalpia de Vaporização (1 atm)	160,81 kJ/kg
Entalpia de Fusão (no ponto triplo, 1 atm)	29,41 kJ/kg

Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Hidrogênio Líquido



- ✓ Líquido Incolor, inodoro e altamente inflamável em contato com oxigênio acima de 4% (de 18 a 59% de ar).
- ✓ A molécula existe em duas formas ORTO e PARAhidrogênio. Na liquefação é necessário reativar o calor de conversão ORTO-PARA.
- ✓ É o mais leve dos líquidos criogênicos com densidade da ordem de 25% da água.
- ✓ Risco de fragilizar alguns metais.

Peso Molecular	2,016 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-252,8°C (20K)
Temperatura de solidificação	-259°C (13,9K)
Temperatura crítica	-240°C (33K)
Pressão crítica	12,98 bar
Densidade do líquido (1 atm)	70,973 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	844 vol/vol
Entalpia de Vaporização (1 atm)	454,3 kJ/kg
Entalpia de Fusão (no ponto triplo, 1 atm)	58,158 kJ/kg



Os Líquidos Criogênicos

Hidrogênio Líquido



BMW movido a LH₂, equipado com um tanque de alumínio com capacidade para 120 litros e peso de 68 kg.

O “Space Shuttle”, usa 1,45 milhões de litros de HIDROGÊNIO LÍQUIDO e 0,542 milhões de litros de OXIGÊNIO LÍQUIDO, possibilitando um empuxo de 28,6 milhões de NEWTONS no momento do lançamento. Os sistemas criogênicos controlam a temperatura da nave, fornecem oxigênio, nitrogênio e hélio, e, além disso, produzem água potável para os seus tripulantes



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Metano Líquido

GNL

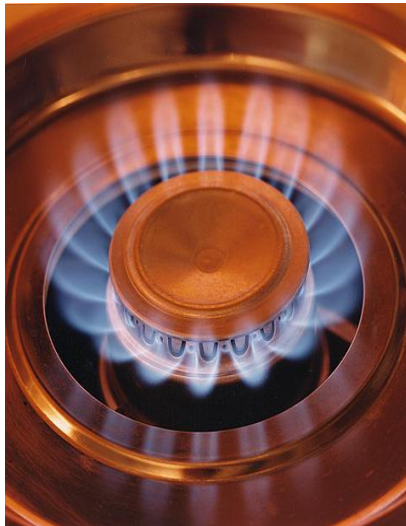
- ✓ Líquido Inodoro, incolor, inflamável e não corrosivo.
- ✓ Usado como combustível em indústrias, veículos e residências.
- ✓ Principal componente do GÁS NATURAL, que é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos de baixa massa molecular, como o etano e o propano.
- ✓ Incompatível com etileno, propileno e silício.



Peso Molecular	16,043 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-161,6°C (112K)
Temperatura de solidificação	-182,5°C (90,6K)
Temperatura crítica	-82,7°C (190K)
Pressão crítica	45,96 bar
Densidade do líquido (1 atm)	422,62 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	630 vol/vol
Entalpia de Vaporização (1 atm)	510 kJ/kg
Entalpia de Fusão (no ponto triplo, 1 atm)	58,68 kJ/kg

Os Líquidos Criogênicos

Gás Natural Liquefeito (GNL)



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Propano Líquido

LPG

- ✓ Líquido incolor, inodoro e inflamável.
- ✓ Propano e Butano líquidos são usados como reservas e suplementos de demanda nos sistemas de fornecimento doméstico e industrial.
- ✓ O GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), não criogênico, vem do subsolo como constituinte do Gás Natural ou aparece como subproduto da refinação do petróleo.



Peso Molecular	44,096 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-42,1°C (231,2K)
Temperatura de solidificação	-187,7°C (83,3K)
Temperatura crítica	96,6°C (368,8K)
Pressão crítica	42,5 bar
Densidade do líquido (1 atm)	582 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	311 vol/vol
Entalpia de Vaporização (1 atm)	425,31 kJ/kg
Entalpia de Fusão (no ponto triplo, 1 atm)	94,98 kJ/kg

Os Líquidos Criogênicos

Propano Líquido



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Hélio 4 Líquido

- ✓ Líquido Inodoro, incolor, não inflamável e não corrosivo .
- ✓ O hélio 4 é o criogênico de maior interesse na pesquisa científica, devido à baixíssima temperatura do líquido.
- ✓ O fenômeno da SUPERFLUIDEZ acontece abaixo de 2,17K com propriedades excepcionalmente incomuns.

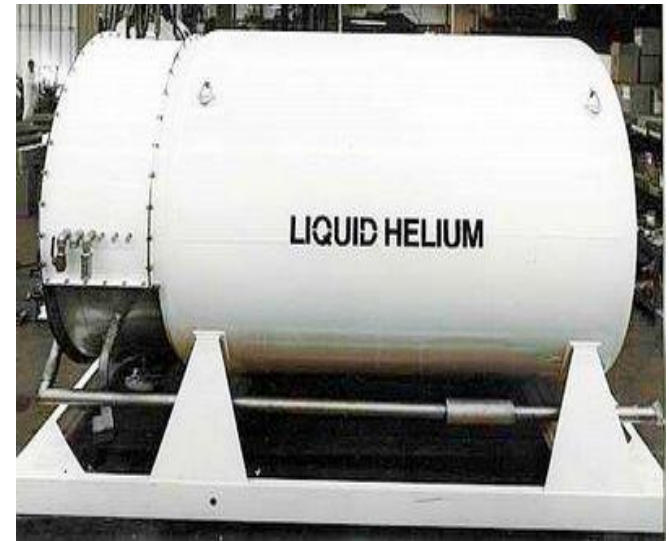
LHe



Peso Molecular	4,0026 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-269°C (4,2K)
Temperatura de solidificação (1 atm) Temperatura de solidificação (26 atm)	Não solidifica -272,2°C (0,95K)
Temperatura crítica	-268°C (5,25K)
Pressão crítica	2,275 bar
Densidade do líquido (1 atm)	124,96 kg/m ³
Densidade do gás (1 atm)	16,891 kg/m ³
Densidade do gás (1 atm, 15°C)	0,169 kg/m ³
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	748 vol/vol
Entalpia de Vaporização (1 atm)	20,3 kJ/kg
Entalpia de Fusão (1 atm)	-----

Os Líquidos Criogênicos

Hélio Líquido



Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do **hélio 3 (He3)** comparadas com as do **hélio 4 (He4)**

	He 4	He 3
Peso Molecular	4,0026 g/mol	3,0160293 g/mol
Temperatura de liquefação (1 atm)	-268,926°C (4,224K)	-269,96°C (3,19K)
Temperatura de solidificação (1 atm)	Não solidifica	Não solidifica
Temperatura crítica	-268°C (5,19K)	-269,8°C (3,35K)
Pressão crítica	2,275 bar	1,16 bar
Densidade do líquido (1 atm)	124,96 kg/m ³	59 kg/m ³
Densidade do gás (1 atm)	16,891 kg/m ³	22,0 kg/m ³
Densidade do gás (1 atm, 15°C)	0,169 kg/m ³	
Equivalente líquido/gás (15°C, 1 atm)	748 vol/vol	
Entalpia de Vaporização (1 atm)	20,3 kJ/kg	8,5 kJ/kg
Entalpia de Fusão (1 atm)	-----	-----

Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Hélio 4 Líquido

- ✓ O ponto de ebulição e o ponto crítico dependem dos isótopos do hélio. Os isótopos He4 e He3 são estáveis. O He6 (meia vida de 0,86 ms) e o He8 são instáveis.
- ✓ O He4 foi liquefeito, pela primeira vez, em 1908, pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes, na *University of Leiden*, Holanda.
- ✓ É usado como principal refrigerante criogênico em fios e magnetos supercondutores, tais como os utilizados em ressonância magnética, aceleradores de partículas atômicas, satélites e naves espaciais.
- ✓ A temperatura necessária para liquefazer o hélio é baixa por causa da baixa intensidade das forças de atração entre os átomos. O hélio é um gás nobre, mas a atração interatômica é reduzida ainda mais por efeitos quânticos, importantes por causa de sua baixa massa atômica.

Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Hélio 4 Líquido

- ✓ Devido às fracas forças interatômicas, o hélio permanece líquido até próximo do zero absoluto, solidificando apenas sob grande pressão.
- ✓ O He4 líquido, quando bombeado por um sistema de vácuo, pode chegar a -272°C (1,4K). O He3 pode chegar a 0,3K.
- ✓ O fenômeno da Superfluidez aparece, no He4, somente abaixo de 2,17K, chamada de temperatura de transição λ (ou Ponto λ , *lambda point*). No He3 a superfluidez ocorre abaixo de 2,6 mK.
- ✓ He4 e He3 líquidos, abaixo de 0,9K, não são miscíveis, havendo separação de fases. Uma, mais densa, rica em He4 e outra, menos densa, rica em He3. A refrigeração ocorre devido à “evaporação” do He3 da fase menos densa para a mais densa a custa de um “calor latente de vaporização”, o que torna possível a existência do **“Refrigerador de diluição”**, capaz de atingir temperaturas de poucos mK acima do zero absoluto.

Os Líquidos Criogênicos

Propriedades Físicas do Hélio 4 Superfluido

- ✓ Entre os séculos XIX e XX, ocorre a liquefação dos gases do ar, outrora chamados de permanentes.
- ✓ Com o progresso da técnica, conseguiu-se o resfriamento até temperaturas mais baixas, como as do hidrogênio e do hélio.
- ✓ A superfluidez, propriamente dita, foi descoberta por Pyotr Leonidovich Kapitsa, John F. Allen e Don Misener em 1937.
- ✓ A superfluidez consiste num estado anômalo de líquidos, de natureza quântica, como o hélio líquido, de tal forma que este estado apresenta as seguintes características:
 - ✓ Temperatura de Transição para Superfluido
 - ✓ Transição de Fase Normal para Superfluido
 - ✓ Viscosidade muito próxima de zero
 - ✓ Descontinuidade no Calor Específico
 - ✓ Aumento de Densidade
 - ✓ Elevadíssima capacidade de transmissão de calor

Os Líquidos Criogênicos

Transição Superfluida no hélio 3 e no hélio 4

- ✓ A concentração do He3 no He4 natural é de apenas $1,3 \times 10^{-4} \%$.
- ✓ A descoberta do fenômeno da superfluidez no He3 é recente.

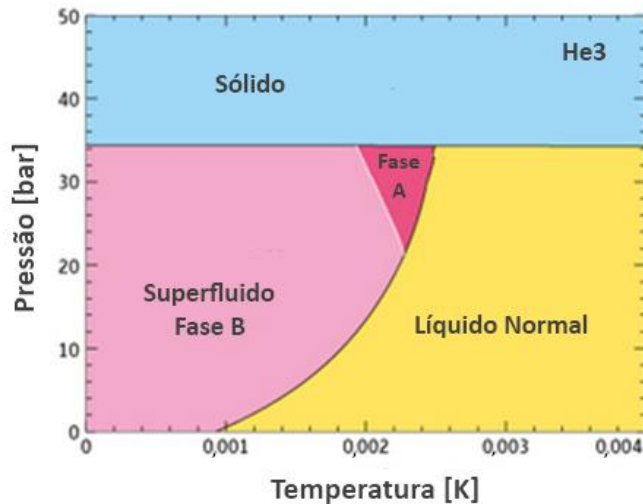
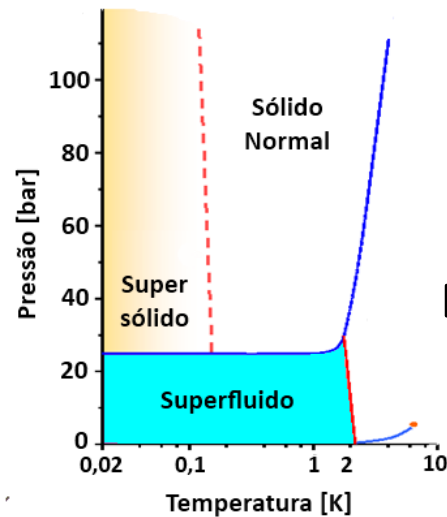


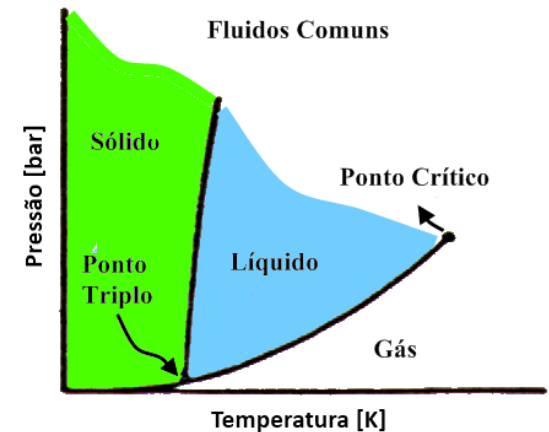
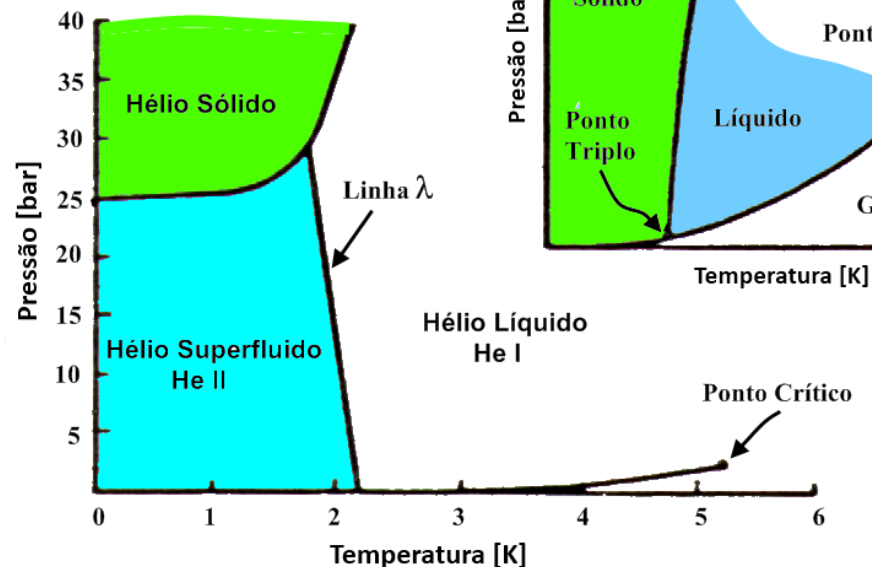
Diagrama de fases do Hélio 3

imagem site: <http://www.rikenresearch.riken.jp/eng/frontline/5848>
do Prof Kimitoshi Kono da Universidade Tóquio.



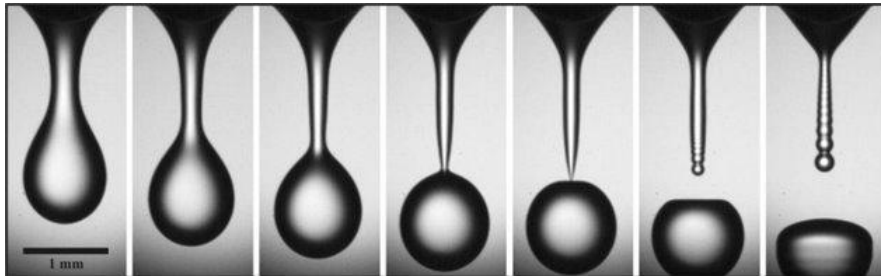
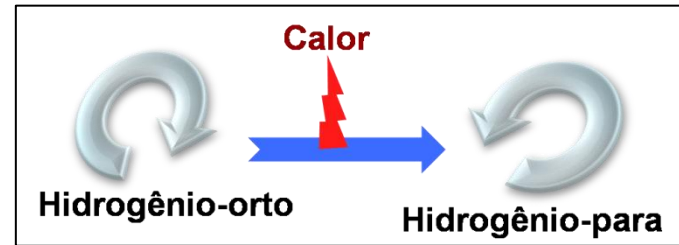
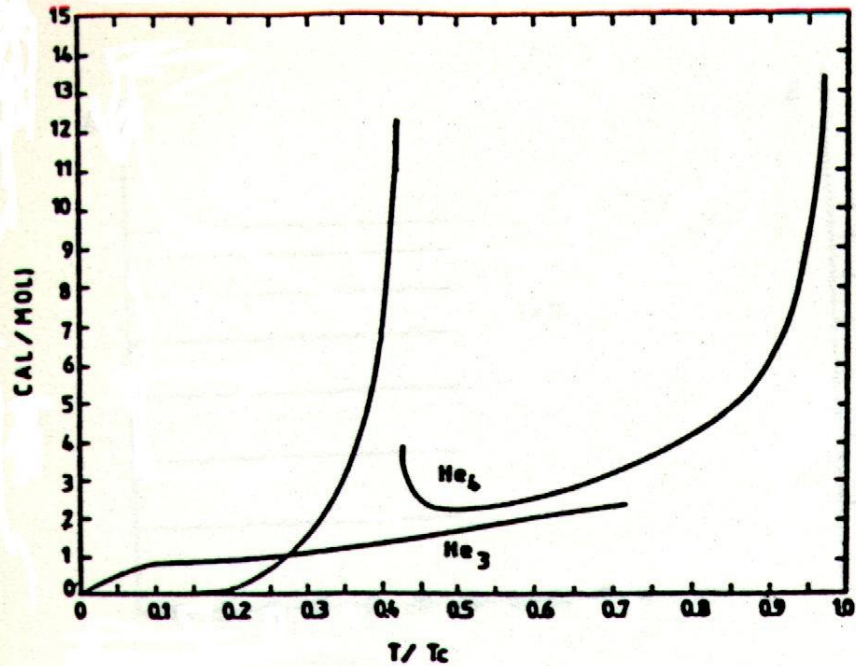
- ✓ O hélio 4, diferentemente de um fluido comum, apresenta um diagrama de fases bem particular.

Diagrama de fases do hélio 4



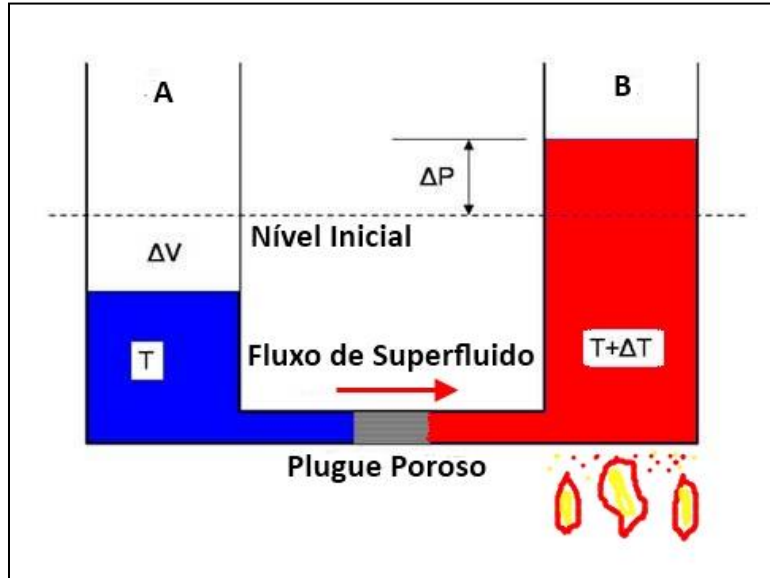
Os Líquidos Criogênicos

Transição Superfluida no Hélio 4

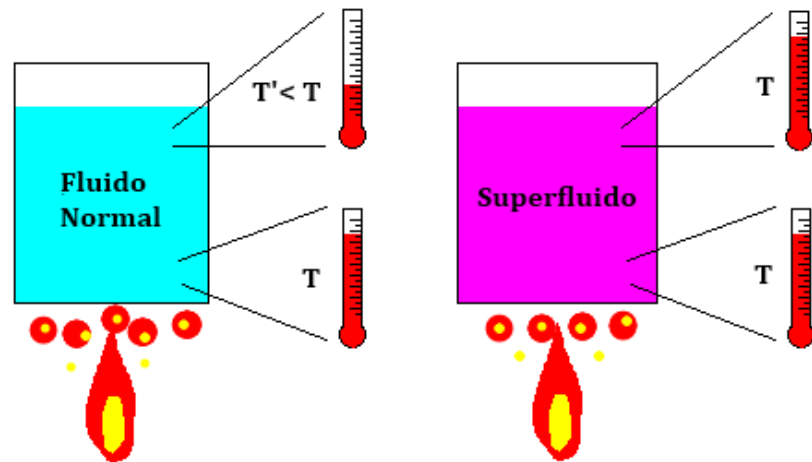


Os Líquidos Criogênicos

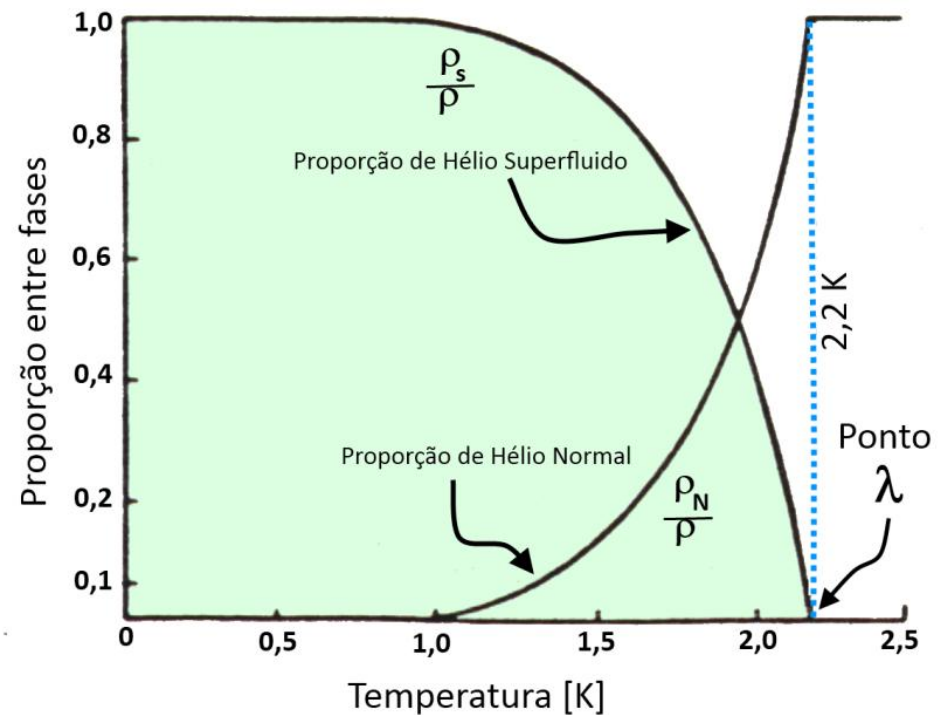
Transição Superfluida no Hélio 4



O Superfluido conduz calor perfeitamente



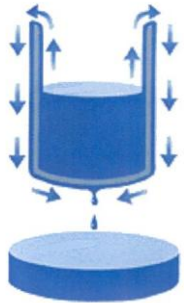
✓ O hélio 4 cessa a ebulição em 2,2 K, no ponto de transição λ , aumentando a proporção de Superfluido e diminuindo a proporção normal até 1,0K.



Proporção de fases em função da temperatura

Os Líquidos Criogênicos

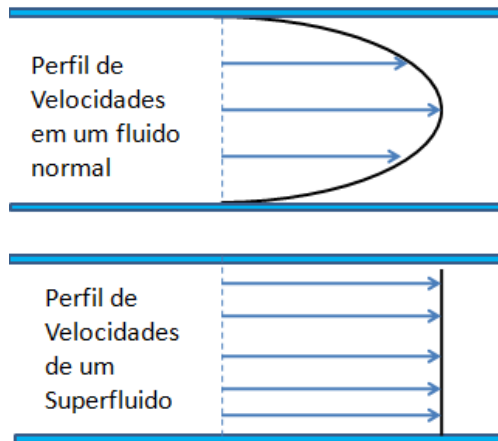
A Viscosidade do Hélio 4 Superfluido



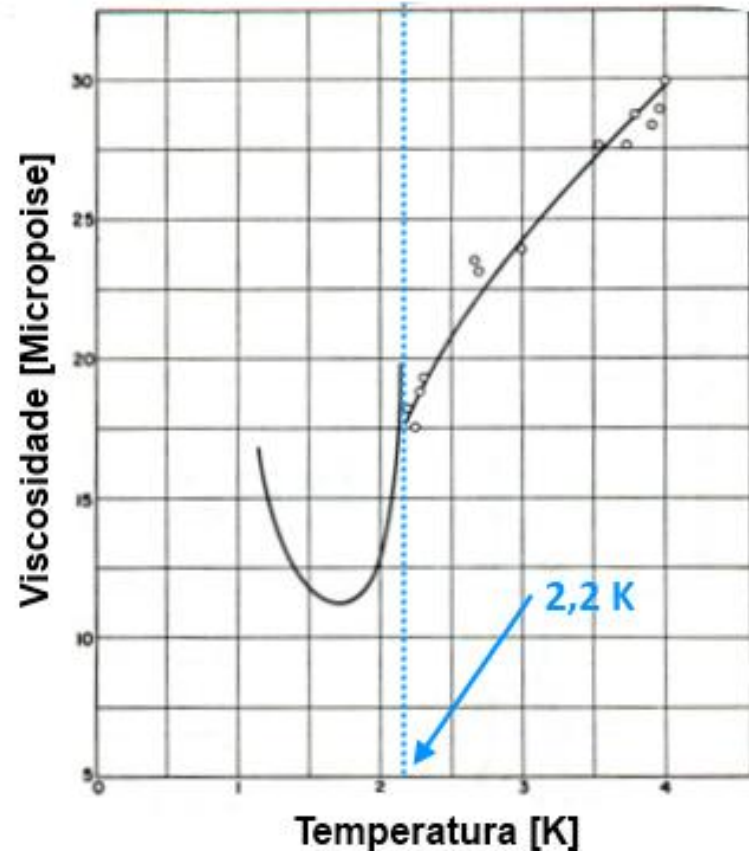
✓ O hélio superfluido (He II) pode deslizar pelos lados de um recipiente e sair dele, por si só!

✓ Pode-se girar objetos a altíssimas velocidades dentro do hélio superfluido, sem causar nenhuma turbulência.

✓ O He superfluido passa por capilares e tubulações sem que haja perda de carga ou geração de turbulência.



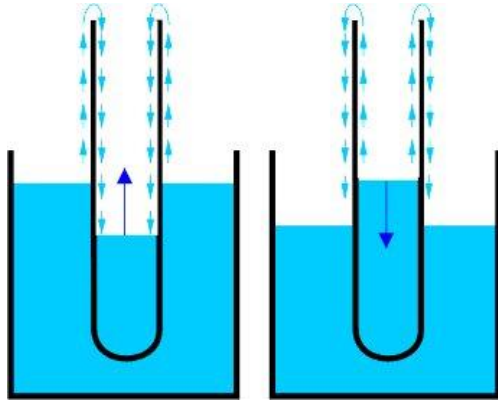
- ✓ A 2,17K a viscosidade do superfluido é 20 μ Poise.
- ✓ A 273K a viscosidade do gás é 186,3 μ Poise.



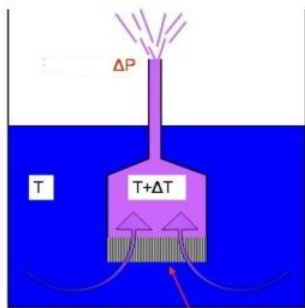
Viscosidade do hélio superfluido (He II) em função da temperatura

Os Líquidos Criogênicos

Descontinuidade no Calor Específico do He4



O hélio superfluido iguala o nível de líquido nos recipientes.



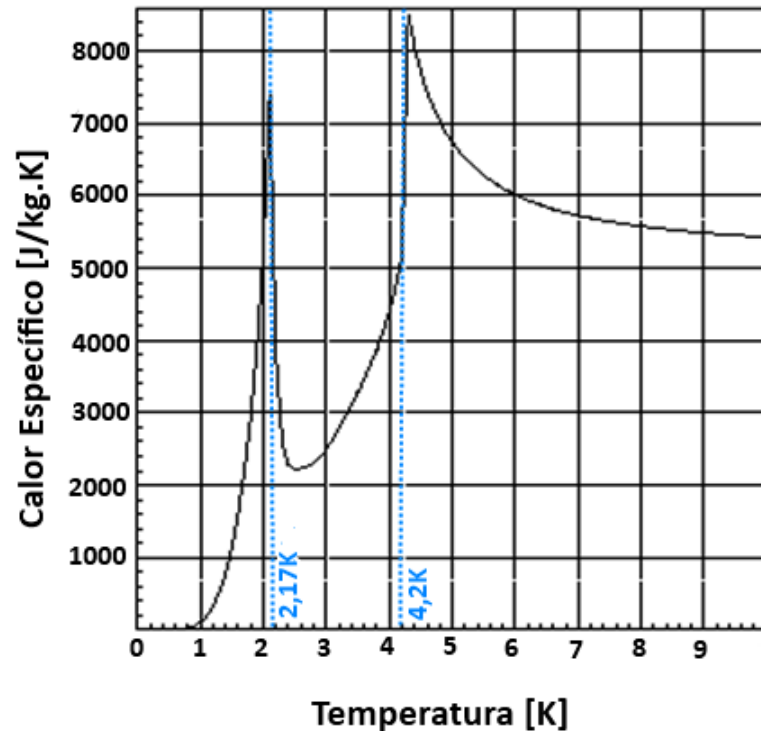
Fluxo de Hélio Superfluido através do plugue poroso

Plugue Poroso



O EFEITO FONTE é observado ao se fornecer calor ao líquido confinado. O He superfluido (He II) flui pelo capilar.

- ✓ Em 2,17K, ponto λ , há um aumento brusco do calor específico e uma descontinuidade.
- ✓ Em 1,0K vai a zero.



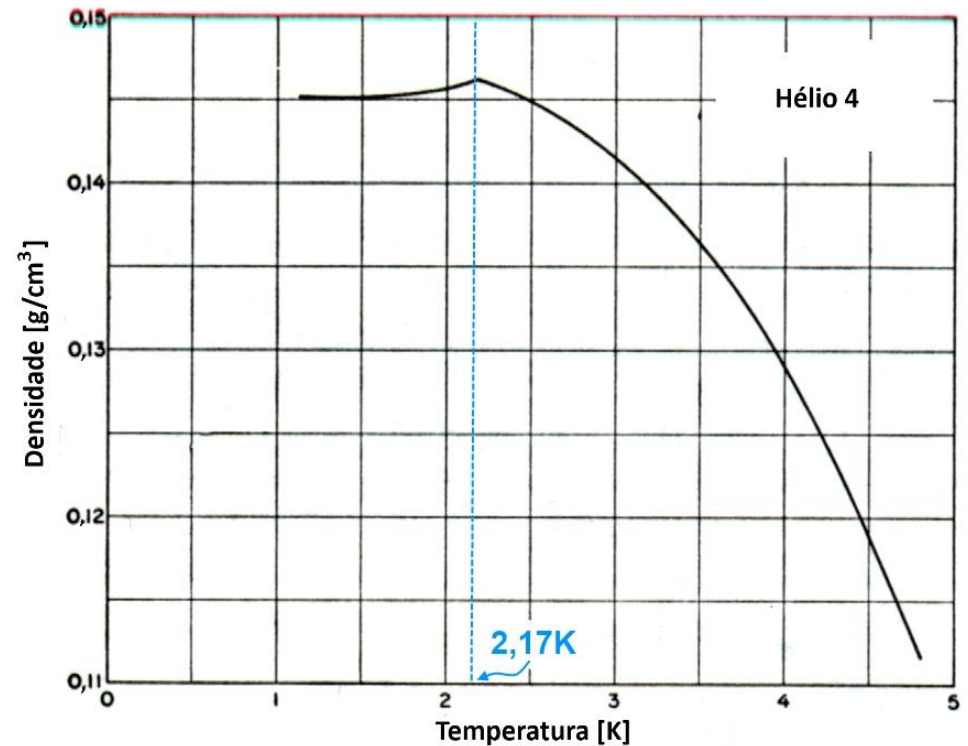
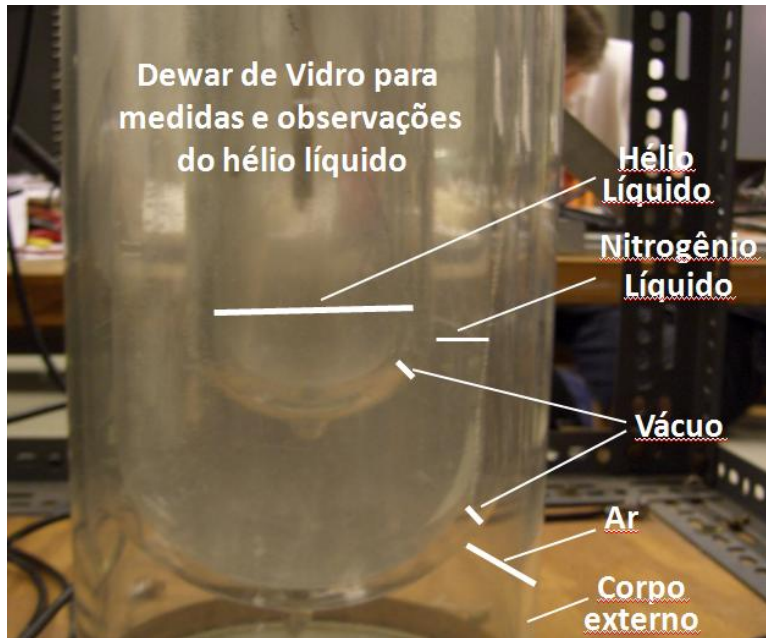
Curva de Calor Específico do Hélio 4

Calor Específico do hélio em função da temperatura

Os Líquidos Criogênicos

Densidade do He4

- ✓ A densidade do hélio 4 aumenta para temperaturas abaixo de 5K. Porém, abaixo do ponto λ , se mantém praticamente constante.



Densidade do hélio 4 em função da temperatura

Os Líquidos Criogênicos

QUESTÕES (para entregar, individual)

- 1) Diferencie hélio 4 (He4) de hélio 3 (He3), dos pontos de vista físico, químico, quântico e estrutural.
- 2) Descreva o fenômeno da Superfluidez dos pontos de vista físico, químico e quântico.
- 3) Explique a transição superfluida no hélio 4 e no hélio 3.
- 4) Encontre explicações para os fenômenos que acontecem com a viscosidade, o calor específico e a densidade do hélio 4 em função da temperatura.
- 5) Explique o funcionamento de um “Refrigerador de diluição” de hélio. Explique o fenômeno físico e a termodinâmica do processo.