



BOMBAS DE VÁCUO II

4300323 – CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO VÁCUO

2º semestre de 2023
Saulo Gabriel Alberton
Nilberto Heder Medina
Vitor Angelo Paulino de Aguiar

SUMÁRIO

Bombas Mecânicas

- Bomba Turbomolecular (TMP)

Bombas Criogênicas

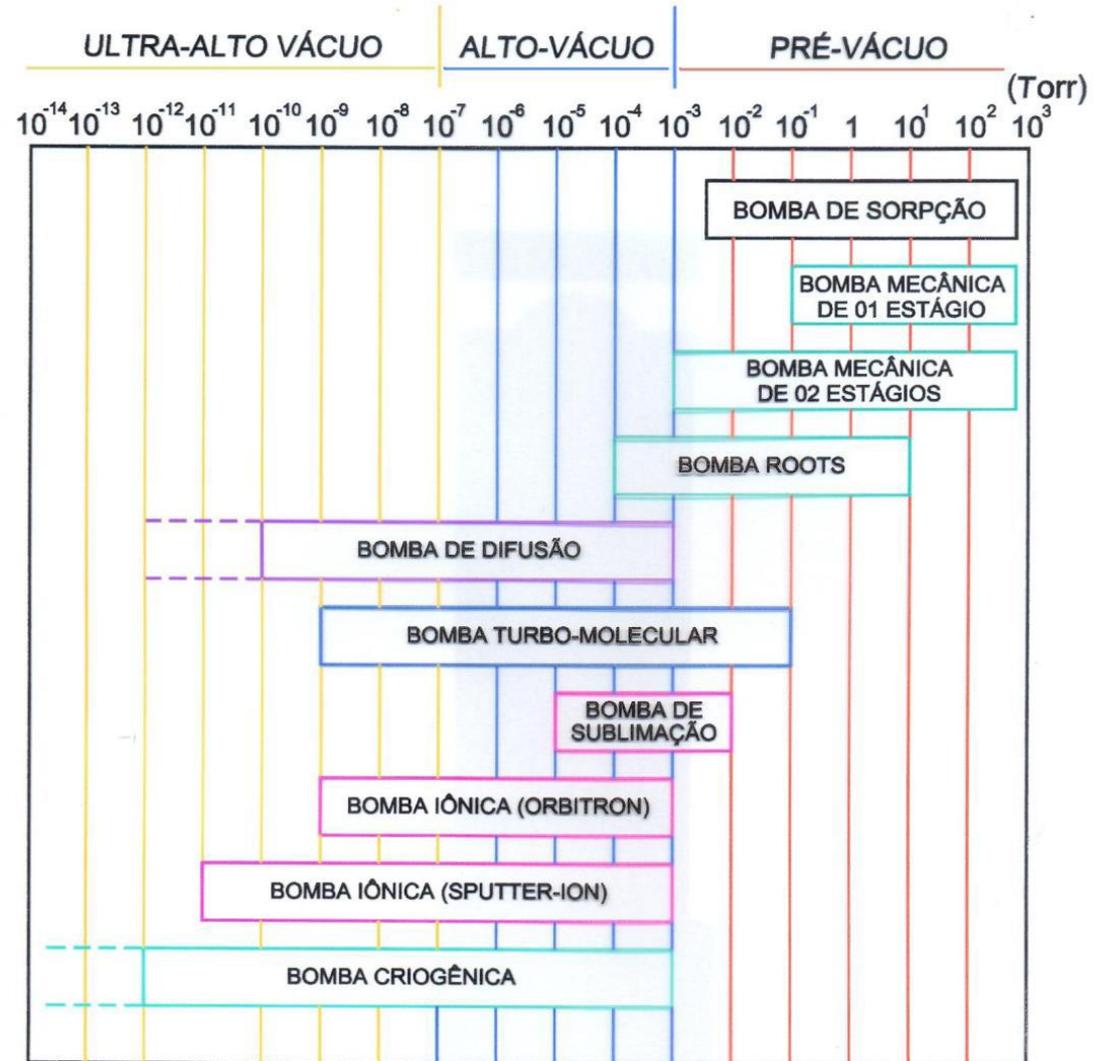
- Banho Térmico
- Compressão de Hélio em Circuito Fechado

Bombas de Captura

- Bomba de Sublimação de Titânio (TSP)
- Bomba Iônica – Órbitron
- Bomba Iônica – Magnética
- Bomba de Captura Não-Evaporável (NEG)

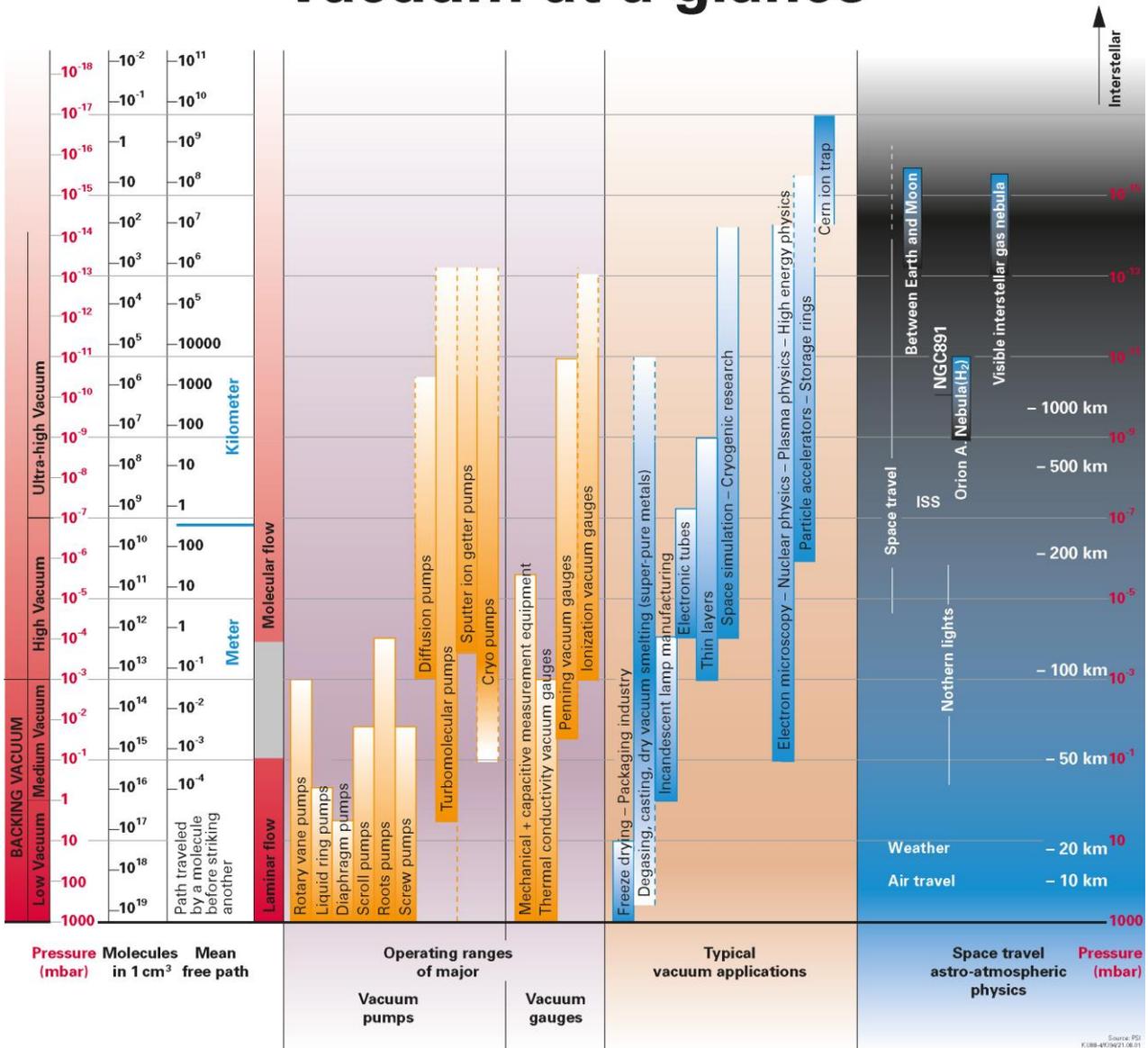
BOMBAS DE VÁCUO

Bombas distintas e seus respectivos limites de operação



Vacuum at a glance

~ 10¹⁶ mbar at 3K
 Δ ~ 3 · 10¹³ g/m³
 Δ ~ 100 particles/m³



Source: PSI K188-473(02)10.01



BOMBAS DE VÁCUO

Classificação

Transferência de gás

- Direcionamento de gás em direção preferencial

Exemplos:

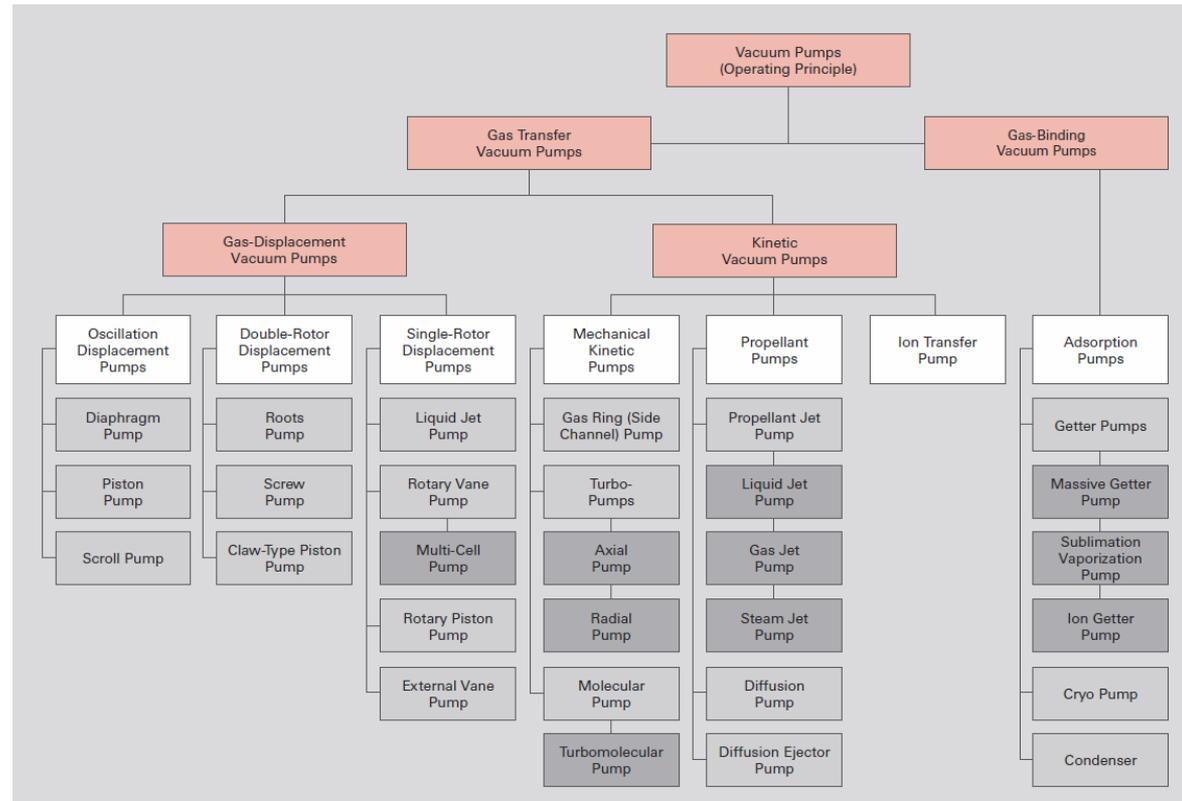
- Sistema mecânico
- Fluxo de fluido

Aprisionamento de gás

- Aprisionamento de gás em substrato ativo

Exemplos:

- Sorção a baixas temperaturas
- Quimissorção
 - Ligas altamente reativas
 - Materiais microporosos
- Necessidade de regeneração periódica



Fonte: Pfeiffer Vacuum, The Vacuum Technology Book, 2008

BOMBAS DE VÁCUO

Classificação

Transferência de gás

- Direcionamento de gás em direção preferencial

Exemplos:

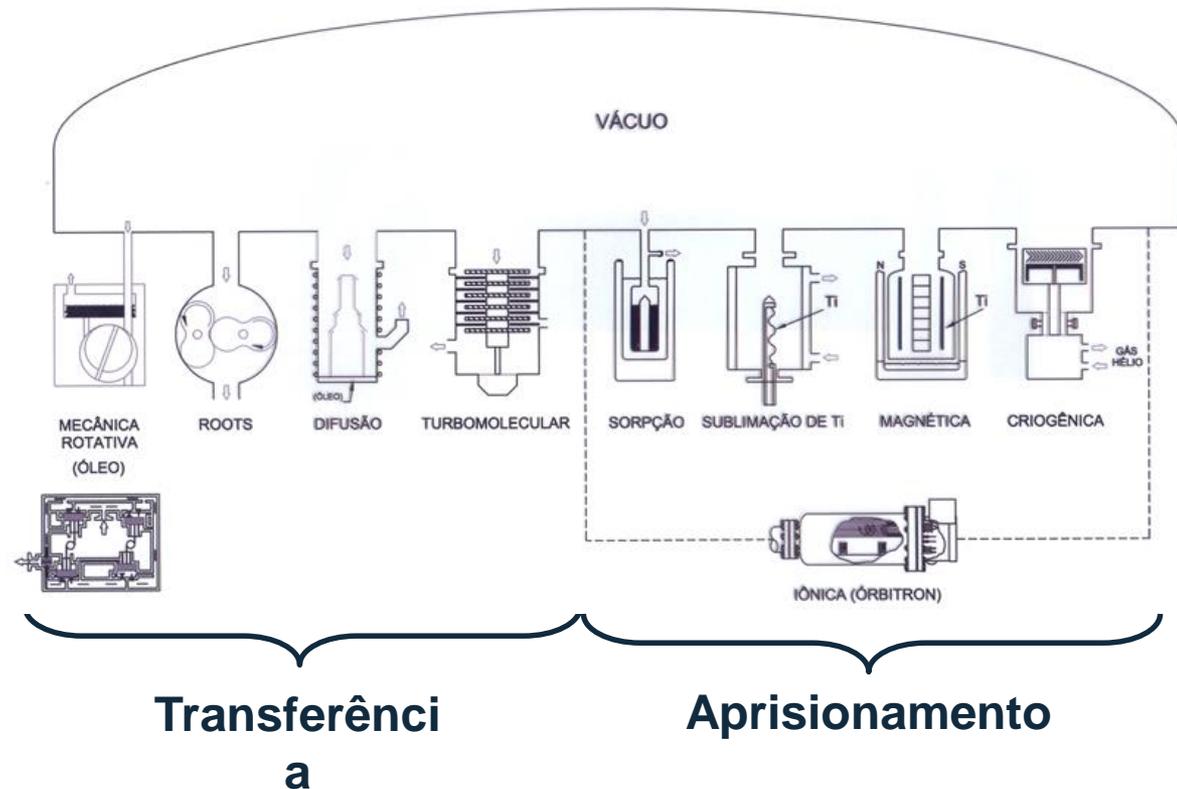
- Sistema mecânico
- Fluxo de fluido

Aprisionamento de gás

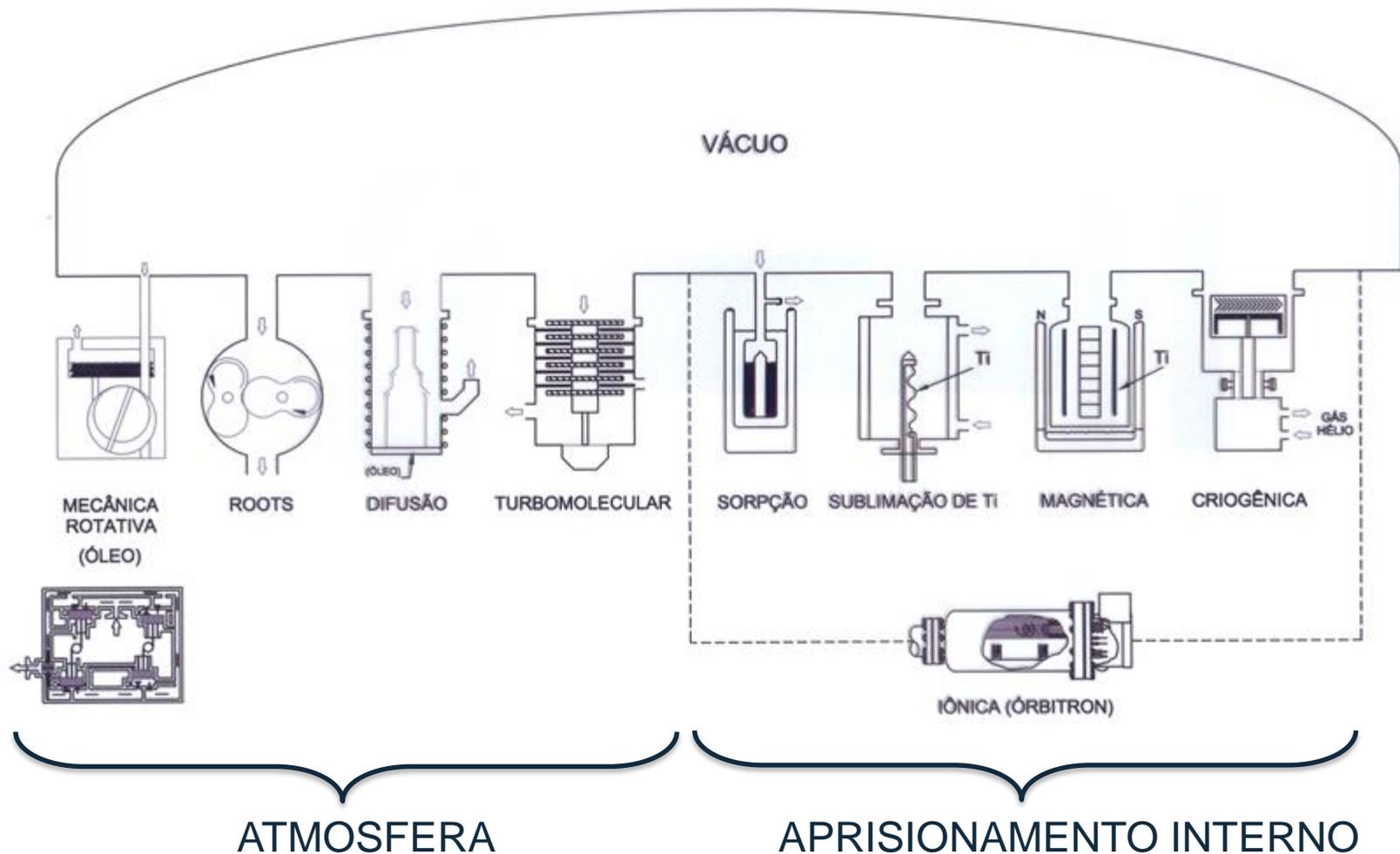
- Aprisionamento de gás em substrato ativo

Exemplos:

- Sorção a baixas temperaturas
 - Ligas altamente reativas
 - Materiais microporosos
- Necessidade de regeneração periódica



BOMBAS DE VÁCUO



BOMBAS MECÂNICAS

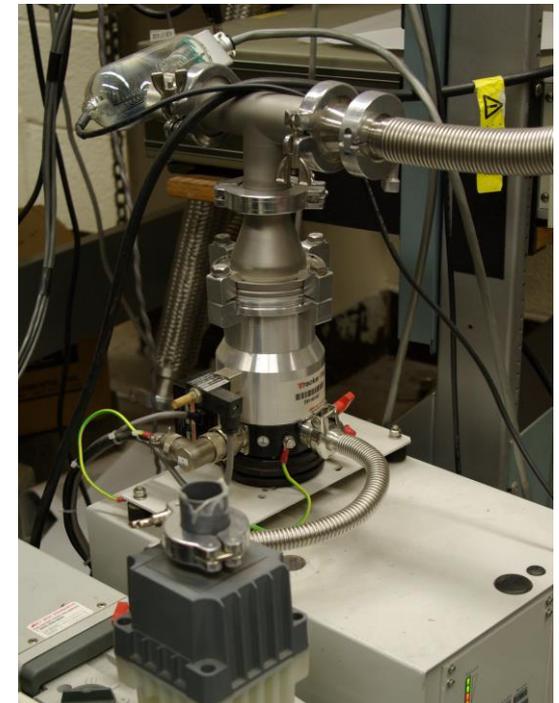
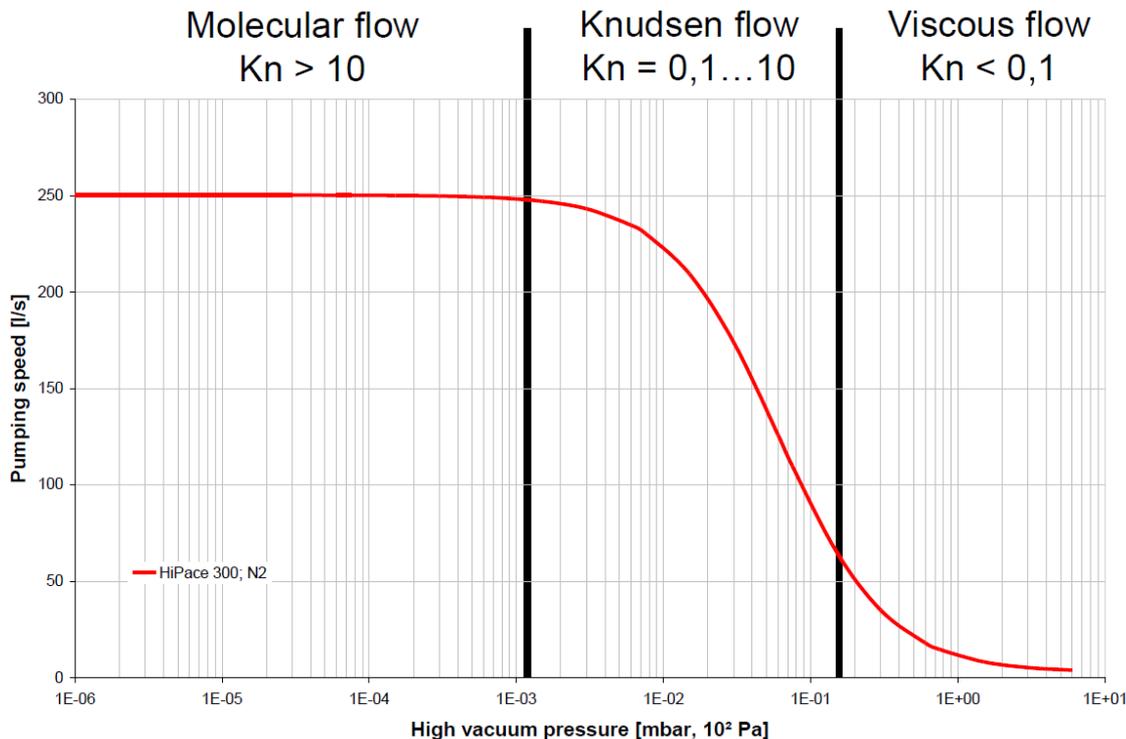
BOMBA TURBOMOLECULAR

❑ Bombas turbomoleculares (TMPs – *turbomolecular pumps*) são compressores axiais desenhados para o bombeamento de gases no

regime molecular

$$Kn = \frac{\lambda}{D} = \begin{cases} < 0.01 & , \text{ regime viscoso} \\ 0.01 < Kn < 1 & , \text{ regime intermediário} \\ Kn > 1 & , \text{ regime molecular} \end{cases}$$

$$\lambda \text{ [cm]} \approx \frac{5 \times 10^{-3}}{P \text{ [Torr]}}$$



BOMBA TURBOMOLECULAR

- ❑ Bombas turbomoleculares (TMPs – *turbomolecular pumps*) são compressores axiais desenhados para o bombeamento de gases no

regime molecular Funcionamento

- Baseado em transferência de momento linear
- Uma bomba de *backing* é requerida durante operação

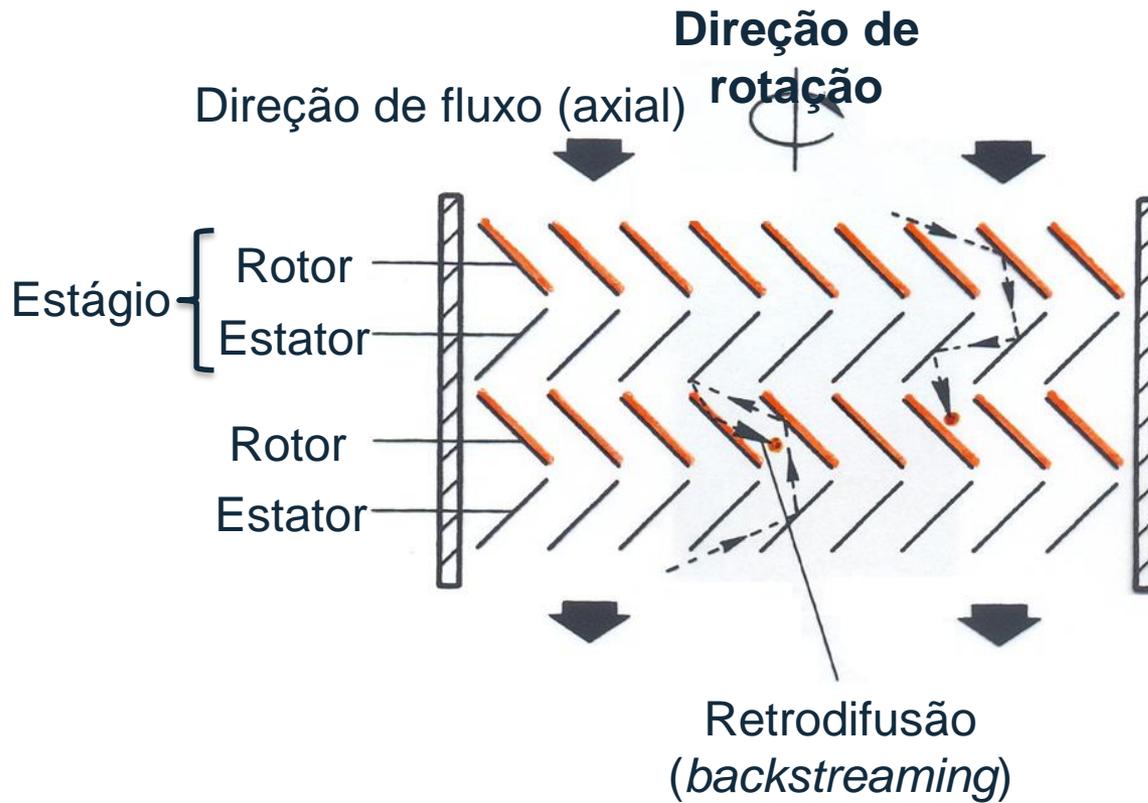
Características

- Intervalo de operação
 10^{-2} a 10^{-11} Torr
- Velocidade de bombeamento
10 a 10.000 l/s
- Velocidade de rotação das lâminas
14.000 a 90.000 rpm



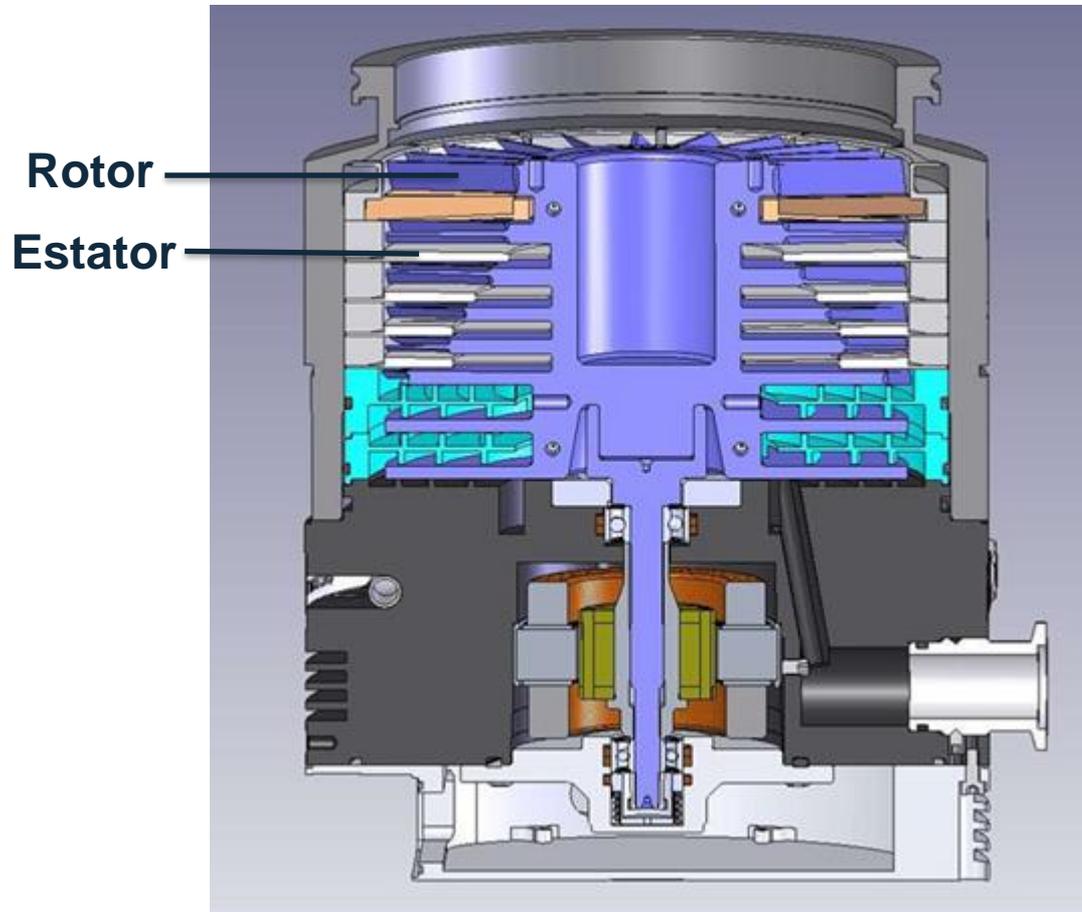
BOMBA TURBOMOLECULAR

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO



BOMBA TURBOMOLECULAR

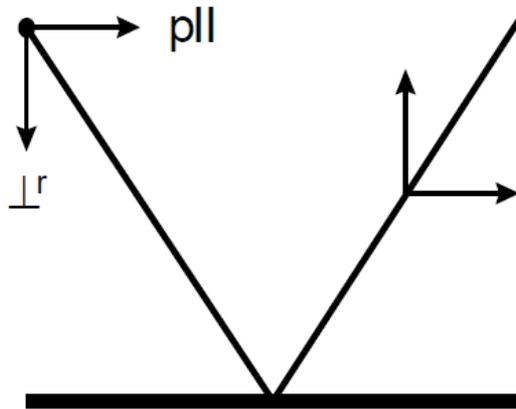
❑ MECANISMO DE BOMBEAMENTO



BOMBA TURBOMOLECULAR

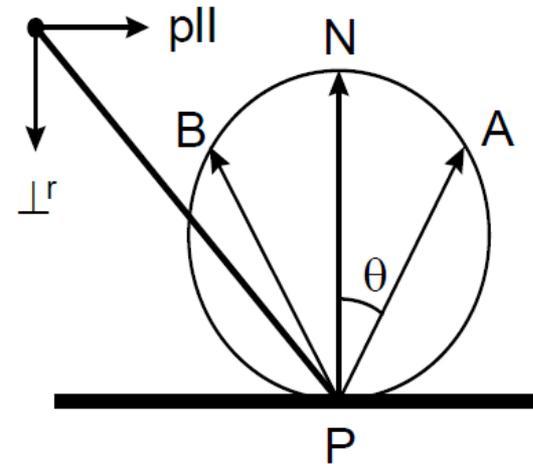
□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Interações moleculares com a superfície



(a)

Colisão clássica



(b)

Observação experimental

Lei de emissão de Lambert

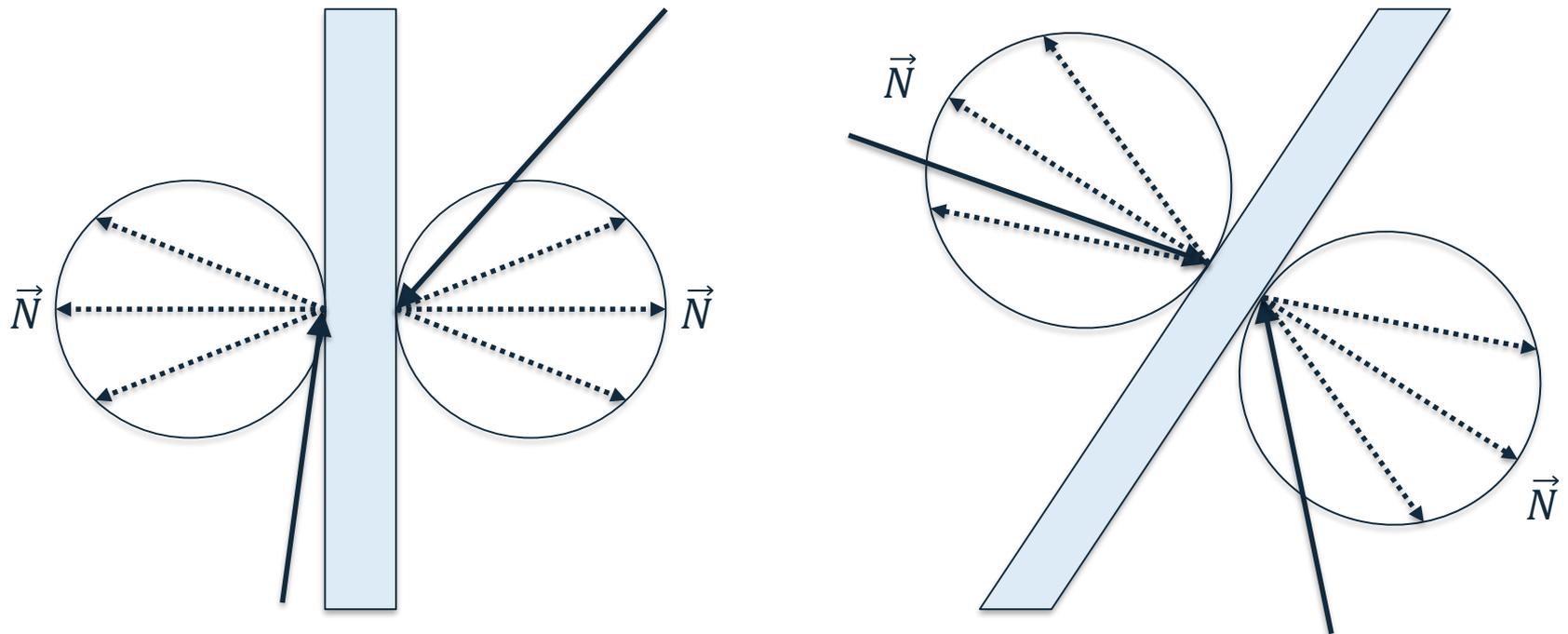
$$I_{\theta} = I_{\text{emissão}} \cdot \cos \theta$$

BOMBA TURBOMOLECULAR

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

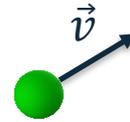
Interações moleculares com a superfície

- Lâminas sem movimento



BOMBA TURBOMOLECULAR Distribuição Maxwell-Boltzmann

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO



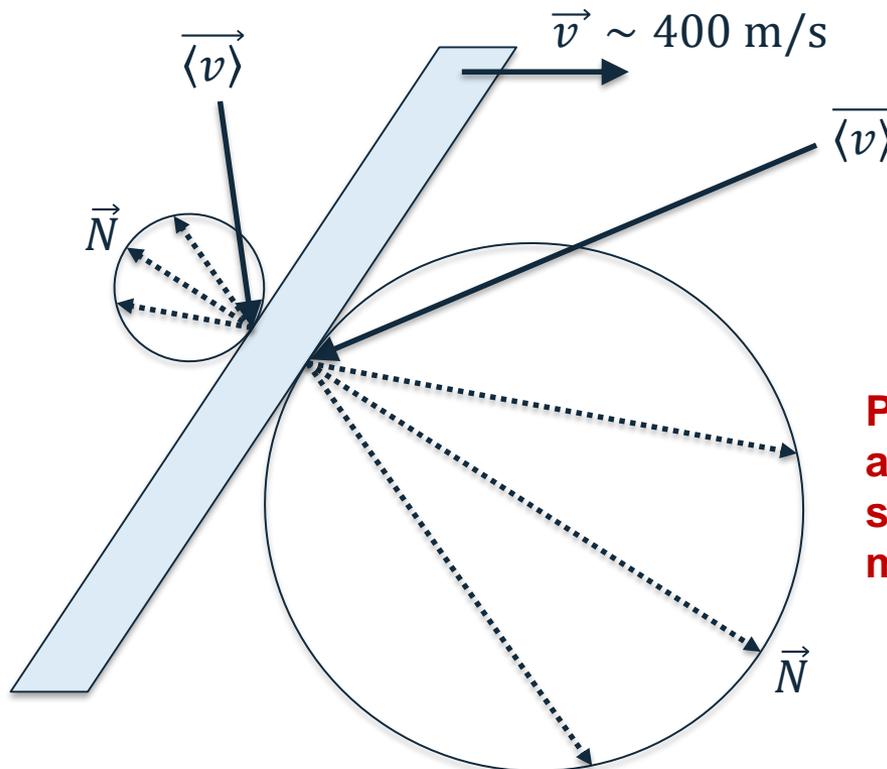
$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

N_2 @ $T = 300$ K:

$\langle v \rangle \sim 470 \text{ m/s}$

Interações moleculares com a superfície

- Lâminas em movimento



Para influenciar o movimento, a velocidade das lâminas deve ser comparável à velocidade molecular

BOMBA TURBOMOLECULAR

☐ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

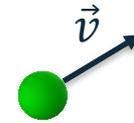
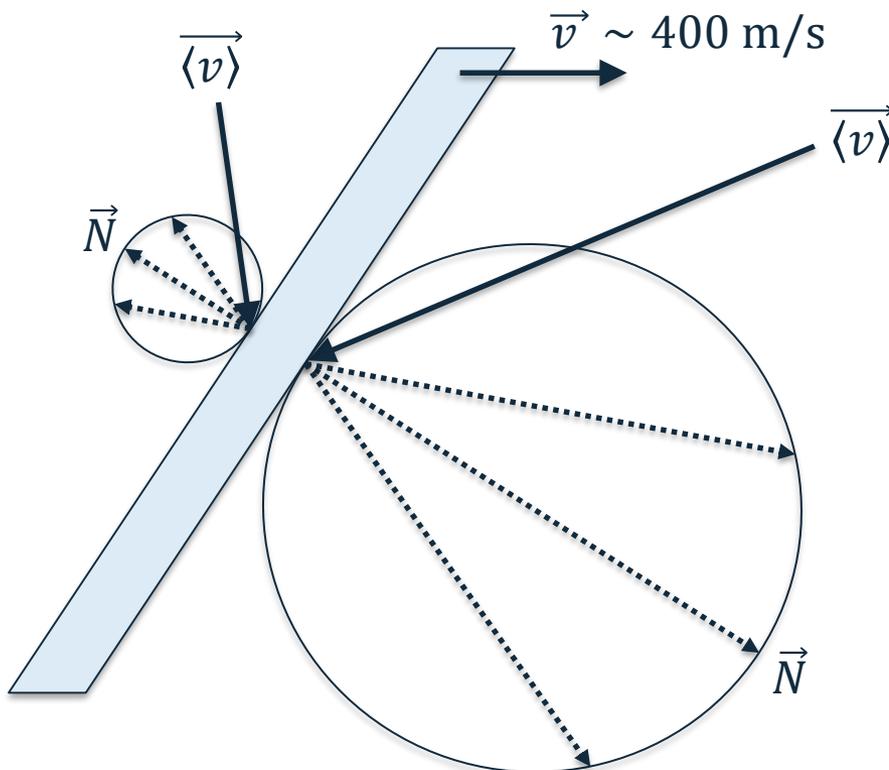


BOMBA TURBOMOLECULAR Distribuição Maxwell-Boltzmann

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Interações moleculares com a superfície

- Lâminas em movimento



$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

N_2 @ $T = 300$ K:

$$\langle v \rangle \sim 470 \text{ m/s}$$

Para influenciar o movimento, a velocidade das lâminas deve ser comparável à velocidade molecular

Tipicamente: 14000 a 90000 rpm

Exemplo:

Diâmetro da lâmina: 5 cm

Velocidade do rotor: 60000 rpm

$$\omega = 60000 \times 2\pi \text{ rad} \times \frac{1}{60 \text{ s}} \approx 6283 \text{ rad/s}$$

$$r = 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$v = \omega \cdot r \approx 157 \text{ m/s}$$

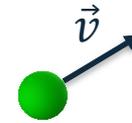
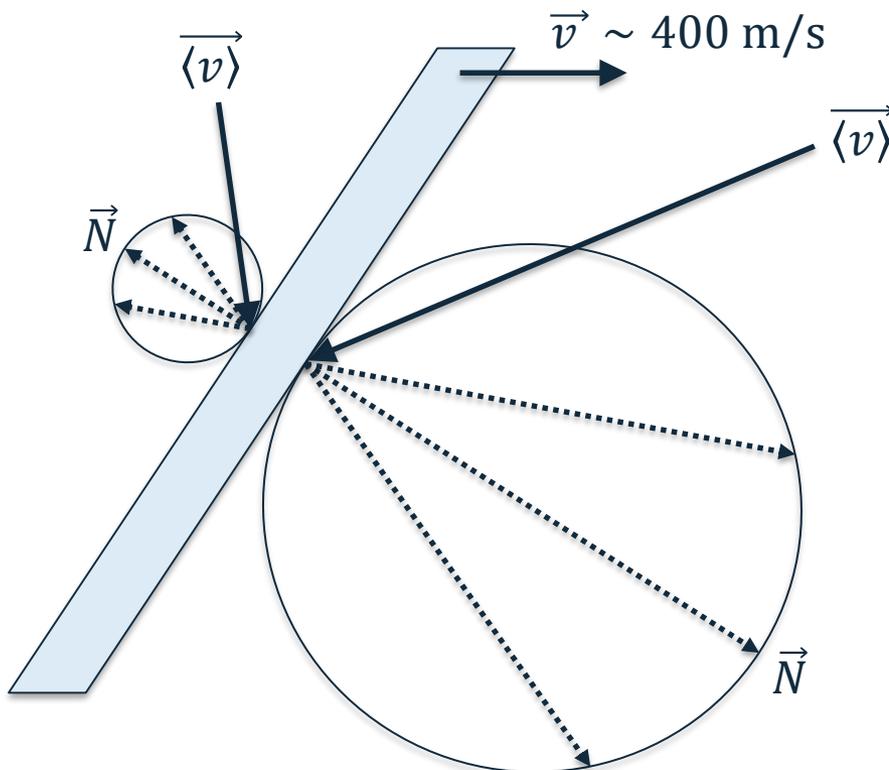


BOMBA TURBOMOLECULAR Distribuição Maxwell-Boltzmann

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Interações moleculares com a superfície

- Lâminas em movimento



$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

N_2 @ $T = 300$ K:

$$\langle v \rangle \sim 470 \text{ m/s}$$

Para influenciar o movimento, a velocidade das lâminas deve ser comparável à velocidade molecular

Tipicamente: 14000 a 90000 rpm

Exemplo:

Diâmetro da lâmina: 5 cm

Velocidade do rotor: **90000 rpm**

$$\omega = 90000 \times 2\pi \text{ rad} \times \frac{1}{60 \text{ s}} \approx 9425 \text{ rad/s}$$

$$r = 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$v = \omega \cdot r \approx 236 \text{ m/s}$$

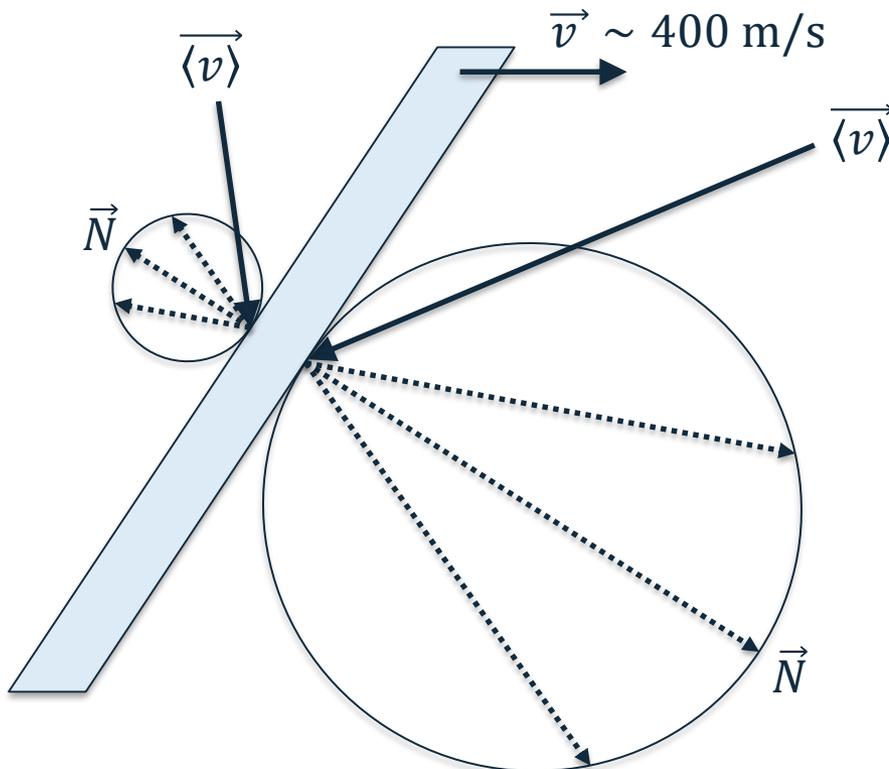


BOMBA TURBOMOLECULAR Distribuição Maxwell-Boltzmann

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Interações moleculares com a superfície

- Lâminas em movimento



$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

N_2 @ $T = 300$ K:

$$\langle v \rangle \sim 470 \text{ m/s}$$

Para influenciar o movimento, a velocidade das lâminas deve ser comparável à velocidade molecular

Tipicamente: 14000 a 90000 rpm

Exemplo:

Diâmetro da lâmina: **10 cm**

Velocidade do rotor: **90000 rpm**

$$\omega = 90000 \times 2\pi \text{ rad} \times \frac{1}{60 \text{ s}} \approx 9425 \text{ rad/s}$$

$$r = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$v = \omega \cdot r \approx 471 \text{ m/s}$$



BOMBA TURBOMOLECULAR

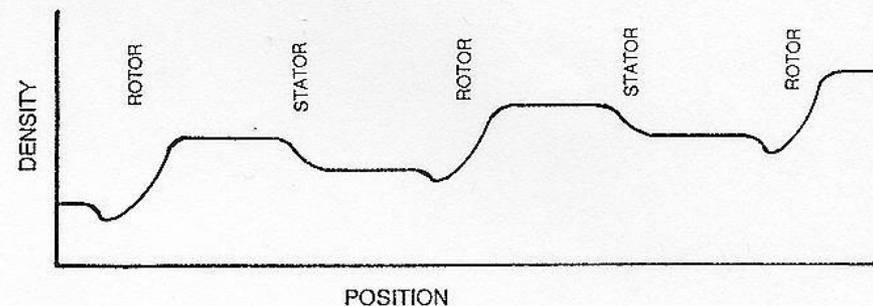
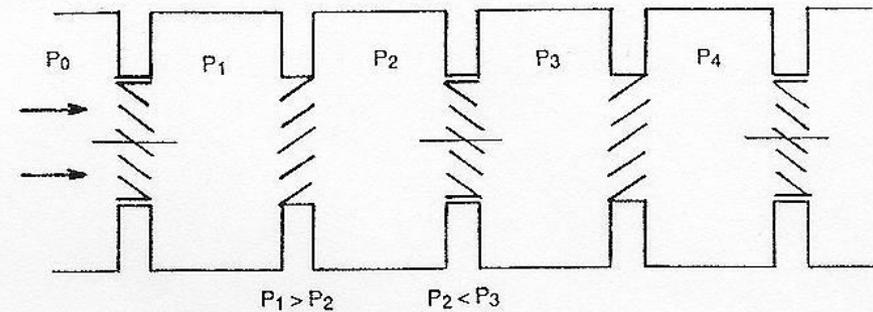
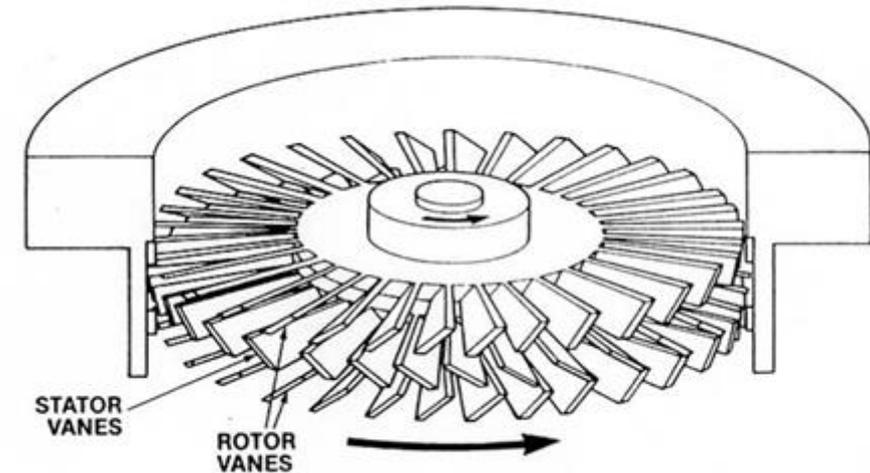
MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Estator

O **estator** possui funções complementares ao **rotor**:

- Termalizar gases acelerados pelo rotor, aumentando a eficiência de compressão do rotor seguinte
- Aumentar gradualmente a pressão de gás sem limitar tanto a condutância

Um estator é tão melhor quanto menor a distância entre os rotores



BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

As bombas turbomoleculares possuem *designs* bastante flexíveis

- Número de estágios
- Angulação das lâminas
- Bombas híbridas

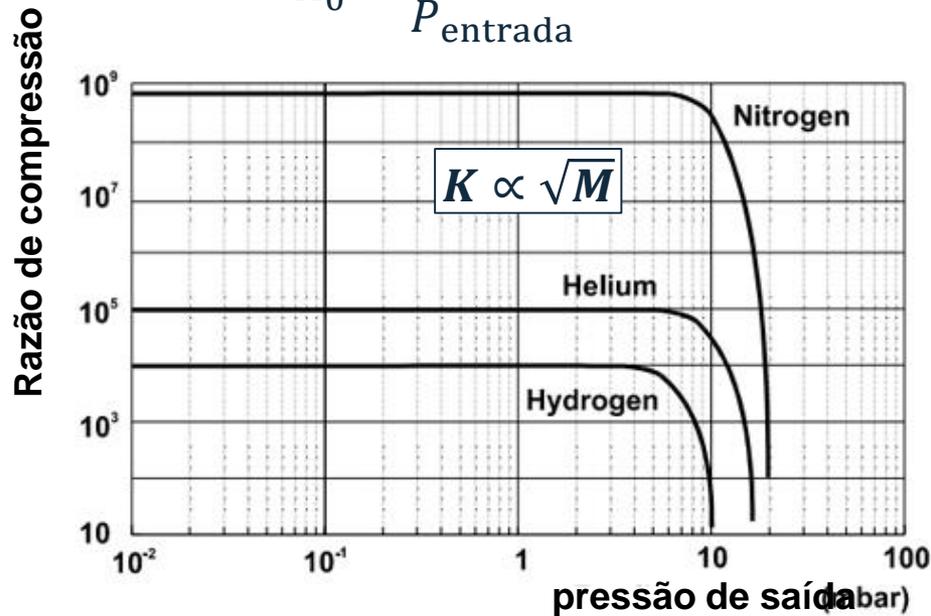


BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Razão de compressão (K_0)

$$K_0 \equiv \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}}$$



Valores típicos:

$$K_0(N_2) = 10^8 - 10^{10}$$

$$K_0(\text{He}) = 10^4 - 10^7$$

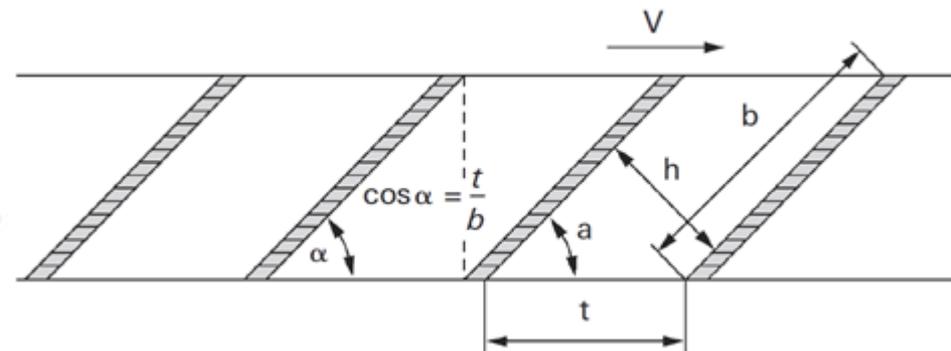
$$K_0(H_2) = 10^3 - 10^6$$

Para uma bomba turbomolecular:

$$K_0 \propto \exp \left[\frac{1}{\sin \alpha} \cdot \frac{v}{\langle v \rangle} \right]$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$v \equiv$ velocidade da lâmina



BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Bombas turbomoleculares atuam como compressores axiais

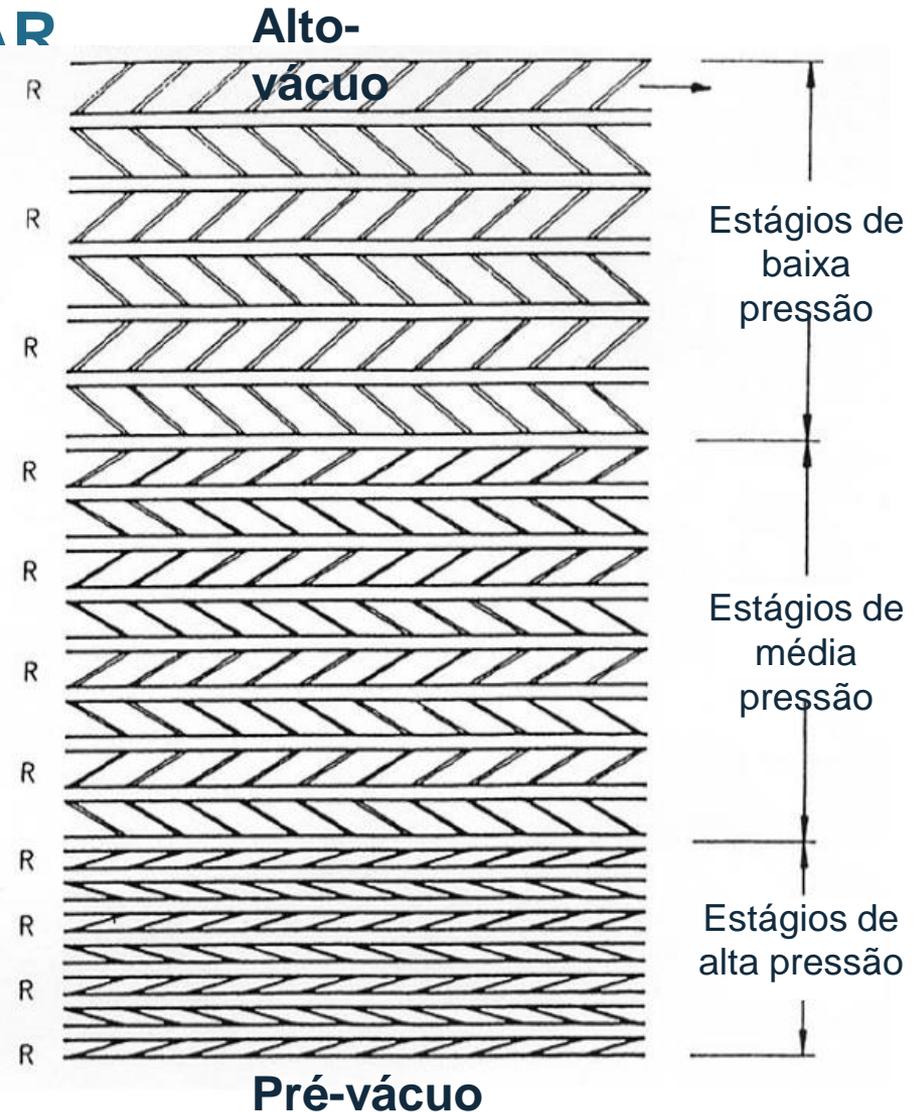
Angulação das lâminas

Alta angulação

- Maior condutância
 - Maior velocidade de bombeamento
- Baixa razão de compressão

Baixa angulação

- Menor condutância
 - Menor velocidade de bombeamento
- Alta razão de compressão

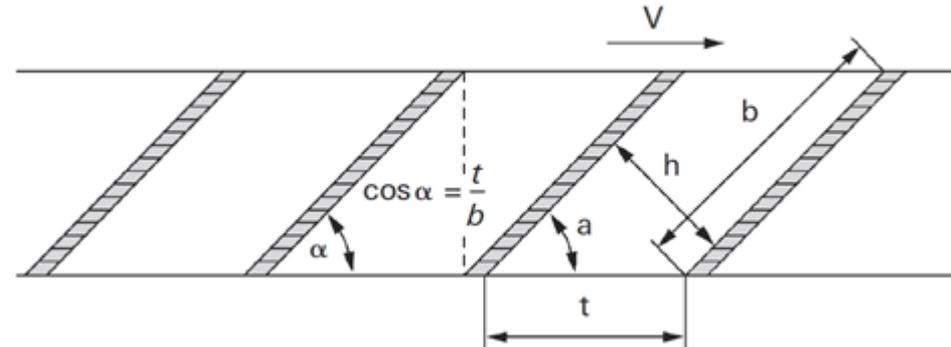


BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

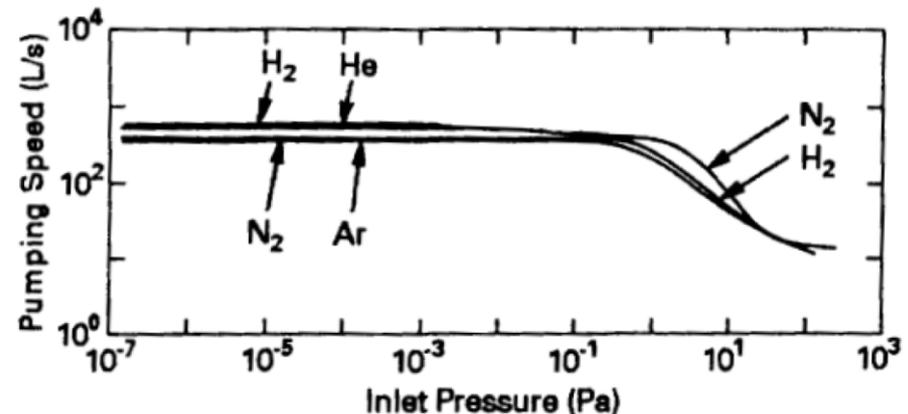
Velocidade de Bombeamento (S_0)

$$S_0 \approx \frac{1}{4} A \cdot v \cdot \text{sen}(2\alpha)$$



No regime molecular, a velocidade de bombeamento:

- independe da pressão
- Independe do tipo de gás (massa molecular)

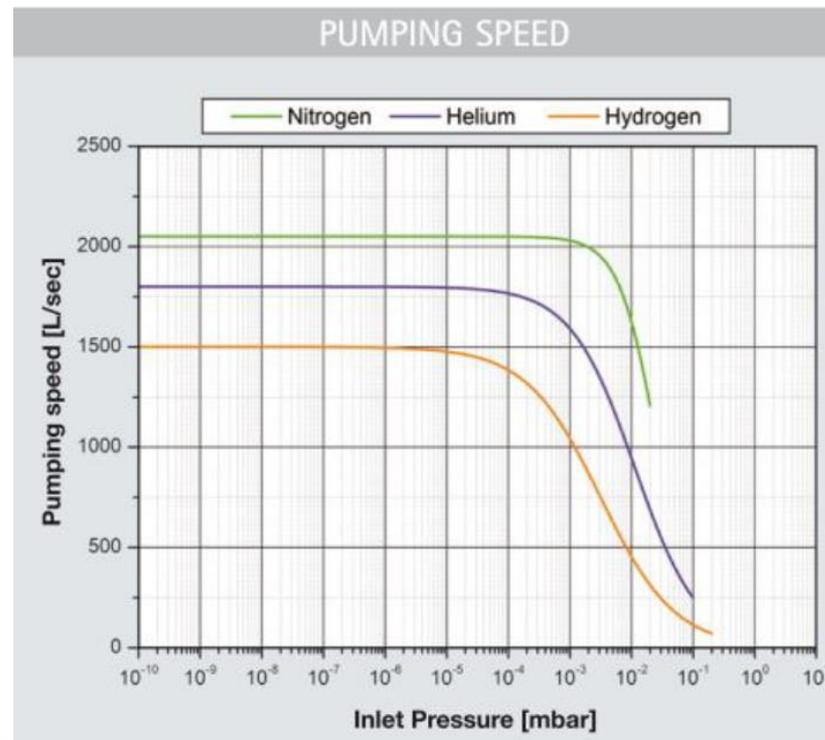
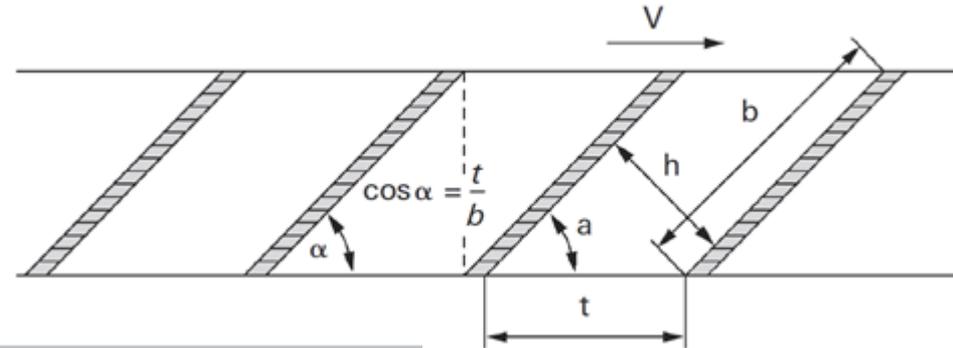


BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Velocidade de Bombeamento (S_0)

$$S_0 \approx \frac{1}{4} A \cdot v \cdot \text{sen}(2\alpha)$$

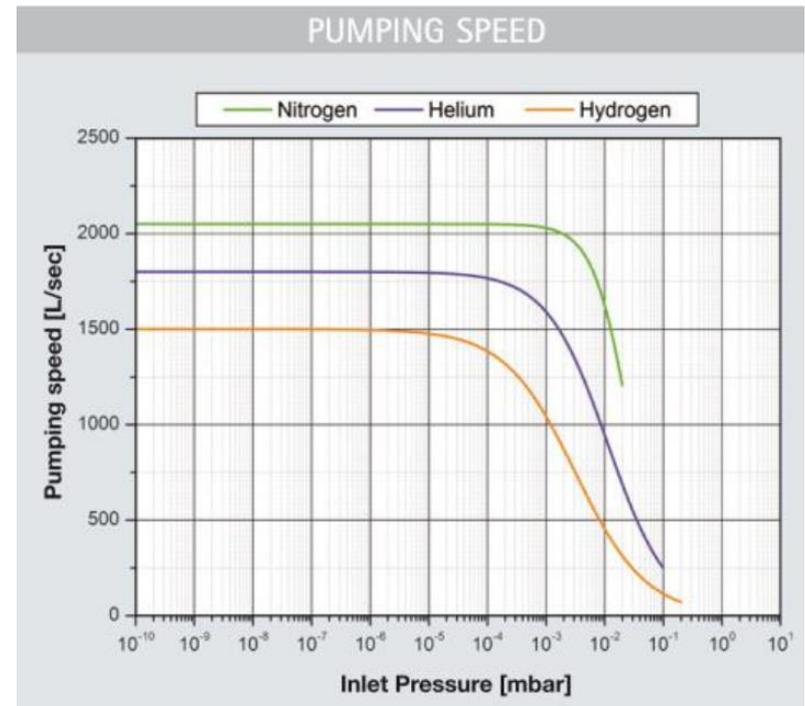
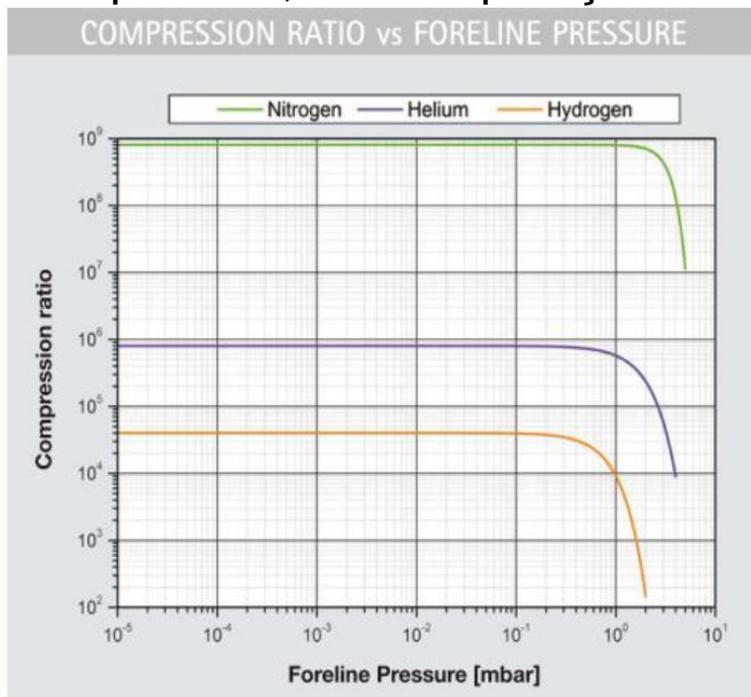


BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Características de bombeamento

- Velocidade de bombeamento e razão de compressão constantes para baixas pressões
- Forte dependência do tipo de gás (massa molecular) na razão de compressão, em comparação à velocidade de bombeamento

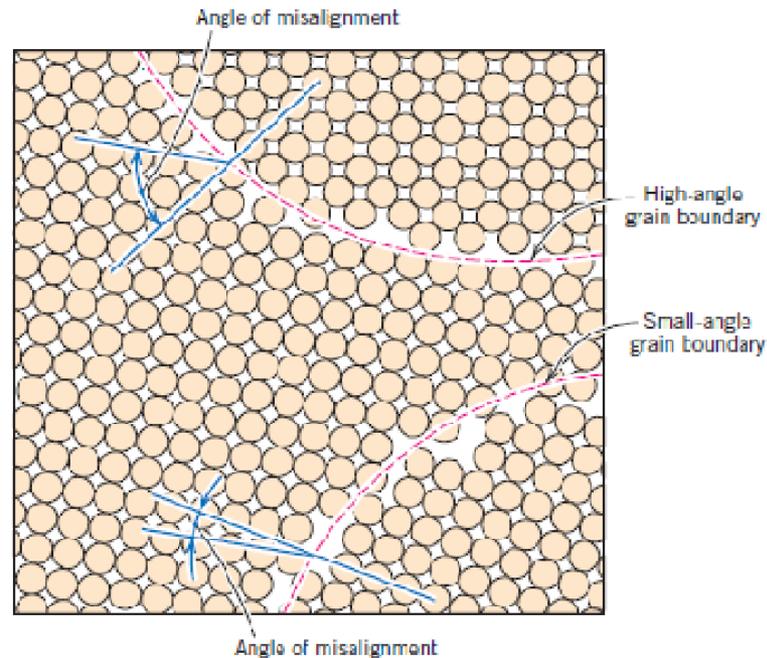


BOMBA TURBOMOLECULAR

❑ MATERIAIS

Lâminas

- A resistência mecânica e dureza de ligas metálicas é fortemente associada com sua granulação
- Dureza: $D = D_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$ $d \equiv$ tamanho médio dos grãos
 $D_0, k \equiv$ constantes do material



BOMBA TURBOMOLECULAR

☐ MATERIAIS

Lâminas

- Dureza: $D = D_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$ $d \equiv$ tamanho médio dos grãos
 $D_0, k \equiv$ constantes do material

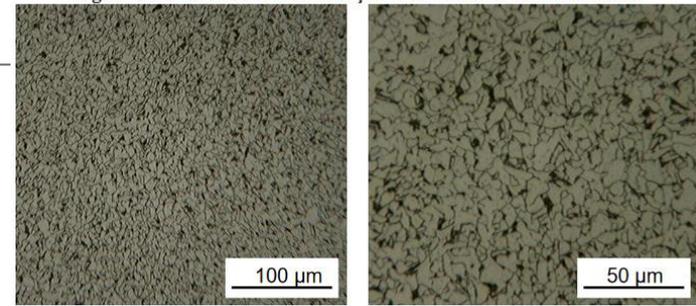
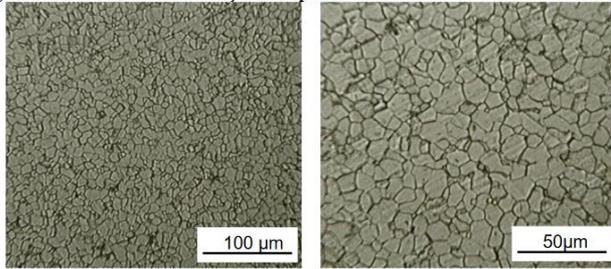


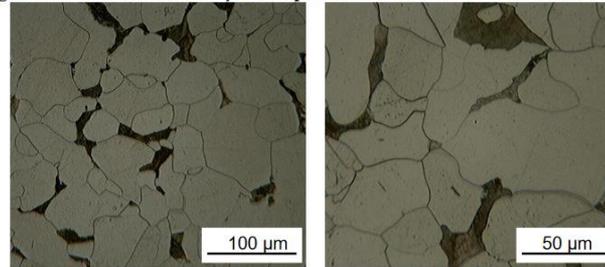
Figura 237: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 30 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

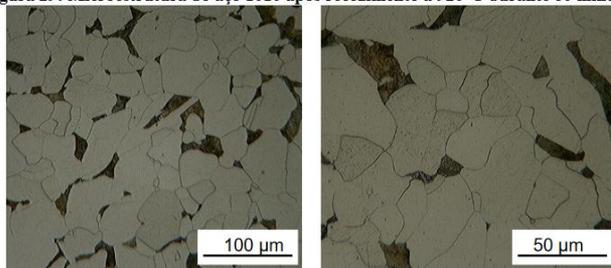
Figura 31: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 180 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

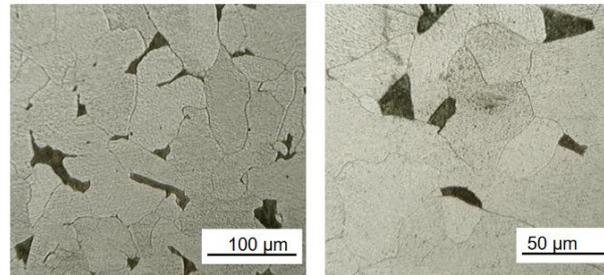
Figura 29: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 60 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

Figura 273: Microestrutura do aço AISI 1010 após recozimento a 920°C durante 360 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

BOMBA TURBOMOLECULAR

☐ MATERIAIS

Lâminas

- Dureza: $D = D_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$

 $d \equiv$ tamanho médio dos grãos

 $D_0, k \equiv$ constantes do material

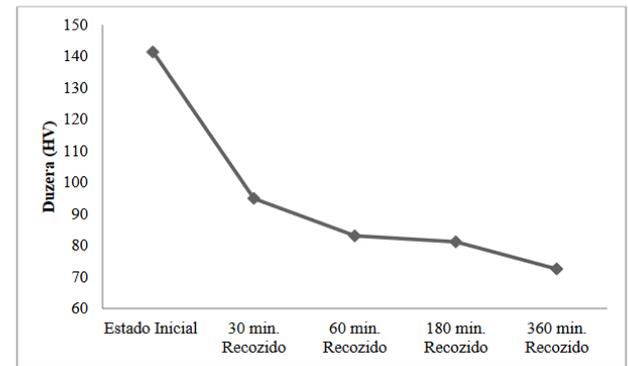
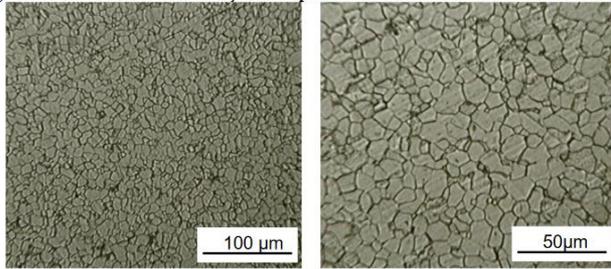


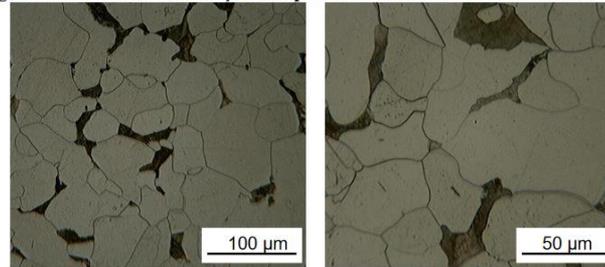
Figura 237: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 30 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

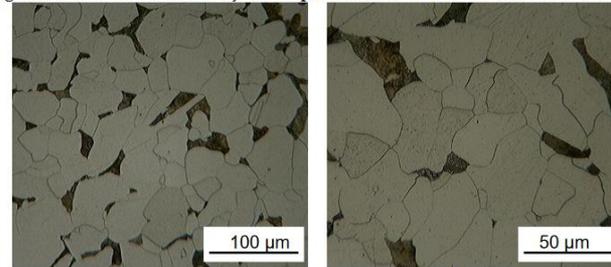
Figura 31: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 180 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

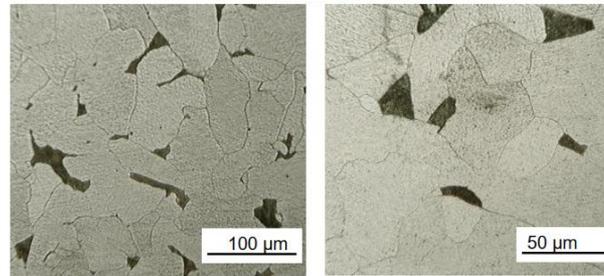
Figura 29: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 60 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

Figura 273: Microestrutura do aço AISI 1010 após recozimento a 920°C durante 360 minutos



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Bombas híbridas

A depender da aplicação, pode-se combinar diferentes conceitos de rotor:

Turbo pura (*full bladed*)



Turbo + Estágio de arraste (turbo/drag stage)



BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Bombas híbridas

A depender da aplicação, pode-se combinar diferentes conceitos de rotor:

Turbo + Estágio de arraste (*drag stage*)

Turbo pura (*full bladed*)



- Otimização de fluxo de gás
- Aplicação geral

Turbo com estágio Holweck



- Otimização de compressão
- Ultra-alto vácuo e baixa contaminação

BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Bombas híbridas

A depender da aplicação, pode-se combinar diferentes conceitos de rotor:

Turbo + Estágio de arraste (*drag stage*)

Comparação

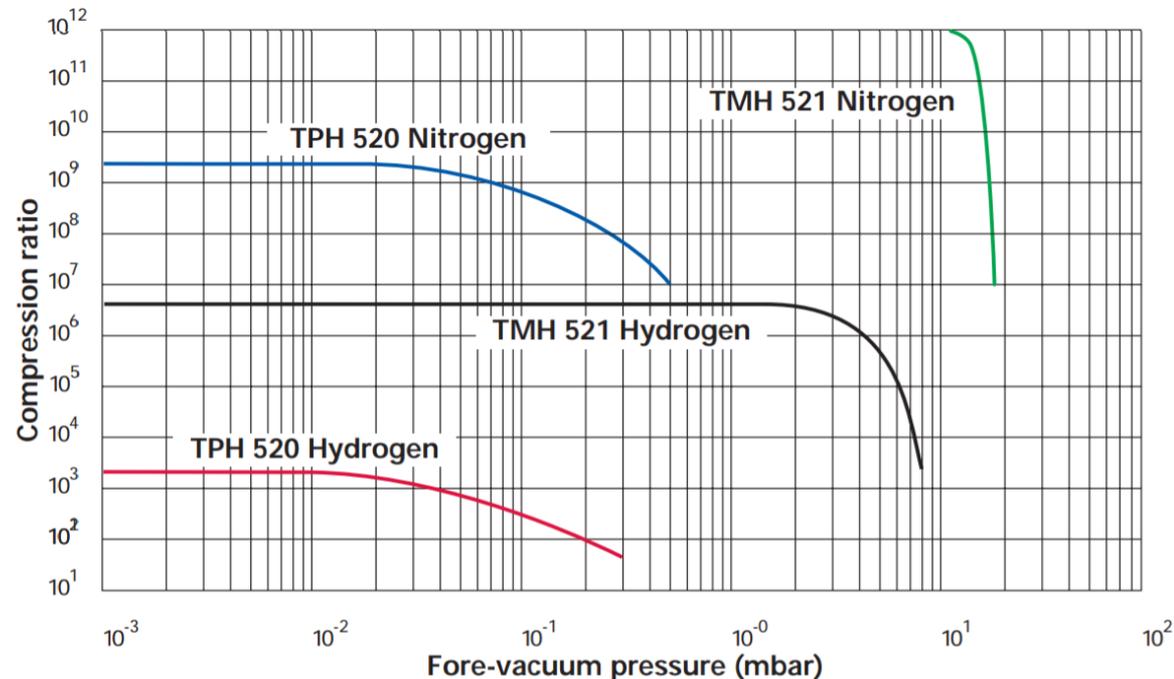
- TPH 520: bomba turbo clássica
- TMH 521: bomba turbo/*drag*

Desvantagem

- Redução da velocidade de bombeamento

Vantagens

- Aumento da razão de compressão diminuindo *backstraming* e pressão residual
- Maior pressão de pré-vácuo proporcionando o uso de bombas *backing* significativamente menores



BOMBA TURBOMOLECULAR

□ DESIGN

Bombas híbridas

A depender da aplicação, pode-se combinar diferentes conceitos de rotor:

Turbo + Estágio de arraste (*drag stage*)

Comparação

- TPH 520: bomba turbo clássica
- TMH 521: bomba turbo/*drag*

Desvantagem

- Redução da velocidade de bombeamento

Vantagens

- Aumento da razão de compressão diminuindo *backstraming* e pressão residual
- Maior pressão de pré-vácuo proporcionando o uso de bombas *backing* significativamente menores

Exemplo:

Suponha que o *throughput* de saída da bomba turbo seja de $Q = 1 \text{ mbar.l/s}$

- I. Bomba turbo clássica que suporta pressão de pré-vácuo de 0.1 mbar:

$$S = \frac{Q}{P} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ l/s}$$

- II. Bomba turbo/*drag* que suporta pressão de pré- vácuo 5 mbar:

$$S = \frac{Q}{P} = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ l/s}$$

BOMBA TURBOMOLECULAR

BOMBA TURBODRAG



BOMBA TURBOMOLECULAR

☐ SEGURANÇA

- Rotores de TMP armazenam energia rotacional
- No caso do rotor ser interrompido repentinamente, a energia rotacional é transferida



Tela de proteção para TMPs



BOMBA TURBOMOLECULAR

□ APLICAÇÕES

ETA II (*Experimental Test Accelerator*) @ Lawrence Livermore National Laboratory

LINAC de elétrons @ 4.5 MeV



BOMBA TURBOMOLECULAR

❑ PRÓS E CONTRAS

Vantagens

- Fácil de operar
- Pouca manutenção
- Limpa: operação livre de hidrocarbonetos
 - Excelente combinação com bomba de diafragma
- Não requer regeneração
- Opera a altas velocidades de bombeamento no intervalo de alto e ultra-alto vácuo

Desvantagens

- Alto custo de aquisição e manutenção
- A alta rotação torna a bomba mecanicamente vulnerável
- Sensível a choques mecânicos
- Produz vibração e ruído elétrico
- Velocidade de bombeamento reduzido para gases leves



BOMBAS CRIOGÊNICAS

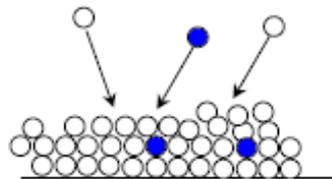
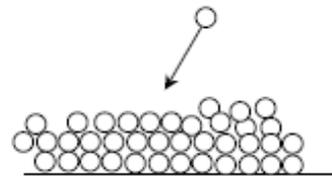
BOMBA CRIOGÊNICA

❑ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Bombas criogênicas (*cryo/cryogenic pumps*) capturam gases em suas superfícies extremamente frias

“Bombeamento” de gases por:

- Crio-sorpção (*cryo-sorption*):
zeólita, cerâmica porosa, carvão, ...
- Crio-condensação (*cryo-condensatio*
- Crio-armadilhamento (*cryo-trapping*)

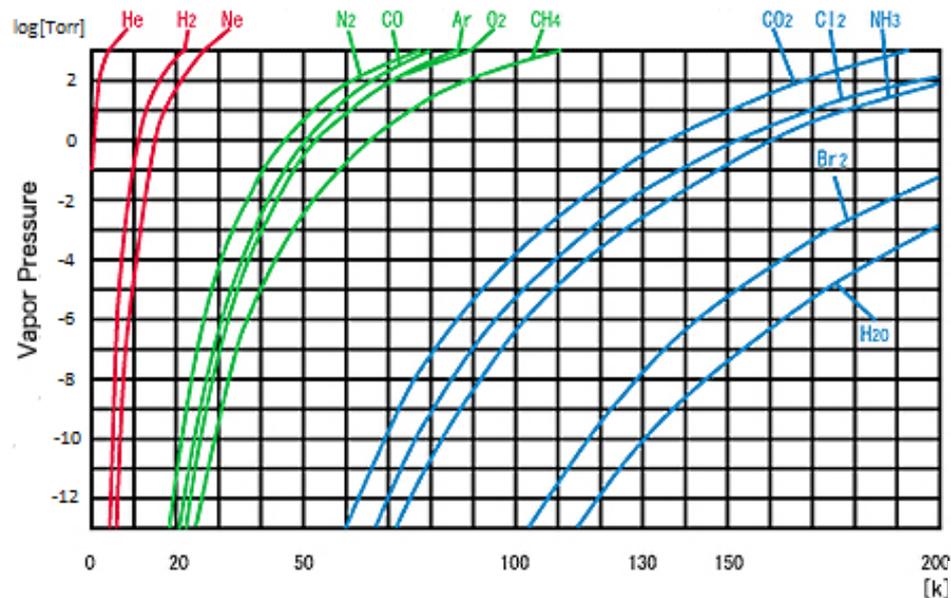


BOMBA CRIOGÊNICA

MECANISMO DE BOMBEAMENTO

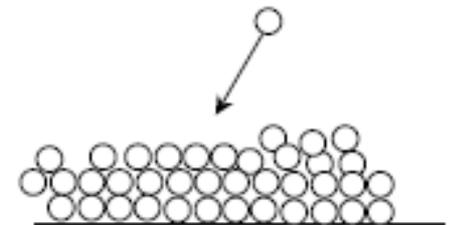
Pressão de vapor

Pressão exercida pelo vapor em equilíbrio termodinâmico com sua fase condensada a uma dada temperatura. Indica a taxa de evaporação de uma substância



■ Crio-condensação

- **A pressão de vapor limita a pressão residual de bombas de crio-condensação**



BOMBA CRIOGÊNICA

MECANISMO DE BOMBEAMENTO

- Crio-condensação

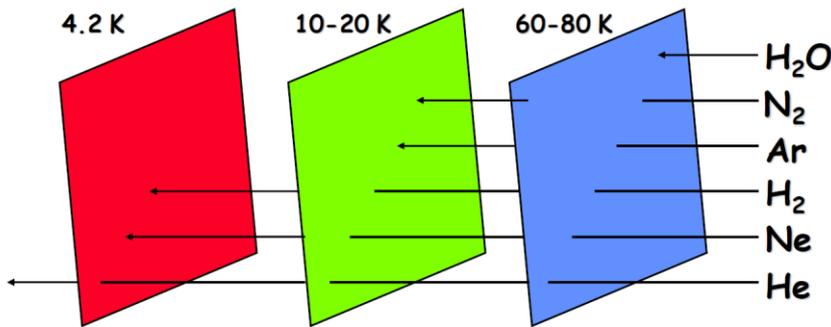
Temperatura de condensação:

Água e hidrocarbonetos: ----- ~ 100 K (~ LN₂)

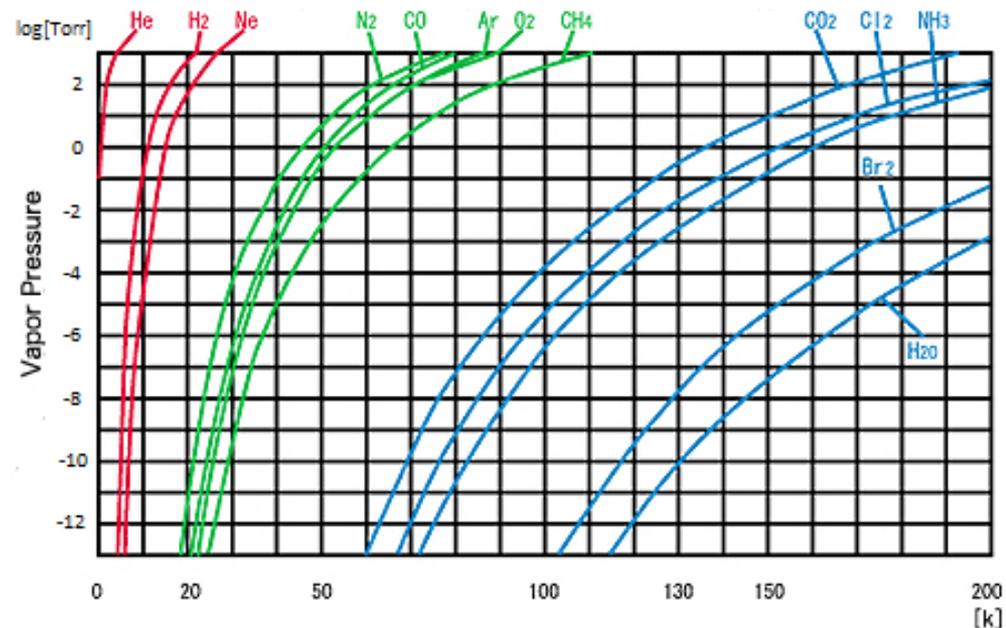
Componentes do ar: ----- ~ 20 K (hidrogênio líquido)

Isótopos de hidrogênio e neônio: ---- ~ 4 K (LHe)

Por questão de custo, muitas bombas operam à temperatura de 20 K (hidrogênio líquido)



Captura direta de gases condensáveis pode resultar no “bombeamento” de gases não-condensáveis



BOMBA CRIOGÊNICA

☐ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

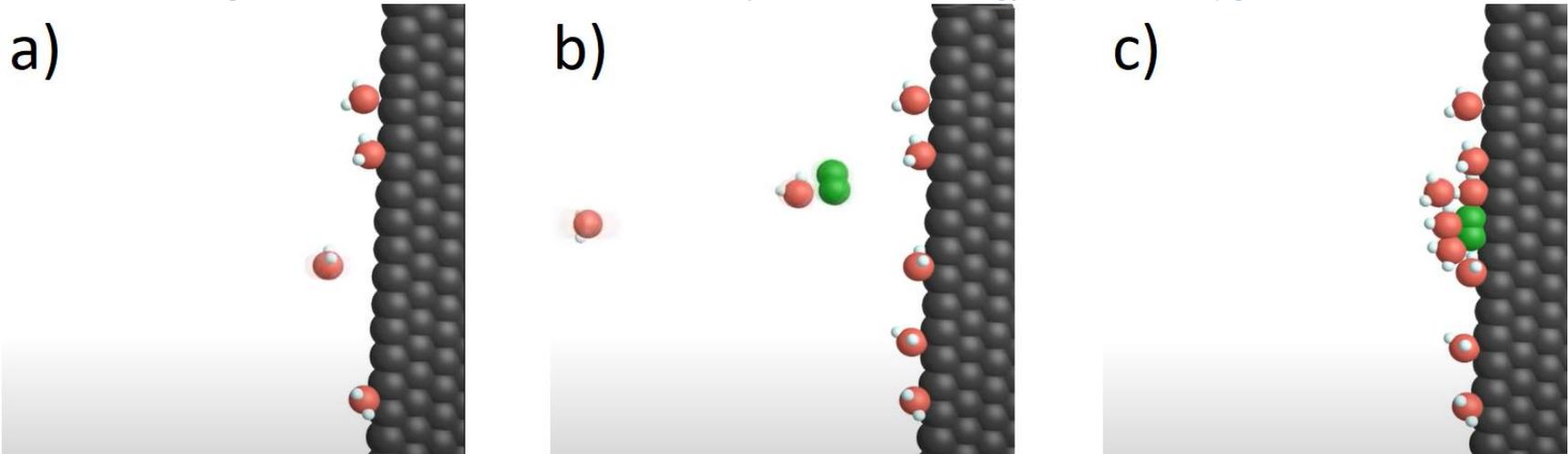
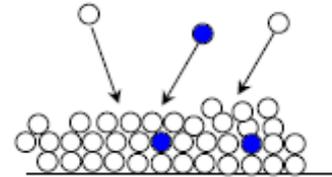
▪ Crio-armadilhamento

Captura direta de gases condensáveis pode resultar no “bombeamento” de gases não-condensáveis

À temperatura de nitrogênio líquido (LN₂):

- centenas de moléculas de H₂O condensadas podem capturar uma moléculas de N₂
- ~ 15 moléculas de amônia (NH₃) podem capturar uma molécula de H₂

Fonte: Igor Bello, “Vacuum and Ultrahigh Vacuum Physics and Technology”, CRC Press, pg. 601, 2018.



BOMBA CRIOGÊNICA

Bombas criogênicas (*cryo/cryogenic pumps*) capturam gases em suas superfícies extremamente frias

Funcionamento

- Baseado em captura por condensação + adsorção
- Bomba de *backing* não é requerida durante operação

Características

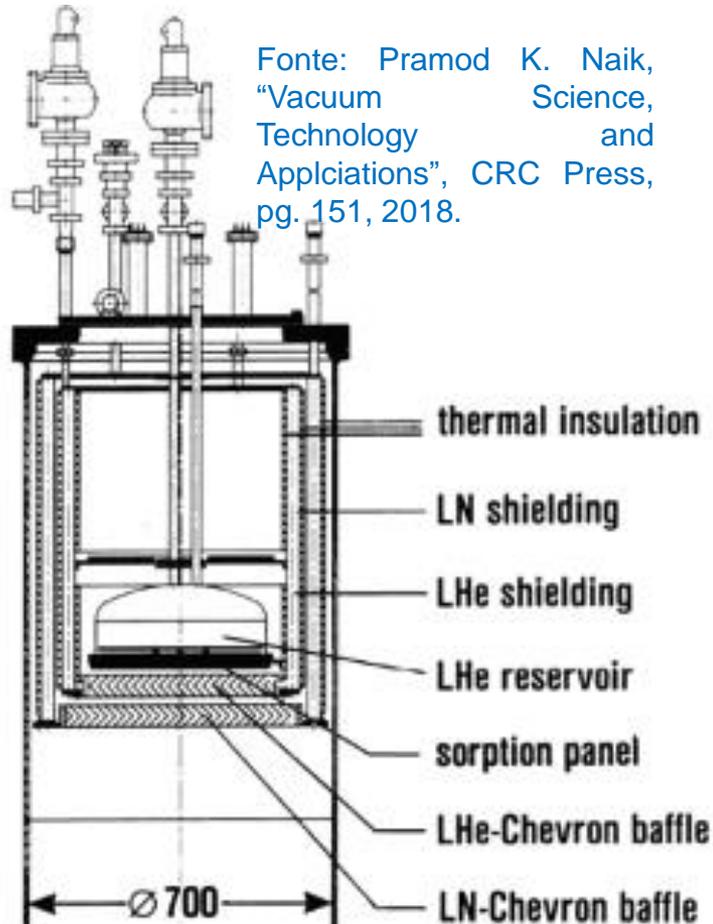
- Intervalo de operação
 Típico: 10^{-3} a 10^{-11} Torr
 Extremos: até 10^{-15} – 10^{-16} Torr
- Velocidade de bombeamento
 Típico: até 60.000 l/s – 100.000 l/s
 Extremos: milhões de l/s
- Temperatura de operação
 Típico: 15 K – 80 K (He gasoso)
 Extremos: 4 K (LHe)



BOMBA CRIOGÊNICA

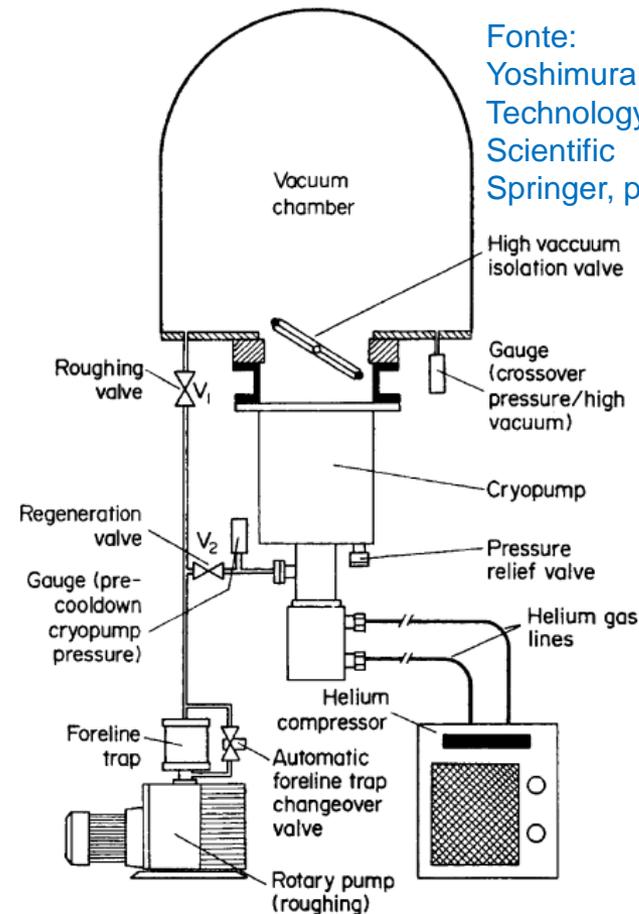
□ DESIGN

- Banho térmico



Fonte: Pramod K. Naik, "Vacuum Science, Technology and Applications", CRC Press, pg. 151, 2018.

- Circuito fechado de compressão de

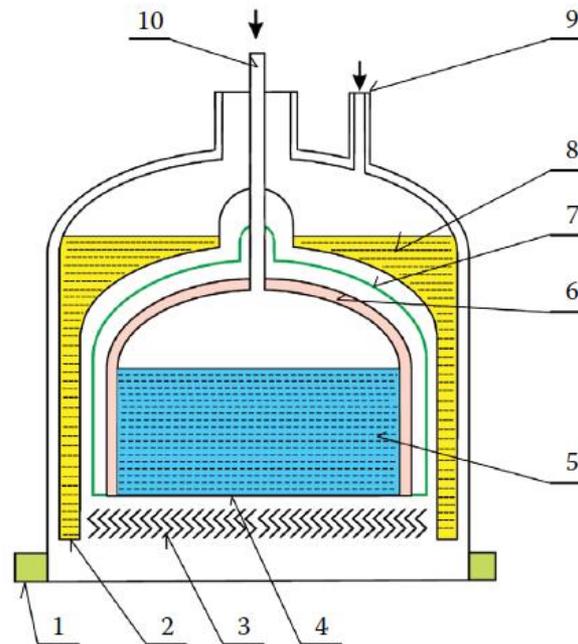


Fonte: Nagamitsu Yoshimura, "Vacuum Technology: Practice for Scientific Instruments", Springer, pg. 52, 2008.

BANHO TÉRMICO

□ DESIGN

Nas melhores condições experimentais (aproveitando o vapor de He como escudo térmico intermediário) uma bomba projetada para bombear hidrogênio a 4500 l/s consome 12 litros de LHe em cerca de 6 meses de ultra-alto vácuo



Fonte: Igor Bello, “Vacuum and Ultravacuum: Physics and Technology”, CRC Press, pg. 606, 2018.

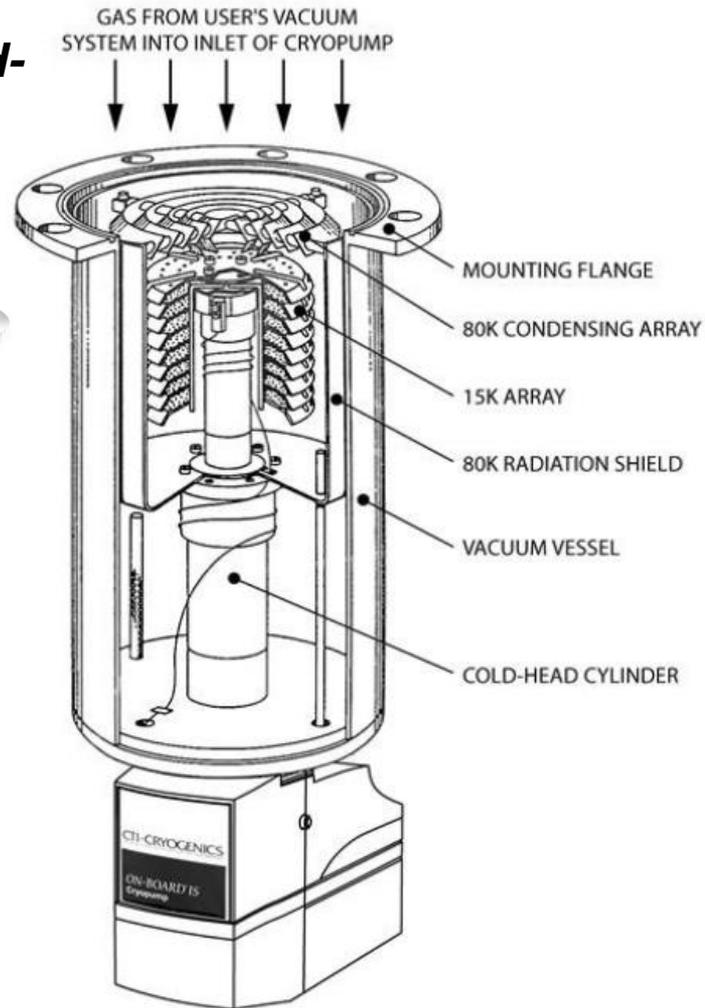
FIGURE 15.7

Container cryogenic pump with Ne gas switching: 1, flange; 2, LN₂ container; 3, chevron baffle; 4, pumping area; 5, LHe container; 6, Ne gas—vacuum switch; 7, shield T between LHe and LN₂; 8, LN₂; 9, LN₂ supply; 10, LHe supply. (Redrawn from Benvenuti, C., Reference 534. Copyright 1979, with permission from Elsevier.)

COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

□ DESIGN

A bomba criogênica é construída em torno do *cold-head*



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

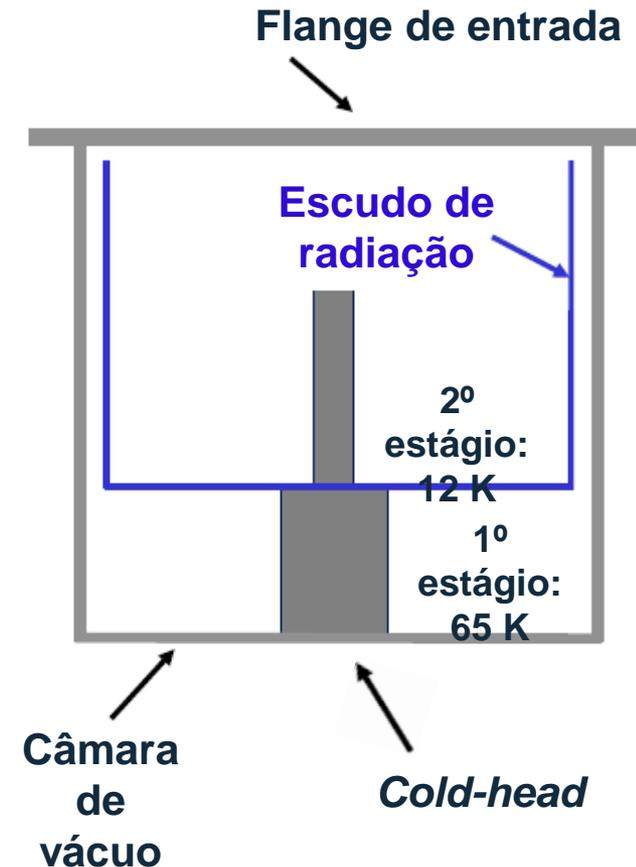
❑ DESIGN

A bomba criogênica é construída em torno do ***cold-head***

- Fornece a temperatura necessária para condensar e adsorver gases
- Atinge a temperatura através da compressão de hélio
- Estágios com temperaturas diferentes

Componentes:

- Câmara (*vacuum vessel*)
 - isola a bomba criogênica
- Blindagem de radiação (*radiation shield*)
 - preso ao primeiro estágio do *cold-head*
 - cobre (condutividade)
 - revestimento de níquel (proteção)
- Flange de entrada
 - anexado à câmara



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

□ DESIGN

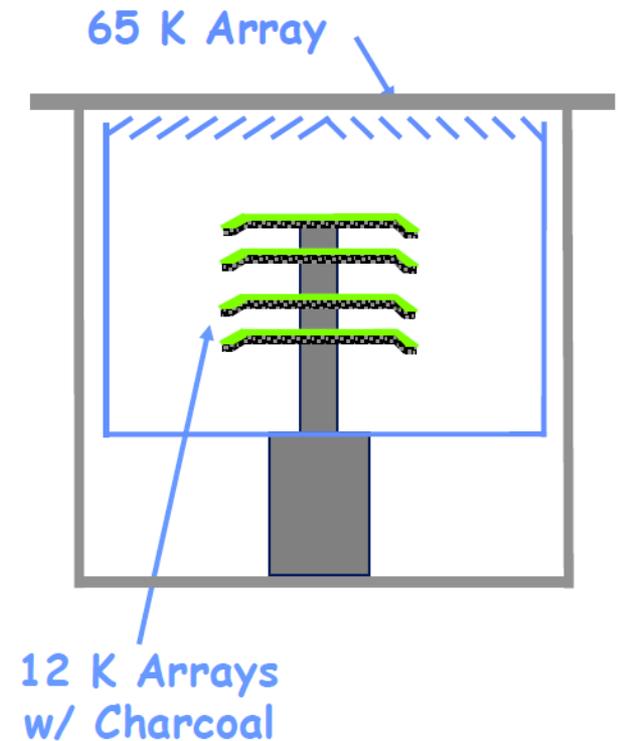
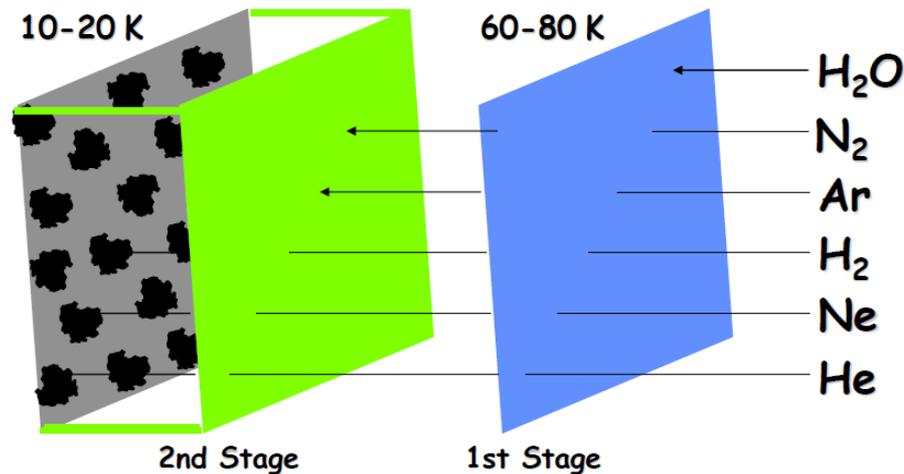
Exemplo

- **Primeira etapa (65 K)**

Crio-condensação + Crio-armadilhamento:

- **Segunda etapa (12 K)**

Crio-sorpção + Crio-condensação + Crio-armadilha



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

□ DESIGN

Exemplo

a) Primeira etapa

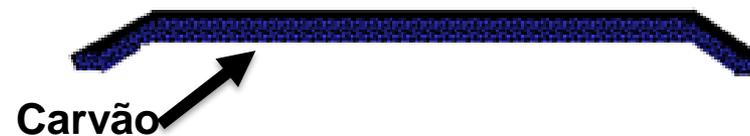
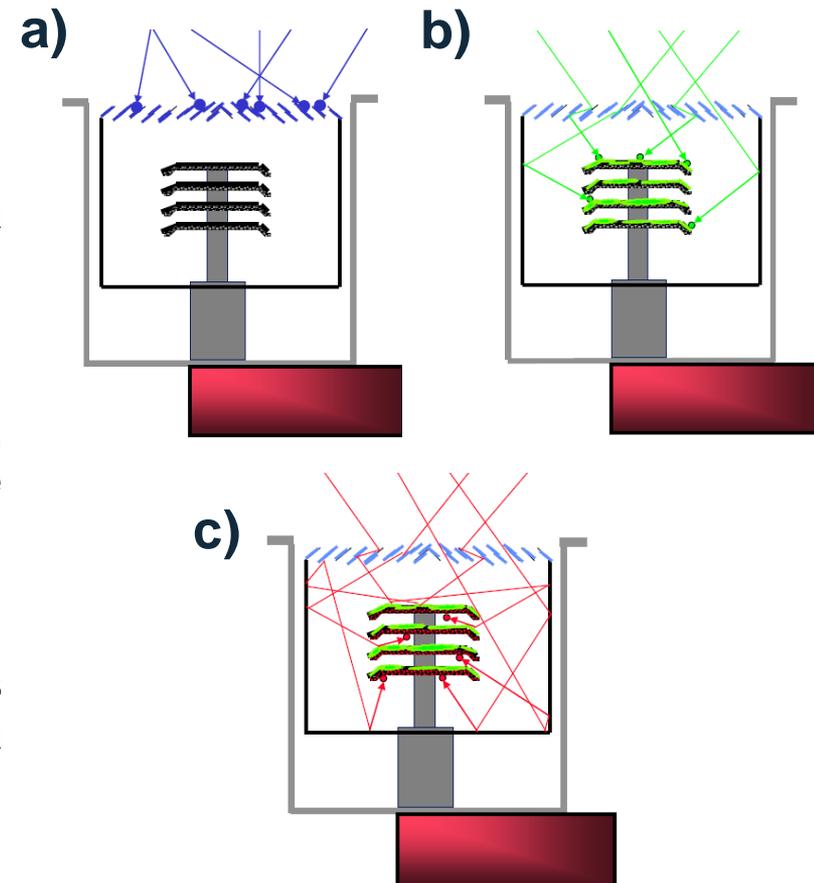
Condensação: moléculas de água colidem com a superfície resfriada a 65 K

b) Segunda etapa

Condensação: outras moléculas (oxigênio, nitrogênio e argônio), colidem com a superfície resfriada a 12 K

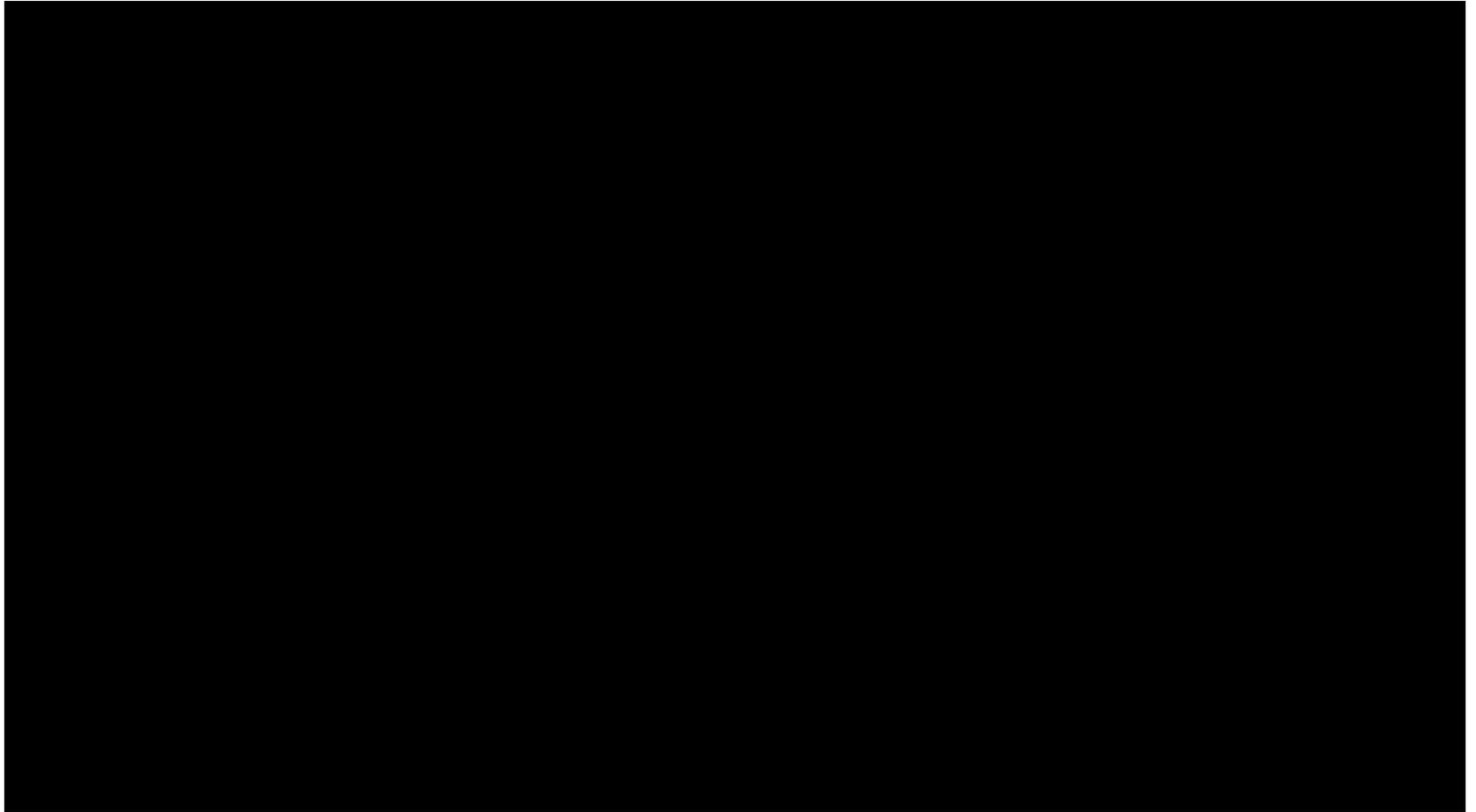
c) Terceira etapa

Adsorção: moléculas não-condensáveis (hidrogênio, hélio e neônio), colidem com a superfície de carvão resfriada a 12 K



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

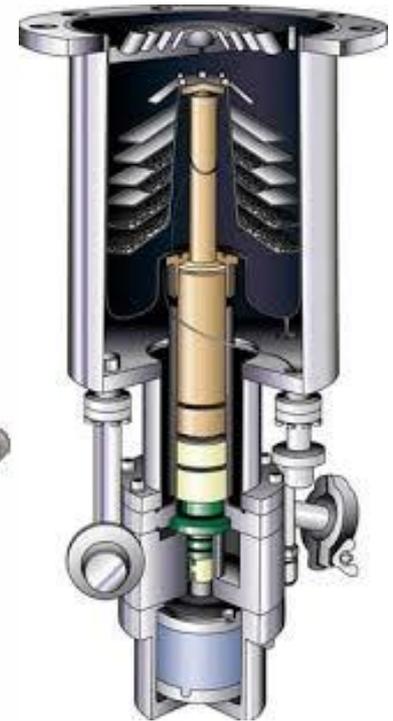
❑ MECANISMO DE BOMBEAMENTO / REGENERAÇÃO



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

❑ DESIGN

- Cabeça fria (*cold head*)



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

- ❑ PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: COLD-HEADER / SISTEMA COMPRESSÃO



COMPRESSÃO DE HÉLIO EM CIRCUITO FECHADO

❑ OPERAÇÃO



BOMBA CRIOGÊNICA

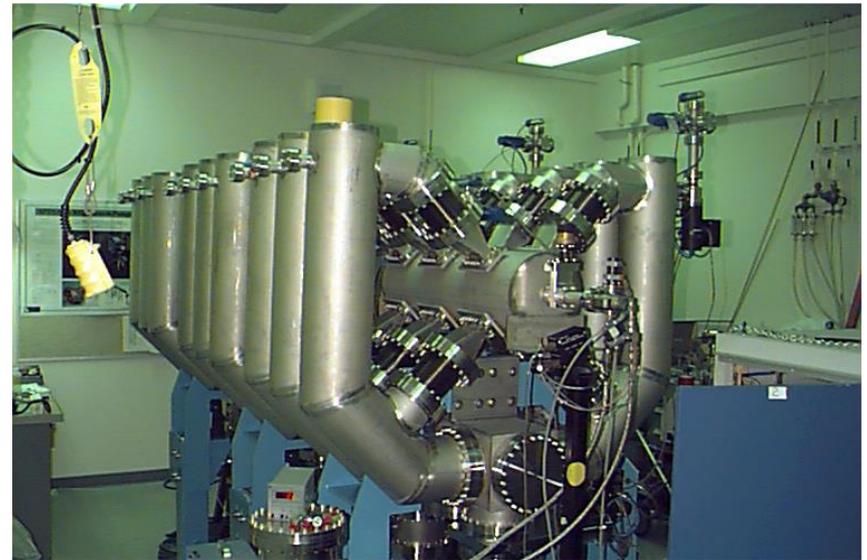
❑ APLICAÇÕES

Instalação APT/LEDA (Accelerator Production of Tritium Project/Low-Energy Demonstration Accelerator)

LINAC RFQ – Acelerador linear por Quadrupolo de Radiofrequência

Prótons 1 GeV

- Velocidade de bombeamento de 12.000 l/s para H₂

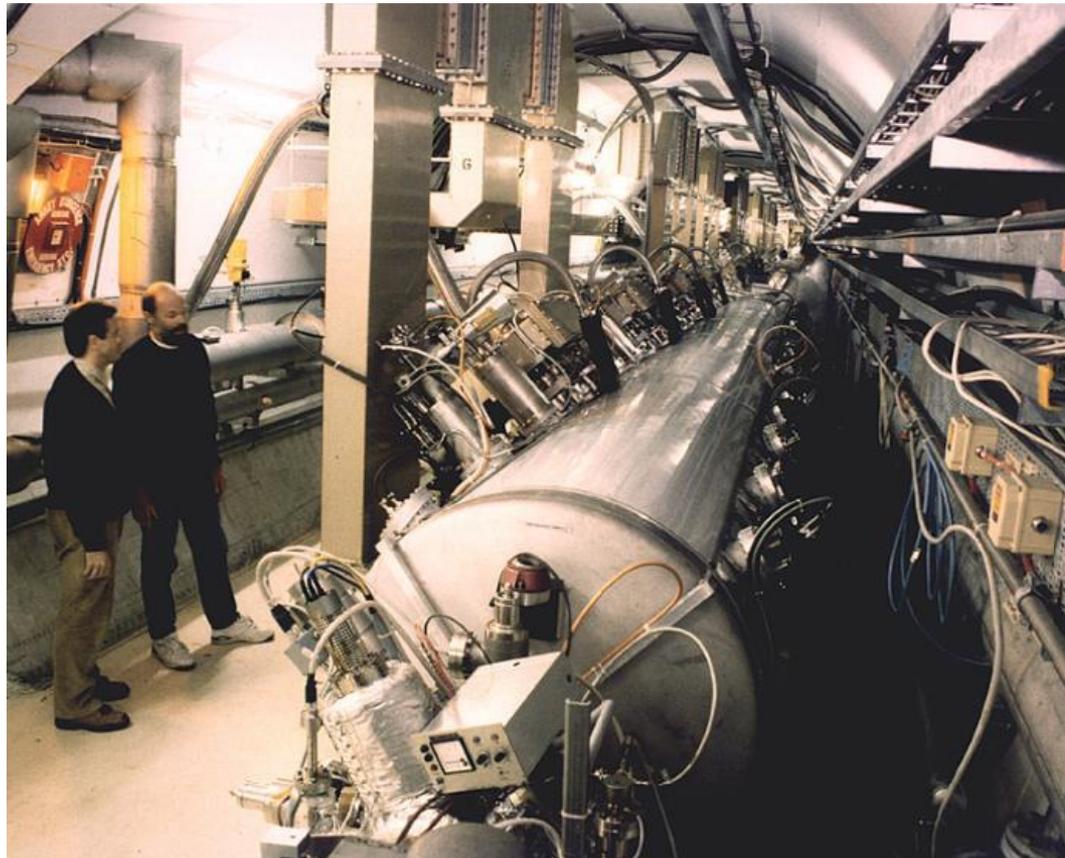


BOMBA CRIOGÊNICA

□ APLICAÇÕES

LEP2 (*Large Electron-Positron Collider*) @ CERN

Aceleradores de partículas: feixes de elétron e pósitron com 95-100 GeV

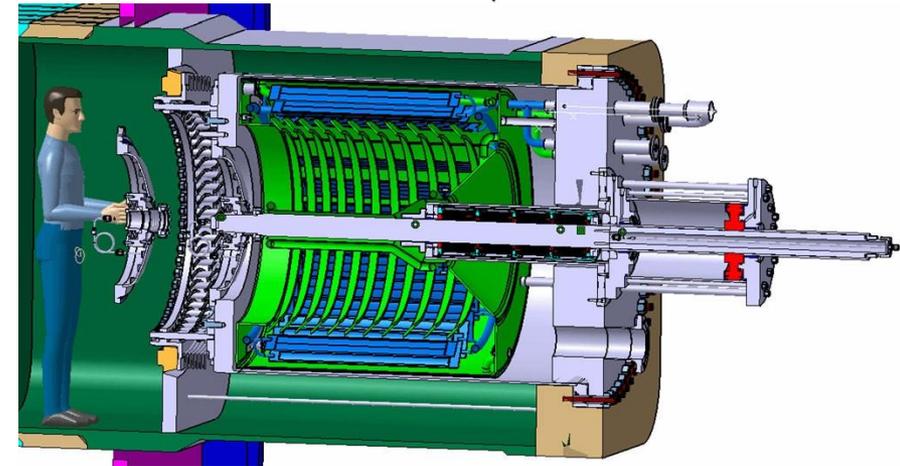
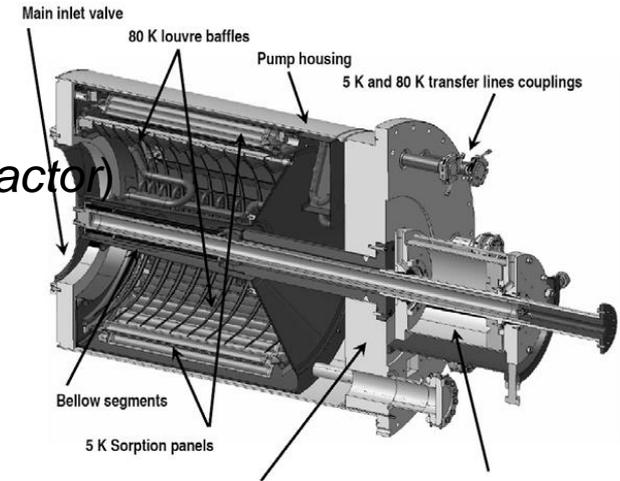
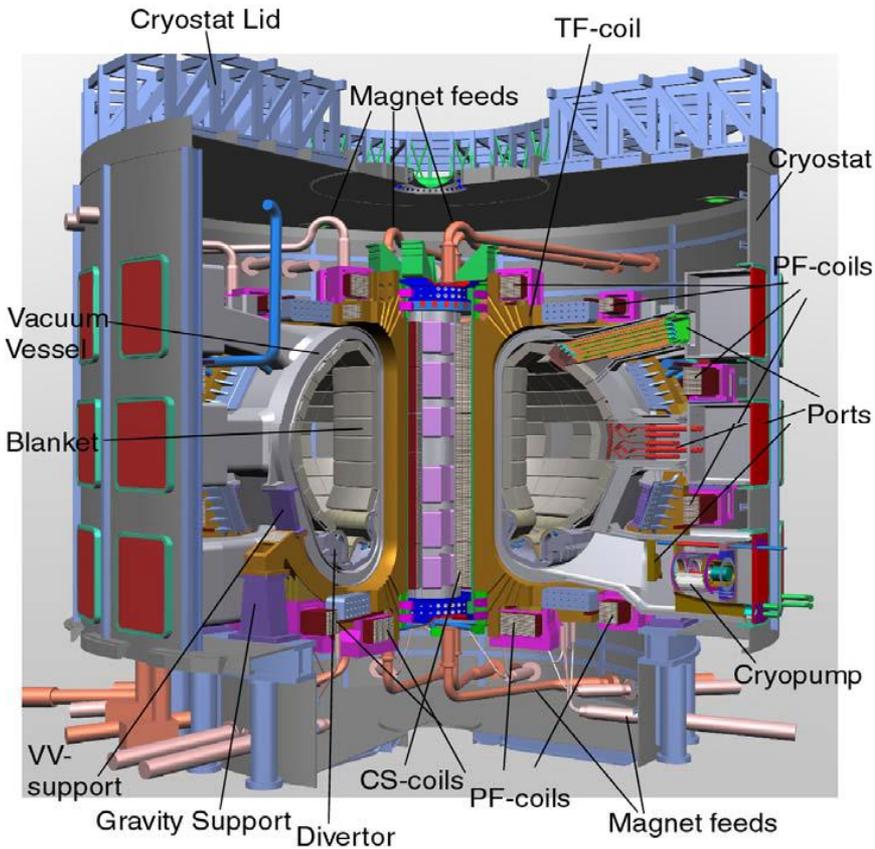


BOMBA CRIOGÊNICA

□ APLICAÇÕES

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*)

Fusão nuclear baseada em tecnologia Tokamak



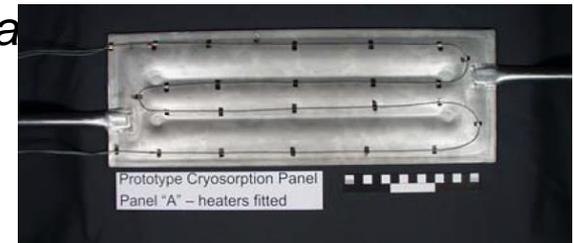
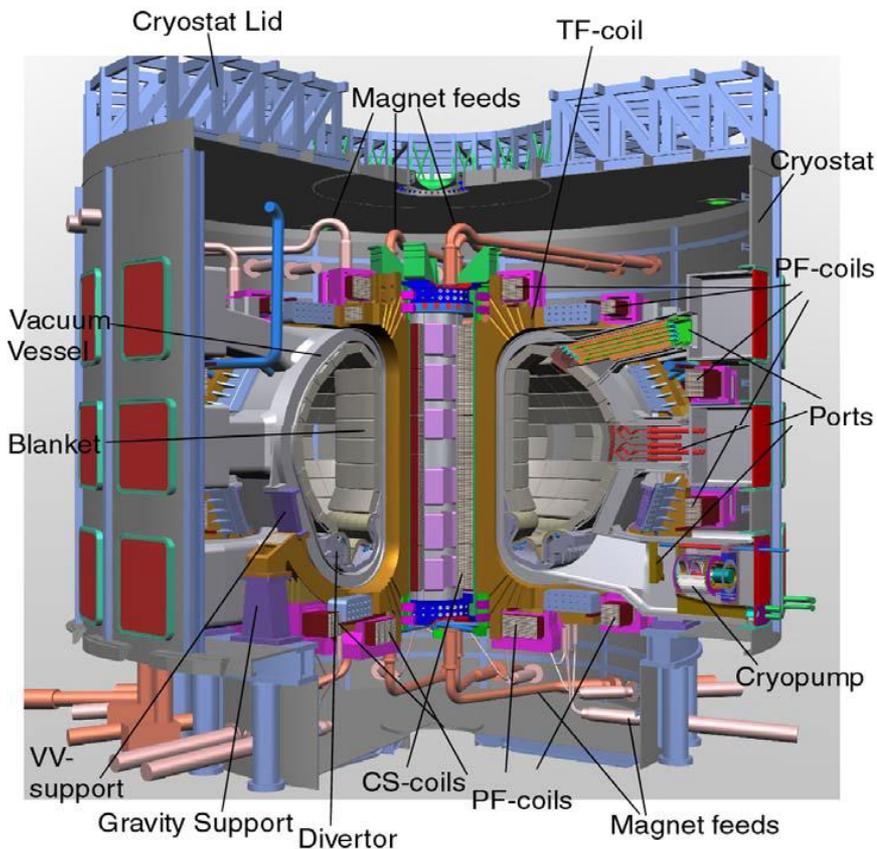
ITER Torus Cryopump

$S = 100.000 \text{ l/s}$ (todos os gases)

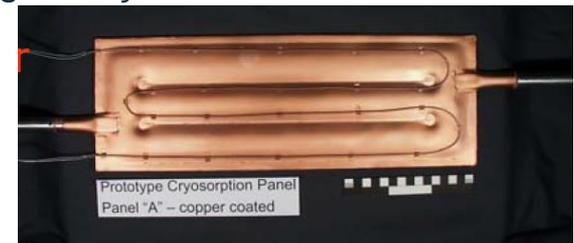
BOMBA CRIOGÊNICA

□ APLICAÇÕES

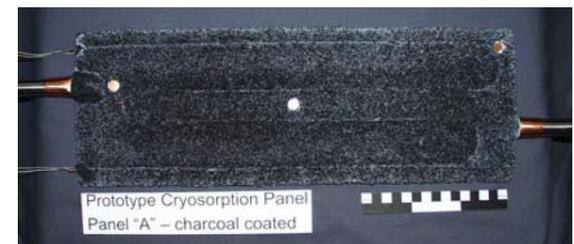
ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*)
Fusão nuclear baseada em tecnologia Tokamak



Aço inoxidável com aquecedores para regeneração



Revestimento de cobre (100 μm) para homogeneizar a temperatura



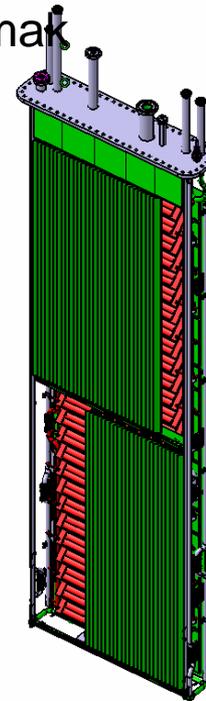
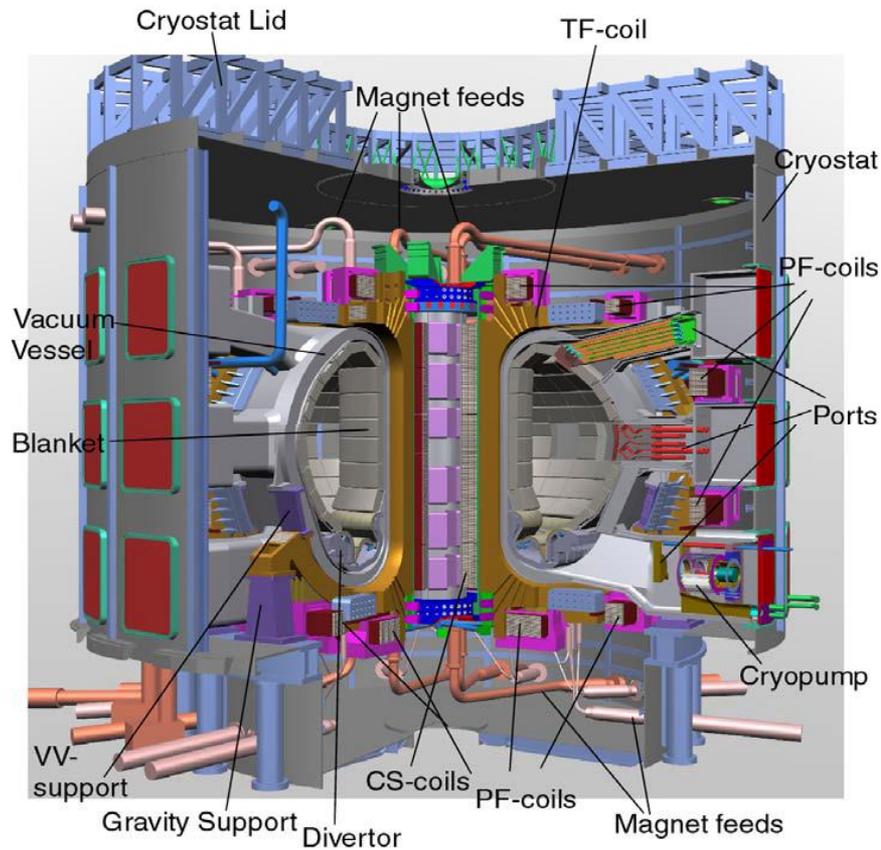
Revestimento de carvão de COCO

BOMBA CRIOGÊNICA

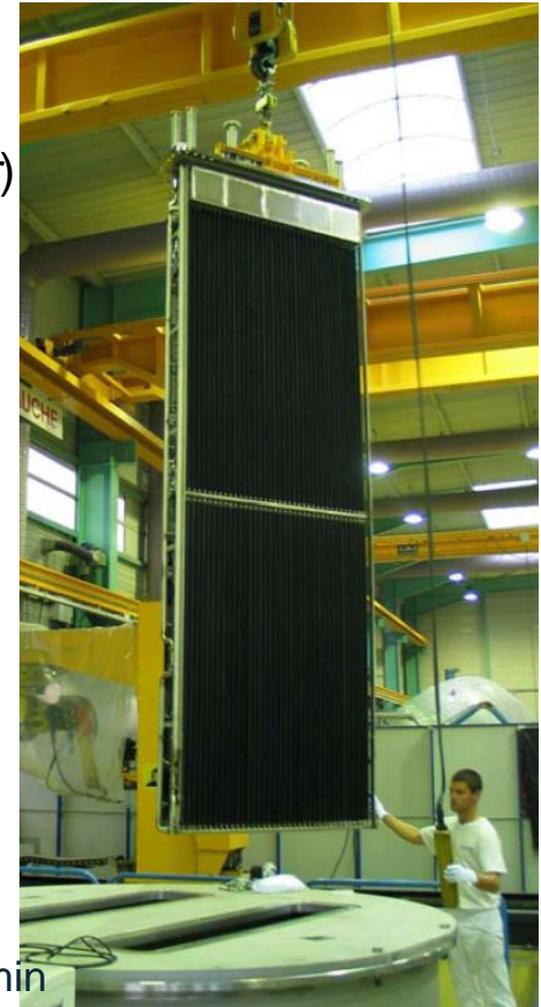
□ APLICAÇÕES

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*)

Fusão nuclear baseada em tecnologia Tokamak



Consumo:
LHe: 35 – 40 g/min
LN₂: 50 l/h

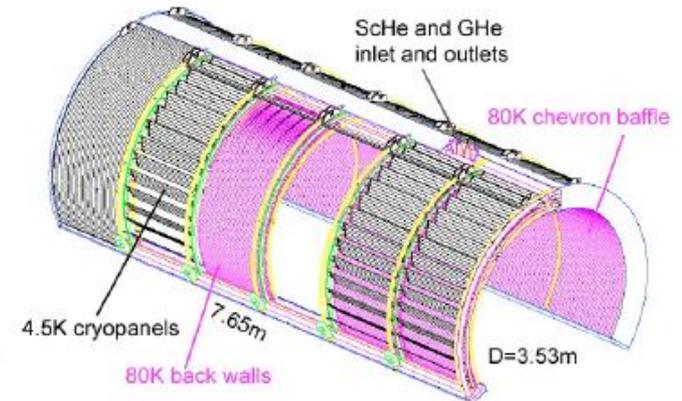
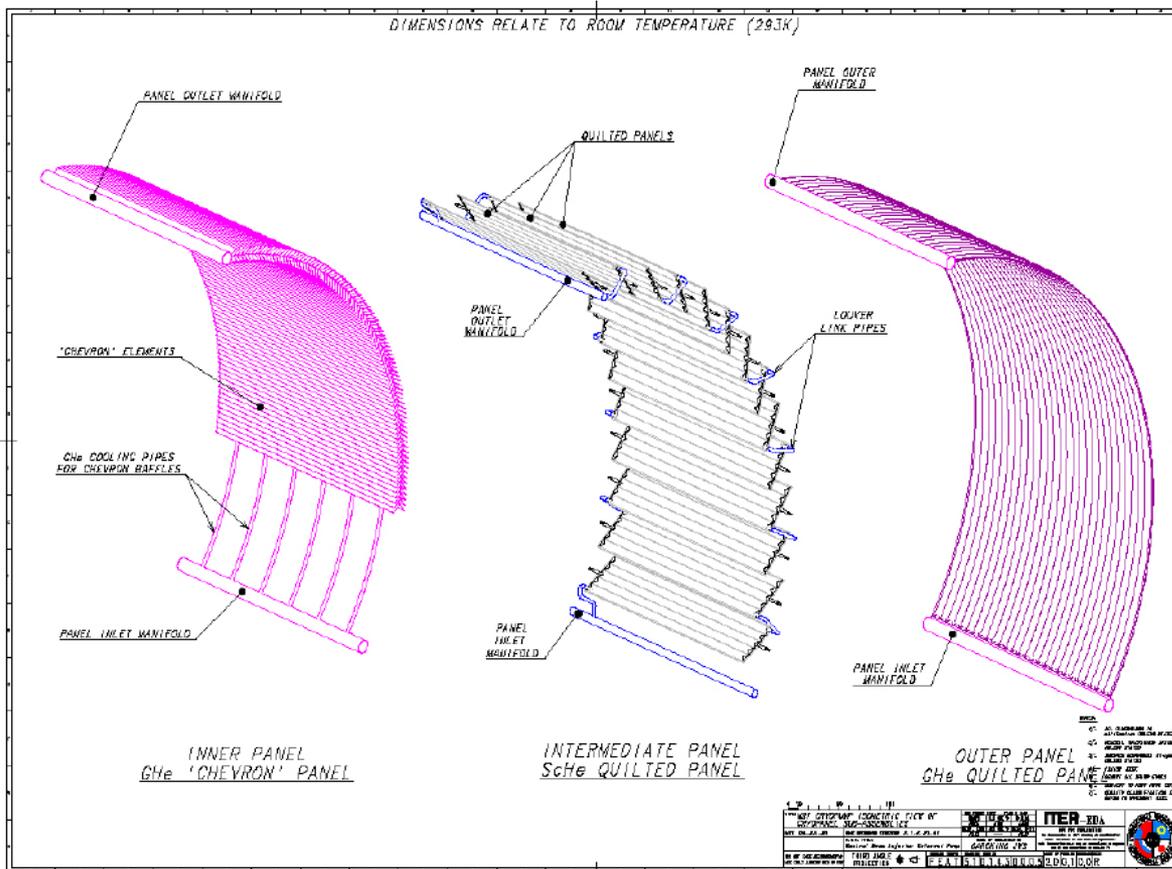


LHe @ 4.2 K
S = 400.000 l/s (H₂)

BOMBA CRIOGÊNICA

□ APLICAÇÕES

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*)



S = 4.000.000 l/s

BOMBA CRIOGÊNICA

❑ PRÓS E CONTRAS

Vantagens

- Produz as maiores velocidades de bombeamento dentre todas as bombas de vácuo
- Não necessita de bomba de *backing* durante a sua operação (somente início e regeneração)
- Boa velocidade de bombeamento para gases leves (exceto He)
- Limpa: operação livre de hidrocarbonetos
- Alta durabilidade: não possui partes móveis, rolamentos
- Pode ser instalada em todas as direções
- Opera em grande intervalo pressão
- Algumas podem operar sem fornecimento de eletricidade e em altos campos magnéticos
- Algumas são livres de vibrações*

Desvantagens

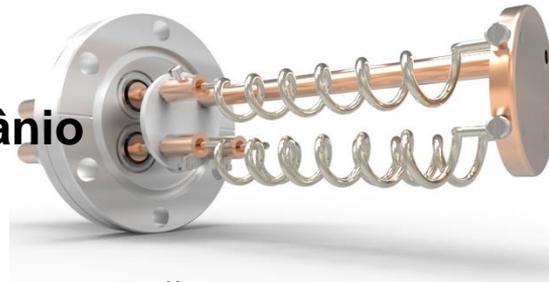
- Alto custo de aquisição e manutenção
- Requer regeneração

BOMBAS DE CAPTURA

BOMBA DE SUBLIMAÇÃO DE TITÂNIO

- ❑ Bombas de captura (*getters* ou *vacuum chemical pumps*) são baseadas em materiais que capturam moléculas de gás principalmente por quimissorção (*chemisorption*)

Bombas de Sublimação de Titânio

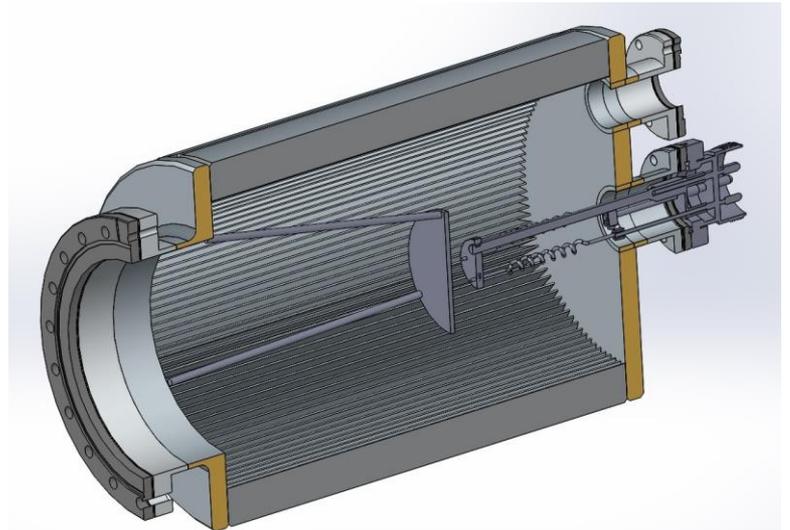


Funcionamento

- Baseado principalmente em sorção e reações químicas entre titânio (Ti) e moléculas de gás

Características

- Intervalo de operação
 10^{-5} a 10^{-12} Torr
- Velocidade de bombeamento
 Típico: ~ 10.000 l/s
 Extremos: até 10^6 l/s



BOMBA DE SUBLIMAÇÃO DE TITÂNIO

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

- Filamento de Ti (ou liga de Ti(85%)-Mo) é aquecido por efeito Joule até $\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Ti sublima a temperaturas abaixo de sua temperatura de fusão ($1660\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ti condensa nas paredes (aço inox)

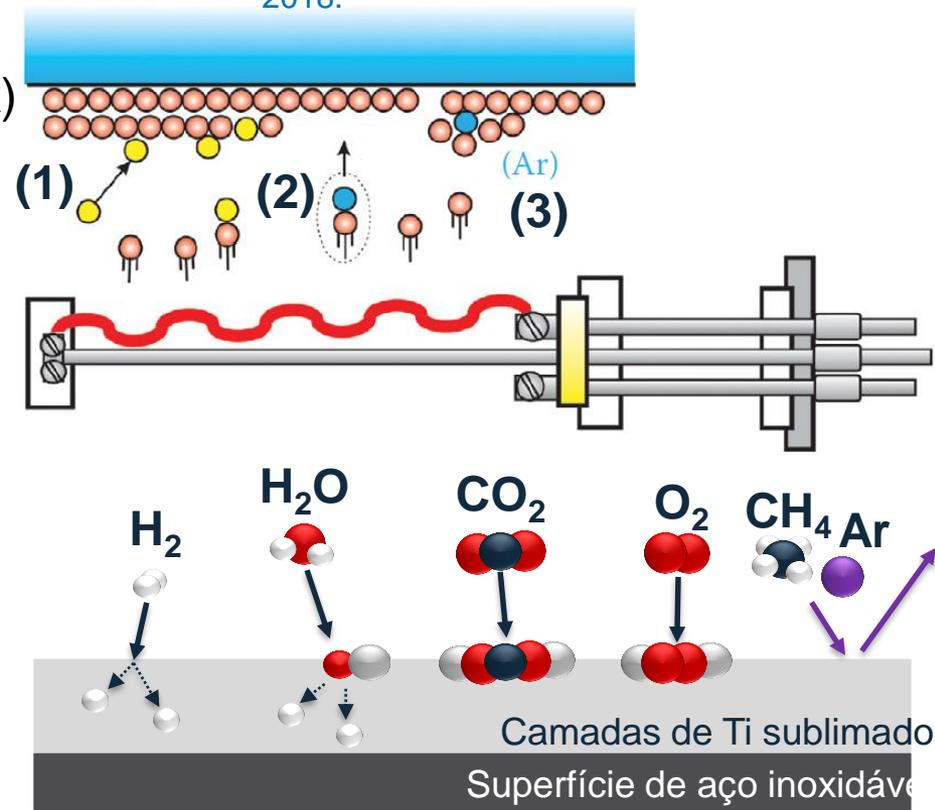
1) Quimissorção

(predominante):

Sendo Ti um metal muito reativo

- H_2 dissocia em H e difunde na camada de Ti
- H_2O dissocia em H e O, H difunde e O reage, formando TiO (e outros óxidos)
- CO reage formando diversos compostos de titânio
- O_2 e N_2 reagem formando diversos óxidos e nitretos
- Metano (CH_4) e gases nobres não dissociam ou reagem com a

Fonte: Igor Bello, "Vacuum and Ultrahigh Vacuum: Physics and Technology", CRC Press, pg. 615, 2018.



BOMBA DE SUBLIMAÇÃO DE TITÂNIO

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

- Filamento de Ti (ou liga de Ti(85%)-Mo) é aquecido por efeito Joule até $\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Ti sublima a temperaturas abaixo de sua temperatura de fusão ($1660\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ti condensa nas paredes (aço inox)

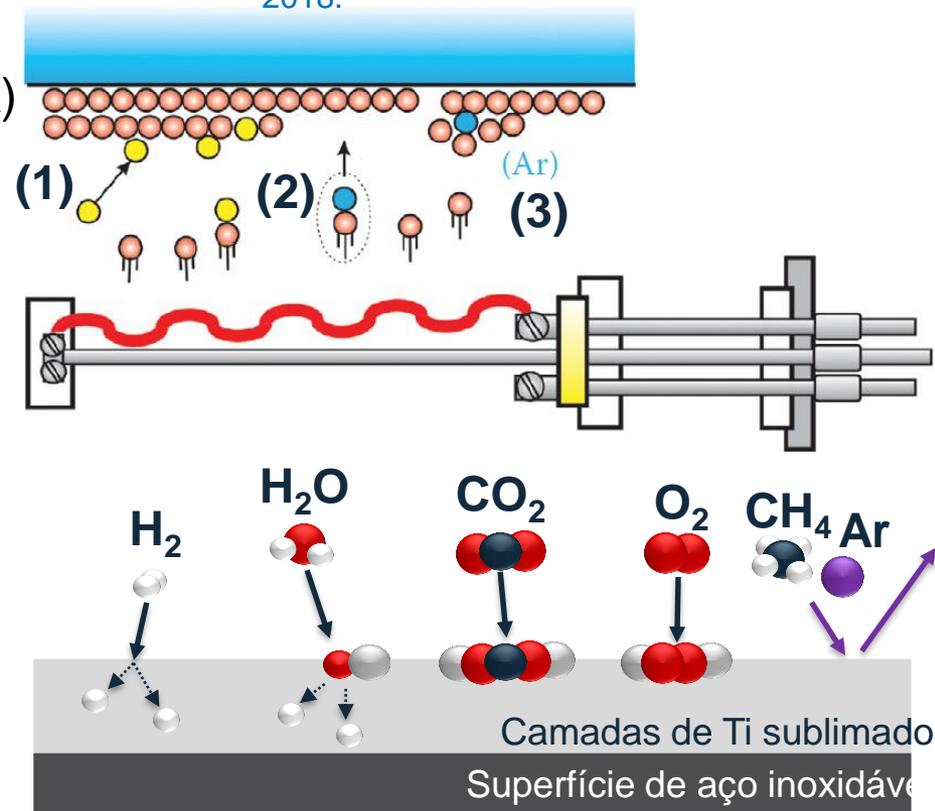
2) Transferência de momento:

- Uma vez que as moléculas evaporadas de Ti possuem momento substancial, empurram as moléculas para as paredes, onde podem ser capturadas pelo mecanismo (3).

3) Enterramento (*burial process*)

- O captura por recobrimento é o único mecanismo que funciona para gases inertes. Outras moléculas podem sofrer enterramento, mas o processo é desprezível em relação à quimissorção

Fonte: Igor Bello, "Vacuum and Ultrahigh Vacuum: Physics and Technology", CRC Press, pg. 615, 2018.



BOMBA IÔNICA – ÓRBITRON

- ❑ Bombas de captura (*getters* ou *vacuum chemical pumps*) são baseadas em materiais que capturam moléculas de gás principalmente por quimissorção (*chemisorption*)

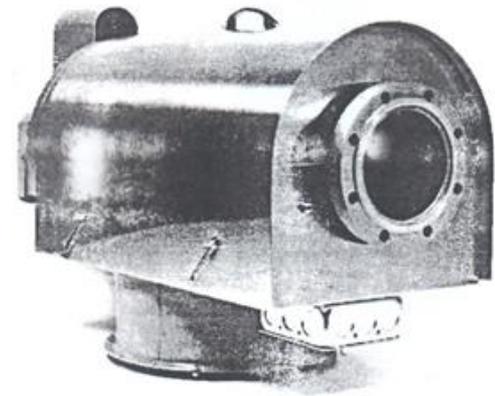
Bombas Órbitron

Funcionamento

- Combina captura elétrica por ionização (cátodo quente) e captura por quimissorção (usualmente Ti)

Características

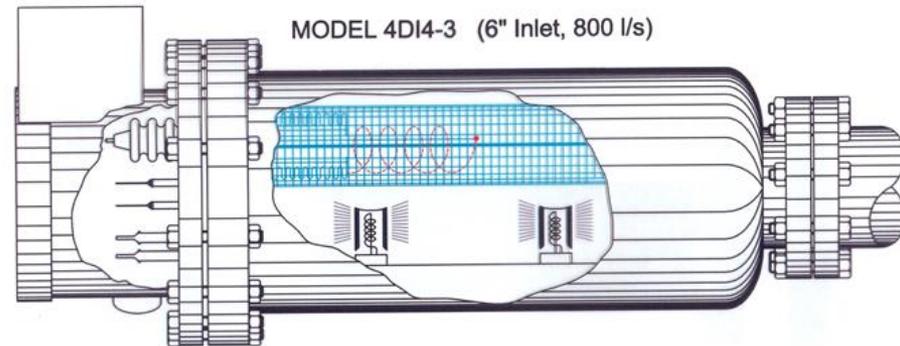
- Pouco superiores às TSP
- Potencial do ânodo: 5000 V
- Corrente de emissão: 25 mA
- Alimentação do filamento: +50 a +25
- Resfriamento: água ou ar comprimido



NEC GETTER-ION PUMP

MODEL 4DG4-3 (4" Inlet, 400 l/s)

MODEL 4DI4-3 (6" Inlet, 800 l/s)



Cortesia de Luiz Marcos

BOMBA IÔNICA – ÓRBITRON

❑ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Funcionamento

- Combina captura elétrica por ionização (cátodo quente) e captura por quimissorção (usualmente Ti)

Bombeamento por quimissorção (majoritário)

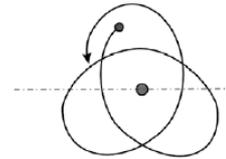
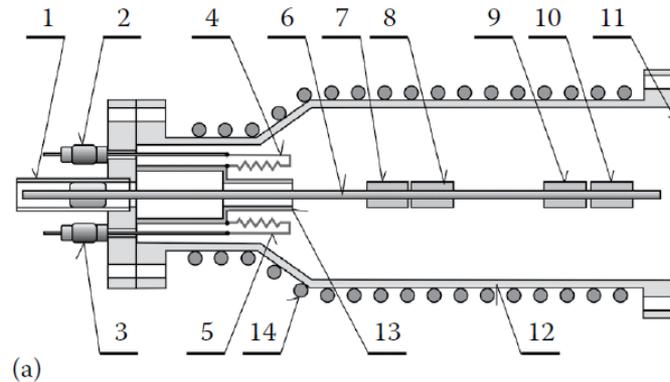
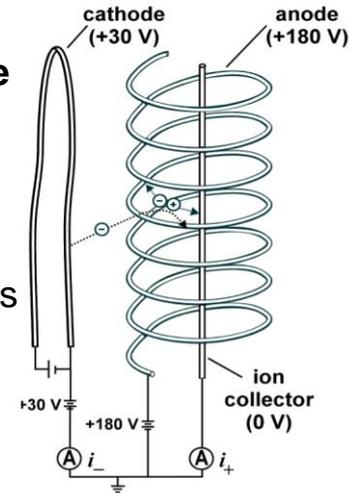
- 1) Quando a densidade de potência no ânodo (tensão aplicada \times densidade de corrente de e^-) é suficientemente alta, os e^- aquecem as barras de Ti, sublimando-as continuamente
- 2) O vapor de Ti condensa nas paredes resfriadas, formando um filme quimicamente ativo

Manômetro Cátodo Quente

Cátodo: produz e^- por efeito termiônico

Ânodo: grade que acelera e^-

Coletor: coleção de moléculas ionizadas pelos e^-



(a) Bomba órbitron com (b) órbita de elétron

4,5) Filamentos cátodo quente

6) Filamento de tungstênio (W)

7-10) Filamentos de Ti

12) Tubo de aço inox resfriado a água

13) Eletrodo refletor de e^-

Fonte: Igor Bello, "Vacuum and Ultravacuum: Physics and Technology", CRC Press, pg. 628, 2018.

BOMBA IÔNICA – ÓRBITRON

❑ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

Funcionamento

- Combina captura elétrica por ionização (cátodo quente) e captura por quimissorção (usualmente Ti)

Bombeamento Elétrico (minoritário)

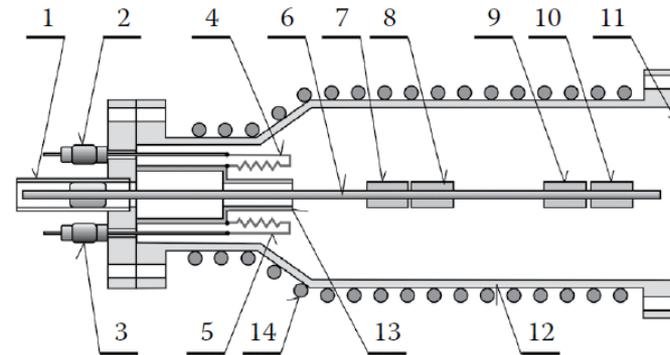
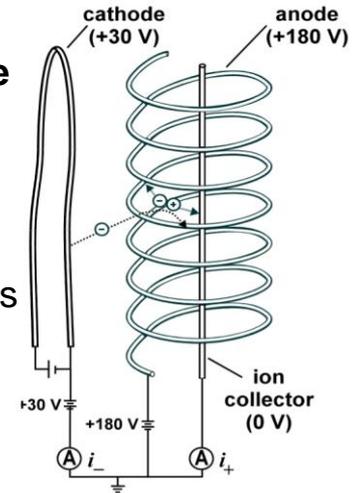
- 1) Cátodo quente (4) produz e^- por efeito termiônico
- 2) O tubo de aço inox (12) aterrado serve como coletor de íons, área de deposição de Ti e bombeamento
- 3) Alta tensão positiva aplicada no filamento de W com barras de Ti
- 4) Eletrodo refletor (13) em tensão negativa evita contato imediato entre e^- gerados no cátodo quente (4) e o filamento de W (6)
- 5) Os e^- orbitam o filamento central (ânodo), ionizando moléculas de gás em suas trajetórias até a terminação de Ti
- 6) Íons positivos são repelidos pelo potencial do filamento central e são implantadas e capturadas pelas paredes aterradas

Manômetro Cátodo Quente

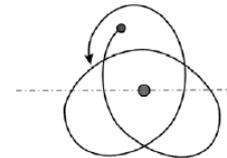
Cátodo: produz e^- por efeito termiônico

Ânodo: grade que acelera e^-

Coletor: coleção de moléculas ionizadas pelos e^-



(a)



(b)

(a) Bomba órbitron com (b) órbita de elétron

4,5) Filamentos cátodo quente

6) Filamento de tungstênio (W)

7-10) Filamentos de Ti

12) Tubo de aço inox resfriado a água

13) Eletrodo refletor de e^-

Fonte: Igor Bello, "Vacuum and Ultravacuum: Physics and Technology", CRC Press, pg. 628, 2018.

BOMBA IÔNICA – ÓRBITRON

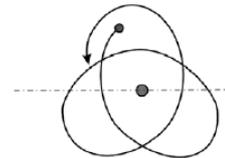
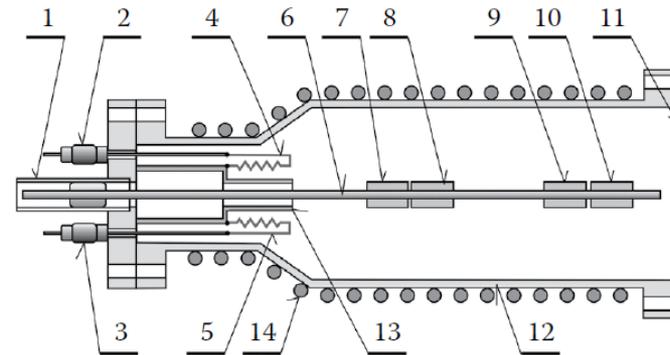
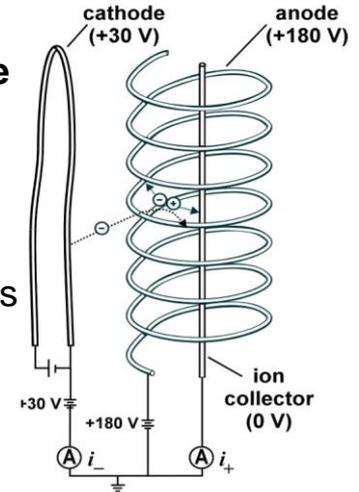
□ DURAÇÃO DOS FILAMENTOS DE TITÂNIO (SUBLIMÁVEIS)

10^{-3} Torr	dias
10^{-6} Torr	semanas
10^{-7} Torr	meses
10^{-8} Torr	anos

Manômetro Cátodo Quente

Cátodo: produz e^- por efeito termiônico

Ânodo: grade que acelera e^-
 Coletor: coleção de moléculas ionizadas pelos e^-



(a)

(b)

(a) Bomba órbitron com (b) órbita de elétron

4,5) Filamentos cátodo quente

6) Filamento de tungstênio (W)

7-10) Filamentos de Ti

12) Tubo de aço inox resfriado a água

13) Eletrodo refletor de e^-

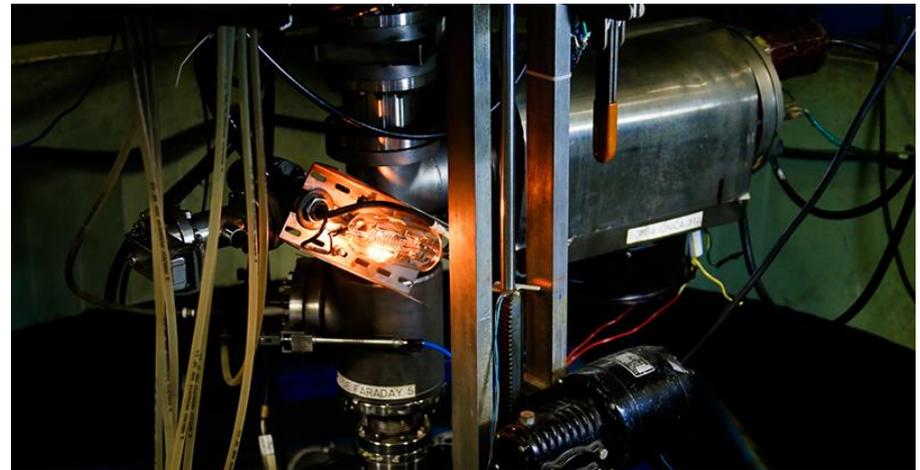
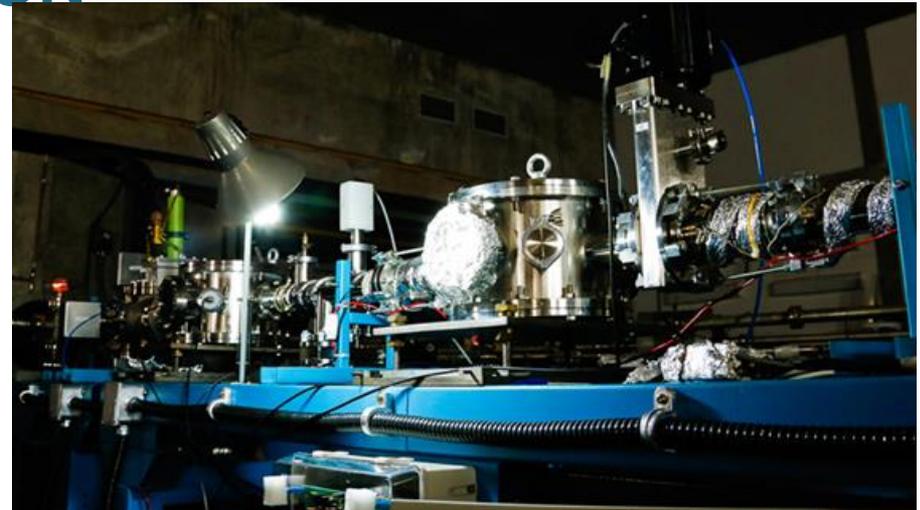
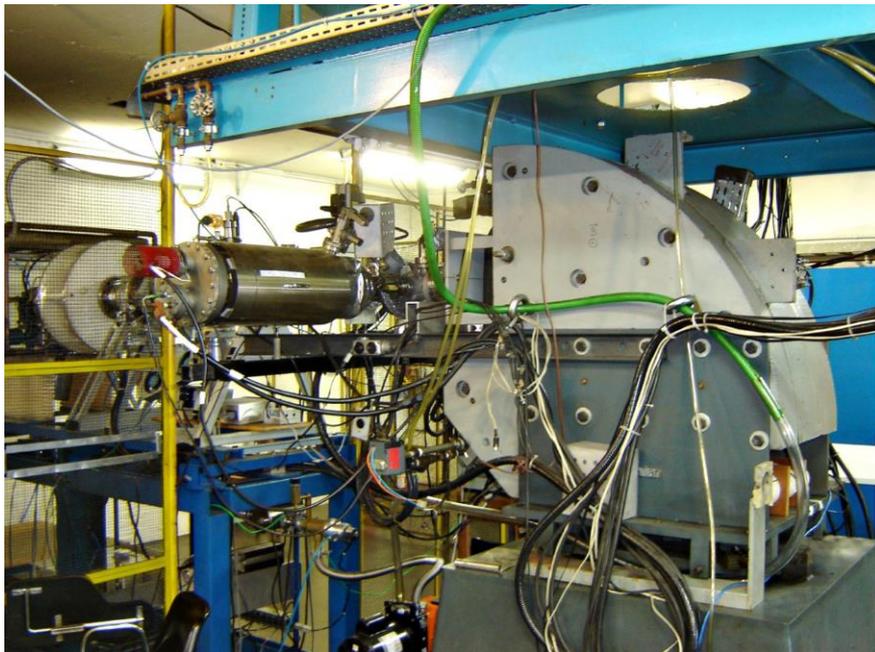
Fonte: Igor Bello, "Vacuum and Ultravacuum: Physics and Technology", CRC Press, pg. 628, 2018.

BOMBA IÔNICA – ÓRBITRON

❑ APLICAÇÕES

Acelerador Pelletron 8UD @ USP

Acelerador de íons pesados



BOMBA IÔNICA – ÓRBITRON

❑ PRÓS E CONTRAS

Vantagens

- Bomba de ultra-alto vácuo
- Limpa: operação livre de hidrocarbonetos
- Não necessita de bomba de *backing* durante a sua operação
- Pode ser instalada em todas as direções
- Livre de vibrações/ruído
- Alta velocidade de bombeamento para H₂

Desvantagens

- Baixa velocidade de bombeamento para gases inertes e metano
- Inicializa apenas em alto-vácuo
- Alta degradação dos filamentos em pré-vácuo
- Alta tensão
- Manutenção e substituição regular dos filamentos quentes e barras de Ti

BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

- ❑ Bombas de captura (*getters* ou *vacuum chemical pumps*) são baseadas em materiais que capturam moléculas de gás principalmente por quimissorção (*chemisorption*)

Bombas Iônica Magnética (*Magnetic Sputter Ion Pumps*)

Funcionamento

- Combina captura elétrica por ionização (cátodo frio) e captura por quimissorção (usualmente Ti) em camadas de Ti formadas por *sputtering*

Características

- Intervalo de operação
 10^{-5} a 10^{-12} Torr
- Velocidade de bombeamento
Típico: até 250 – 1000 l/s
Extremos: até 50.000 l/s
- Alta Tensão: 3 – 7 kV
- Campo magnético: 0.12 – 1.5 T



BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

□ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

1) Bombeamento elétrico

A grande distância percorrida dos e^- permitem gerar muitas ionizações ao longo de sua trajetória.

Os íons são acelerados para o cátodo, onde realizam *sputtering* na camada de Ti

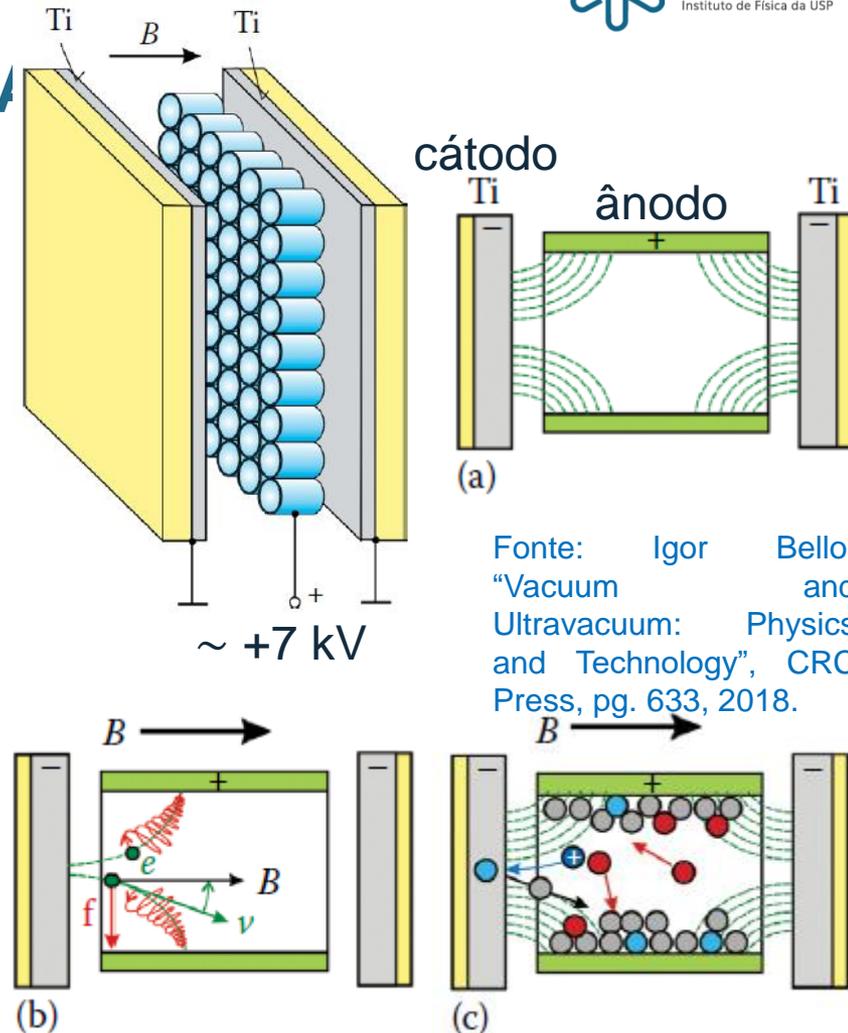
2) Transferência de momento + Enterramento (*burial process*)

Ao sofrer *sputtering*, o Ti espirrado arrasta as partículas de gás em direção à superfície do ânodo.

O Ti espirrado forma um filme de quimissorção no ânodo e, continuamente, enterra gases inertes

3) Quimissorção (predominante)

Semelhante ao mecanismo de STP, ocorre captura de moléculas reativas nas camadas de Ti



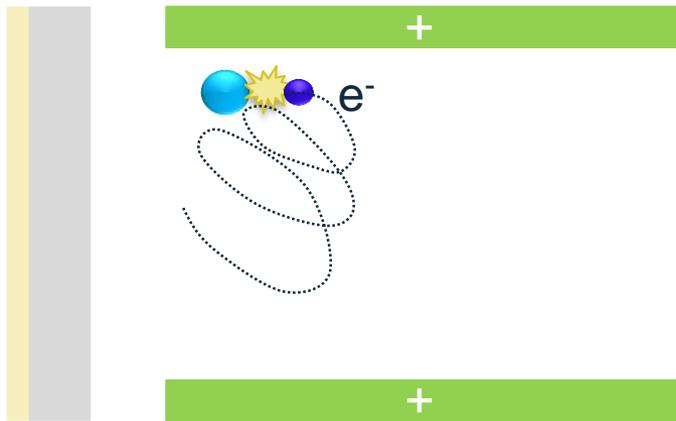
Fonte: Igor Bello, "Vacuum and Ultravacuum: Physics and Technology", CRC Press, pg. 633, 2018.

- (a) Linhas de campo elétrico
- (b) Trajetória de e^- devido ao campo magnético
- (c) Cátodos de Ti sofrem *sputtering* pelos íons, formando um filme de captura quimicamente ativo no ânodo

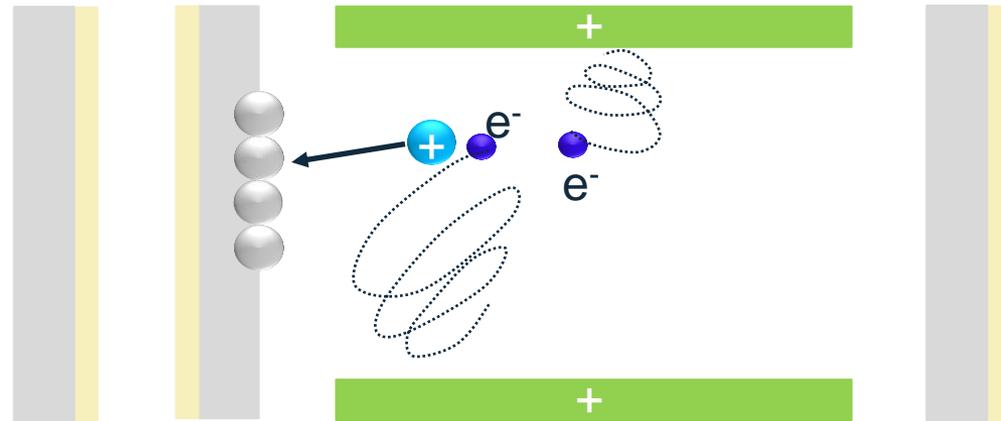
BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

☐ MECANISMO DE BOMBEAMENTO

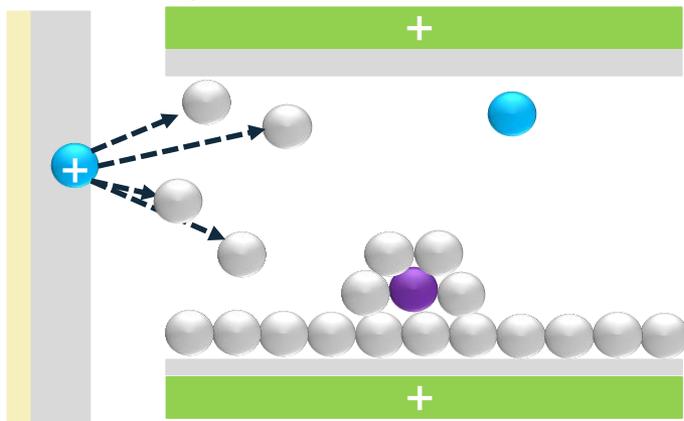
I) Ionização por impacto



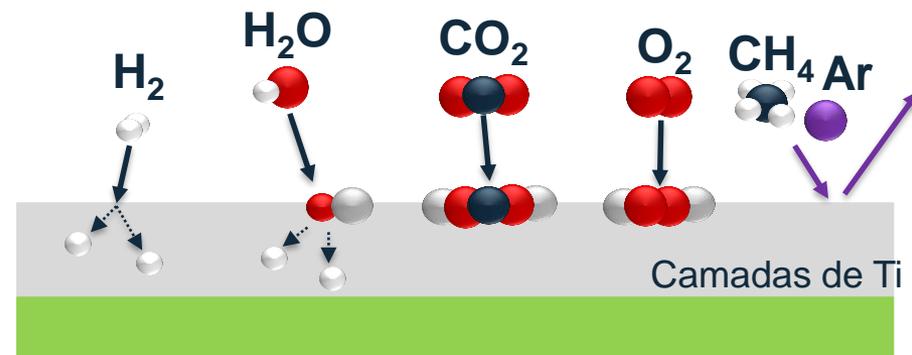
II) Íon de gás é acelerado ao cátodo de Ti



III) *Sputtering* de Ti forma camada reativa no ânodo



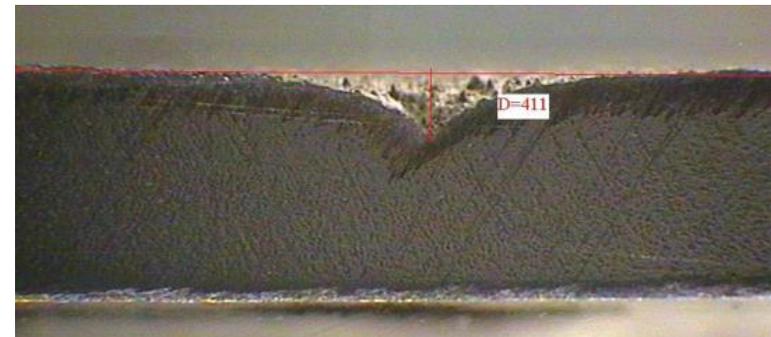
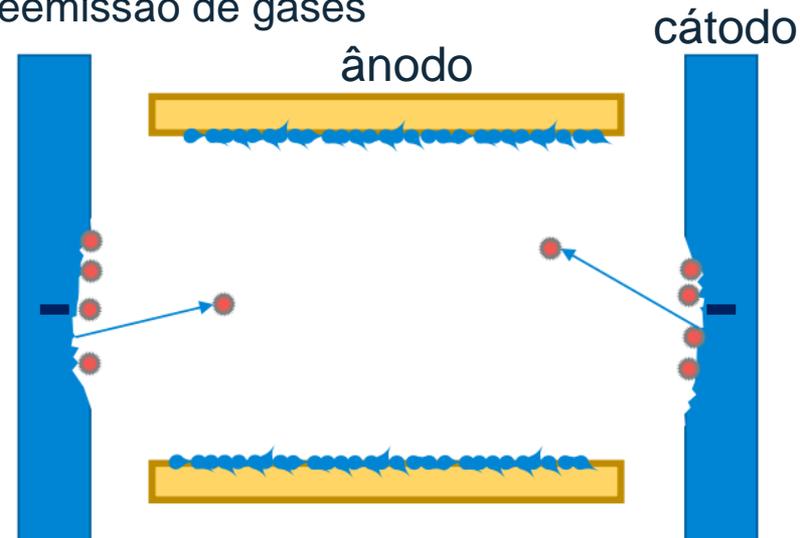
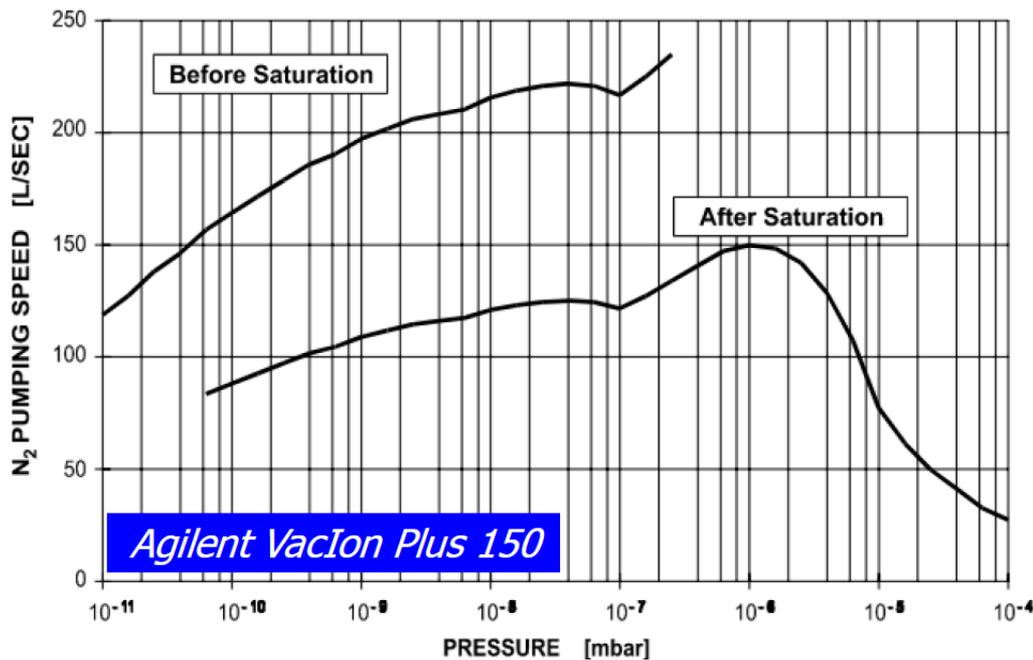
QUIMISSORÇÃO



BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

☐ SATURAÇÃO

- A contínua erosão no cátodo resulta no aumento da liberação de íons implantados
- Saturação: equilíbrio entre implantação de íons e reemissão de gases



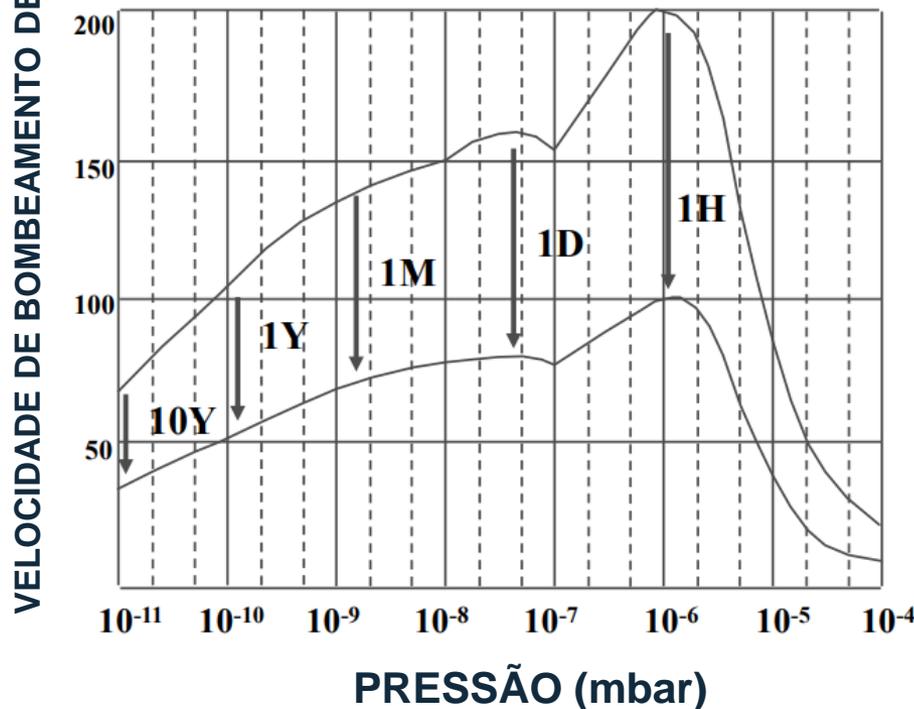
Saturação indica um modo de operação estável; não significa fim da bomba iônica!

BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

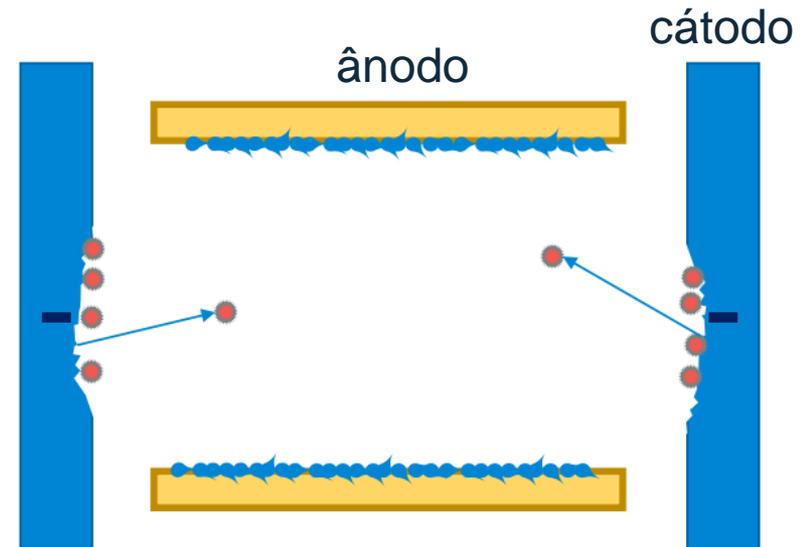
□ SATURAÇÃO

- Quanto maior a pressão, maior a taxa de erosão
- Na saturação, a velocidade de bombeamento é devida somente à ação de captura do material espirrado pelo cátodo:

- Quimissorção pelo filme produzido no ânodos
- Enterramento de gás nos ânodos



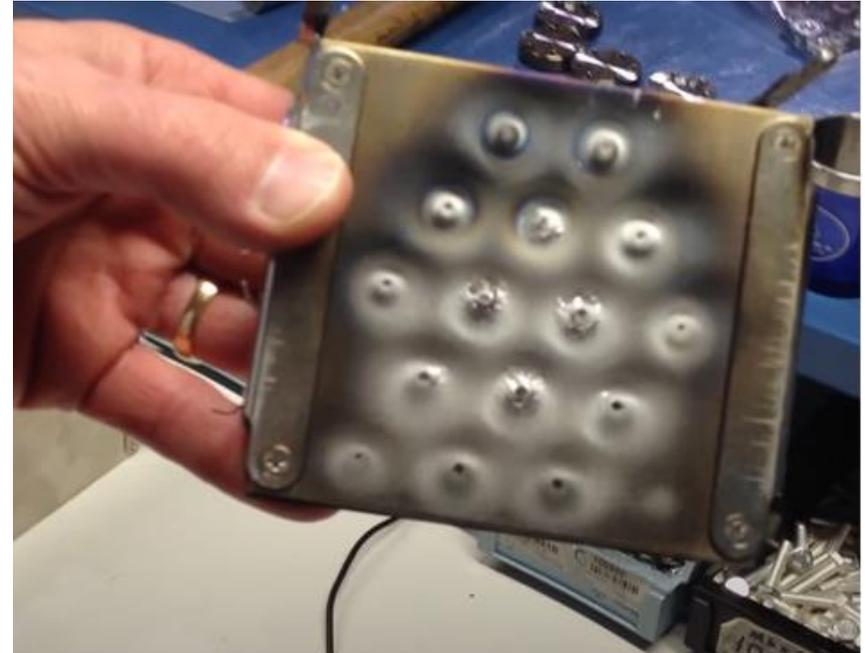
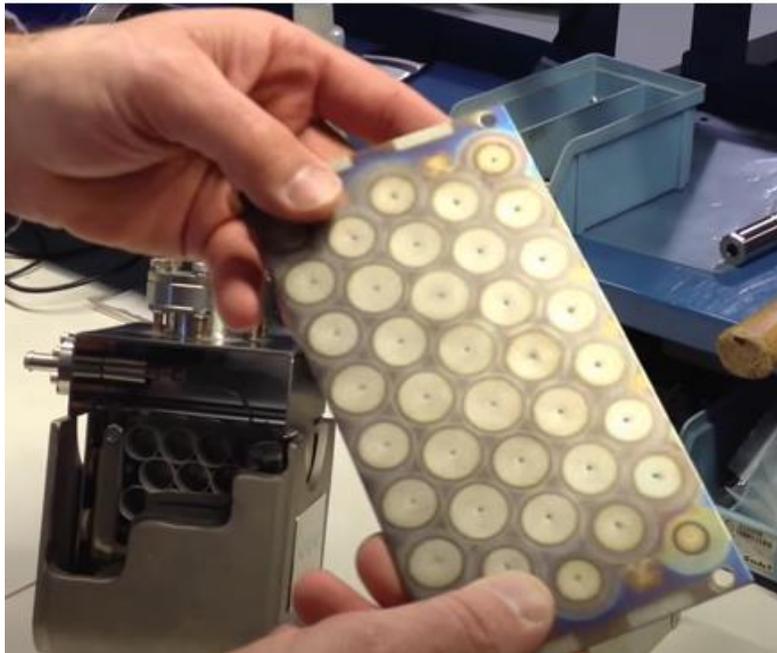
~50% da velocidade de bombeamento da bomba insaturada



BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

☐ MANUTENÇÃO

- Erosão do cátodo ao longo dos anos
- Limpeza do ânodo recoberto de Ti e compostos (TiO, TiO₂, TiN, TiN₂, etc.)



BOMBA IÔNICA – MAGNÉTICA

❑ PRÓS E CONTRAS

Vantagens

- Bomba de ultra-alto vácuo
- Limpa: operação livre de hidrocarbonetos
- Não necessita de bomba de *backing* durante a sua operação
- Livre de vibrações/ruído
- Durabilidade: podem operar sob condição de alto-vácuo por muitos anos
- Medida adicional de pressão em seu intervalo de operação

Desvantagens

- Baixa velocidade de bombeamento para gases inertes e metano
- Inicializa apenas em alto-vácuo (10^{-4} – 10^{-6} Torr)
- Pesadas
- Campo magnético: não podem ser instaladas perto de bombas turbomoleculares e dispositivos sensíveis



BOMBA DE CAPTURA NÃO-EVAPORÁVEL

- ❑ Bombas de captura (*getters* ou *vacuum chemical pumps*) são baseadas em materiais que capturam moléculas de gás principalmente por quimissorção (*chemisorption*)

Bombas de Captura Não-Evaporável (NEG - *Non-evaporable getter pumps*)

Funcionamento

- Captura por quimissorção através do uso de pós metais reativos (zircônio, vanádio, ferro) comprimidos em pastilhas

Características

- Intervalo de operação: 10^{-6} – 10^{-15} Torr
- Velocidade de bombeamento: ~ 2000 l/s (H_2)
- Temperatura de operação: ~ 150 – 400 °C
- Temperatura de recuperação (ativação): ~ 1000 °C (em vácuo)



BOMBA DE CAPTURA NÃO-EVAPORÁVEL

□ APLICAÇÕES

KATRIN Experiment @ Karlsruhe Institute of Technology (Alemanha)

Medida de massa de neutrinos (sensibilidade $0.2 \text{ eV}/c^2$)

Desafios:

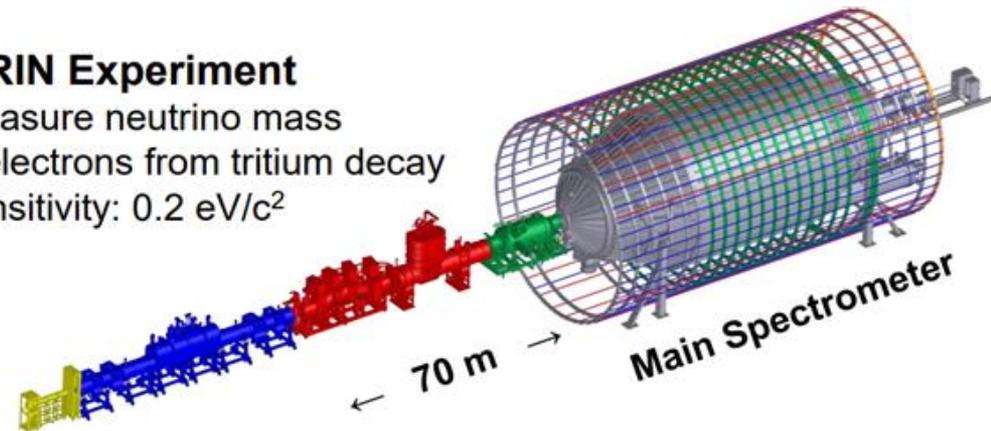
- Medida de massa de neutrinos requer baixíssimas taxas de fundo
- Radônio (Rn) é emanado no interior do espectrômetro
- Decaimento de Rn produz elétrons

Metas:

- Prevenir Rn no espectrômetro
- Remover Rn antes de seu decaimento

KATRIN Experiment

- measure neutrino mass
- β -electrons from tritium decay
- sensitivity: $0.2 \text{ eV}/c^2$

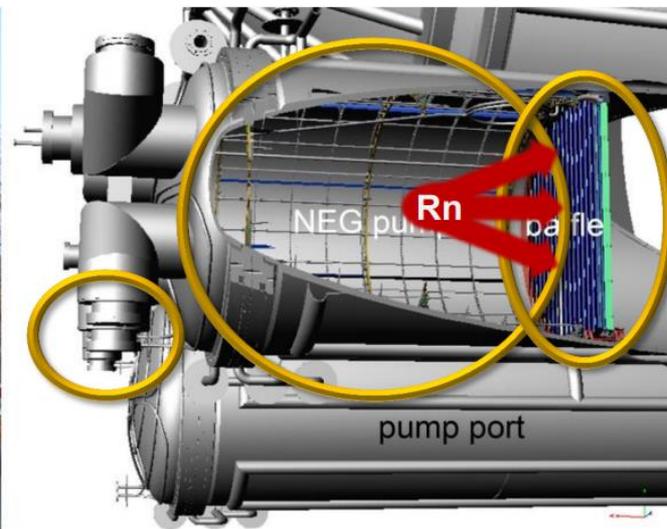
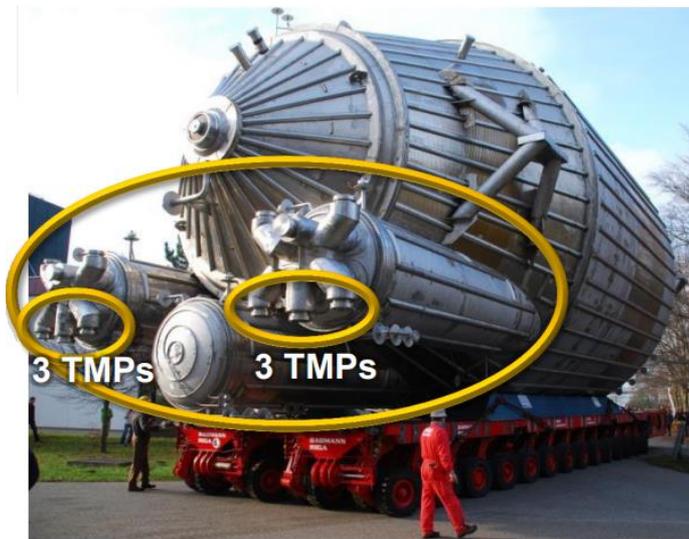


BOMBA DE CAPTURA NÃO-EVAPORÁVEL

□ APLICAÇÕES

KATRIN Experiment @ Karlsruhe Institute of Technology (Alemanha)

Medida de massa de neutrinos (sensibilidade $0.2 \text{ eV}/c^2$)



- stainless steel vessel (316LN): **23 m long, 10 m diameter**
- vacuum: **10^{-11} - 10^{-10} mbar**
- **6 turbo-molecular pumps** (Leybold MAG-W 2800): 10 000 ℓ/s (H_2)
- ~~3~~ **NEG-pumps** (~~3~~ 3000 m SAES St707 getter strips): ~~$\sim 10^6 \ell/s$~~ (H_2) **250 000 ℓ/s**
- **3 cryogenic LN_2 Cu-baffles** against radon: $\leq 180\,000 \ell/s$ (Rn)

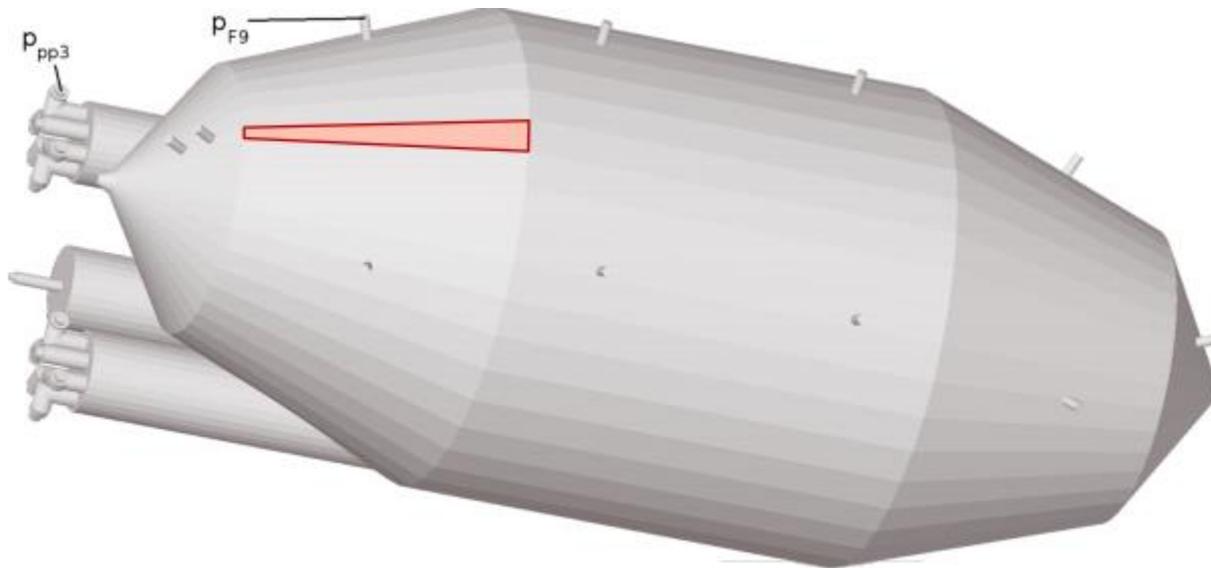
BOMBA DE CAPTURA NÃO-EVAPORÁVEL

□ APLICAÇÕES

KATRIN Experiment @ Karlsruhe Institute of Technology (Alemanha)

Medida de massa de neutrinos (sensibilidade $0.2 \text{ eV}/c^2$)

MOLFLOW+



Fonte: Joachim Wolf, “Reduction of radon background in the KATRIN Experiment”, Low Background Workshop at the SURF, Rapid City, 2017.

BOMBA DE CAPTURA NÃO-EVAPORÁVEL (NEG)

❑ PRÓS E CONTRAS

Vantagens

- Bomba de UHV / XHV
- Altíssima velocidade de bombeamento para H_2
- H_2 é quimissorvido reversivelmente
- Limpa: operação livre de hidrocarbonetos
 - Excelente combinação para XHV:
bomba de sublimação (H_2) + bomba iônica (gases nobres) + NEG (H_2)
- Compactas: úteis quando há limitação de espaço físico
- Não necessita de bomba de *backing* durante a sua operação
- Livre de vibrações/ruído

Desvantagens

- Preço elevado (se espaço físico é disponível, TSP é primeira opção)
- Regeneração (reativação) requer altas temperaturas
- Gases ativos (CO , CO_2 , O_2 , N_2 e outros compostos de O e C) são quimissorvidos irreversivelmente
- Não quimissorve gases nobres
- Início de operação ideal em alto-vácuo

OBRIGADO!