

# SEMINARIO DE SUPERCONDUCTIVIDAD Y SUPERFLUIDEZ

Introducción a la criogenia

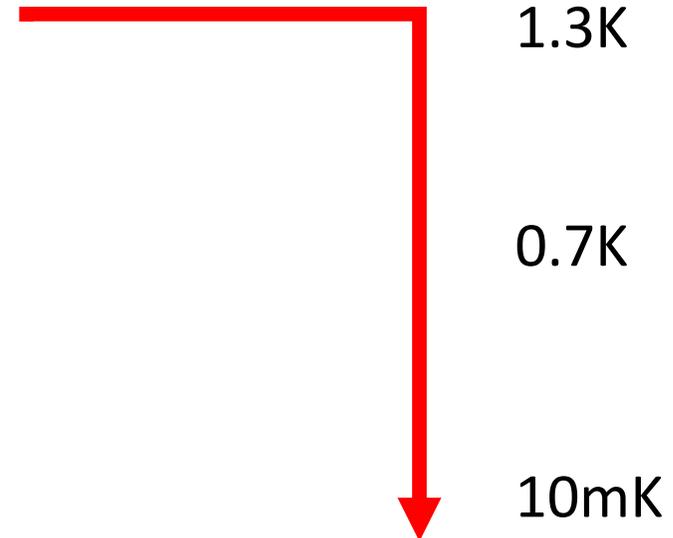
Carlos Uriarte González

# Índice

Criostatos de He4

Criostatos de He3

Refrigeradores de dilución



# Índice



Descripción formal  
del modelo  
matemático



Explicación  
cualitativa

# Criostatos de He4

# Criostatos de He4

---

- Son aparatos capaces de alcanzar temperaturas cercanas a 1K.
- La ciencia del vacío resulta de gran importancia.
- Trabajar a bajas temperaturas implica la necesidad de diseñar meticulosamente cada componente para evitar problemas posteriores.
- Puede resultar peligroso debido a las altas presiones originadas.

# Criostatos de He4

---

- Cualquier proceso de enfriamiento a  $T < 10\text{K}$  implica la necesidad de usar He.
- El He es la única sustancia que permanece en estado líquido a esas temperaturas.
- Dos isótopos estables: He4 y He3.
- El He es un material escaso y caro, siendo el He3 un limitante económico.
- Necesidad de ahorrar todo el He posible.

# Criostatos de He4

---

- La entalpia del He gaseoso es mucho mayor que la entalpía de evaporación del He.
- Es necesario aprovechar el gas para el enfriamiento, el gas ha de dejar el refrigerador a la temperatura lo más cercana posible a la temperatura exterior.
- Existe un aliado a la hora de ahorrar costes: el LN2.
- La entalpia de evaporación del LN2 es mucho mayor que la del He4, por lo que será necesario pre-enfriar el experimento utilizando LN2.
- Además, el LN2 es mucho más barato.

# Criostatos de He4

---

Líquido	Incremento de Temperatura [K]	Al	Cu
N <sub>2</sub>	300->77	1	0.46
<sup>4</sup> He	77->4.2	3.2	2.2
<sup>4</sup> He	300->4.2	66	42

# Criostatos de He4

---

- Una vez se alcanza la temperatura deseada, es necesario mantenerla.
- Para ello, será necesario contrarrestar los aportes de energía de las distintas fuentes externas con la potencia de los refrigerantes.
- En el rango de temperaturas de 1K, existen distintas fuentes que aportan calor: conducción, radiación...

# Criostatos de He4: Conducción

---

- La conducción del calor se puede dar a través de las paredes de los distintos sistemas o incluso en los propios cables eléctricos.
- Para minimizarla, es importante utilizar materiales con estructuras atómicas muy desordenadas y dimensionar correctamente cada una de las piezas.
- En la práctica: cristal, aleaciones Cu-Ni, aceros de baja capacidad térmica.

# Criostatos de He4: Radiación

---

- La potencia transmitida por radiación viene dada por la ley de S.B:

$$Q[W] = 5.67 \times 10^{-12} A(T_1^4 - T_2^4)$$

- En la práctica es fácil disminuir esta fuente utilizando superficies de metales pulidos, lo que reduce la emisividad.

Sólido	Emisividad
Au	0.01-0.03
Ag	0.01-0.03
Cu	0.02-0.6
Al	0.04-0.3

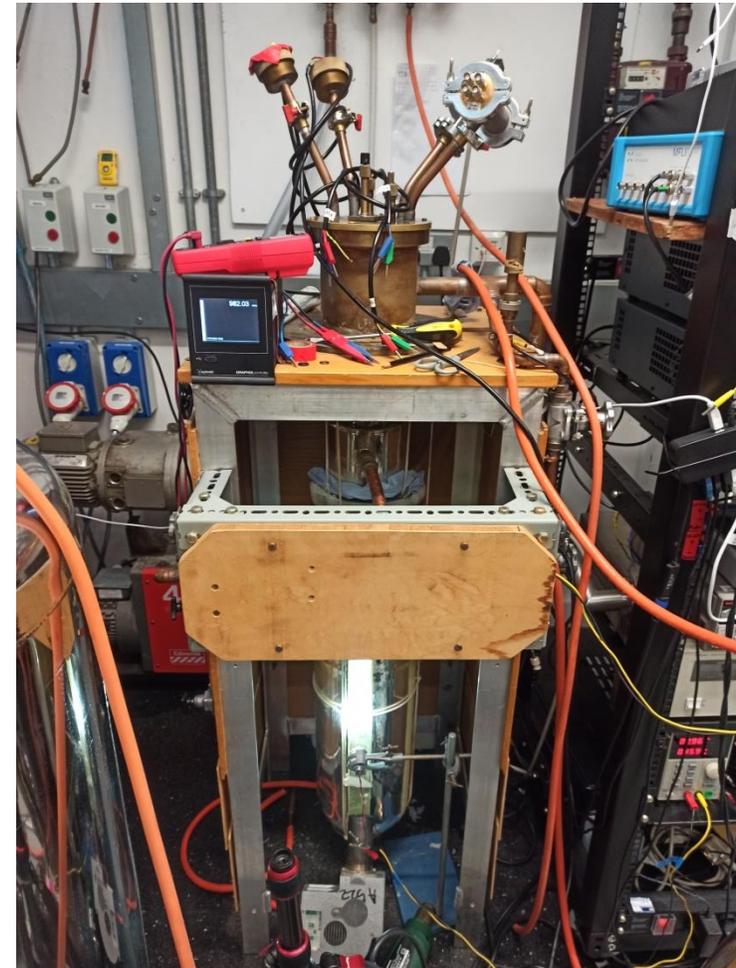
# Criostatos de He4: Radiación

---

- El espectro predominante en este rango de temperaturas es el infrarrojo.
- Debido a esto, resulta útil recubrir las superficies de Au o Ag para aumentar la reflectividad de las mismas.
- Además, se pueden introducir capas intermedias para disminuir la temperatura de las superficies radiantes. Comúnmente, se utiliza una cámara de LN2 antes de la cámara de LHe4.

# Criostatos de He4: Otras fuentes

- Las vibraciones del edificio pueden presentar fuentes de calor del orden de  $0.1-1\mu\text{W}$ . Esto puede llegar a ser un problema en experimentos a muy bajas temperaturas.
- Para minimizarlo, ha de montarse el criostato en un marco muy rígido, y realizar conexiones con tubos flexibles. Incluso, aislar el criostato



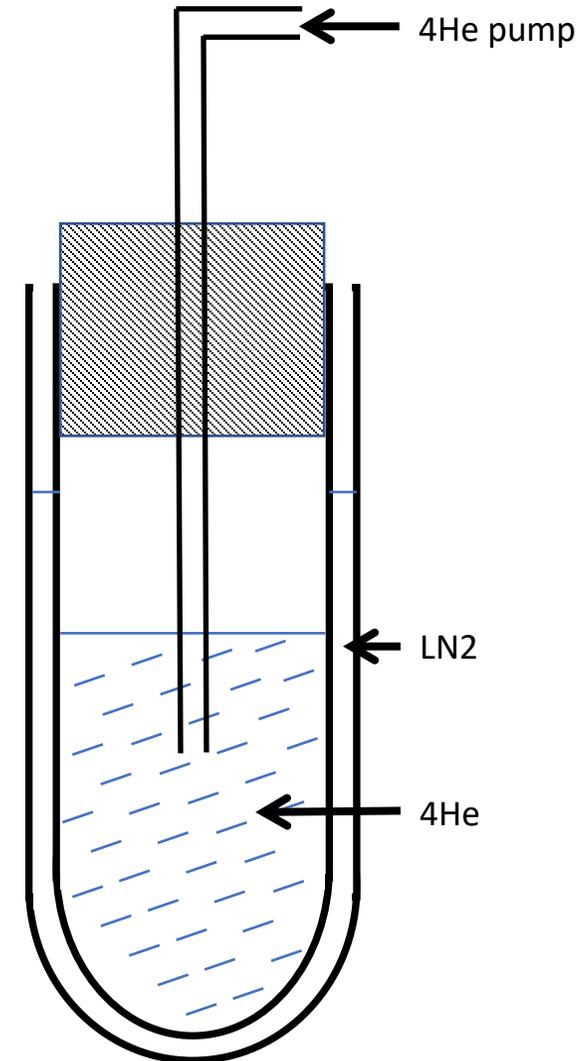
# Criostatos de He4: Otras fuentes

---

- El efecto Joule en las partes eléctricas también resulta una fuente importante de calor.
- Se debe realizar un balance entre buena conductividad eléctrica de los cables y buena conductividad térmica.
- El empleo de superconductores en las instalaciones eléctricas resulta una solución óptima para este problema.

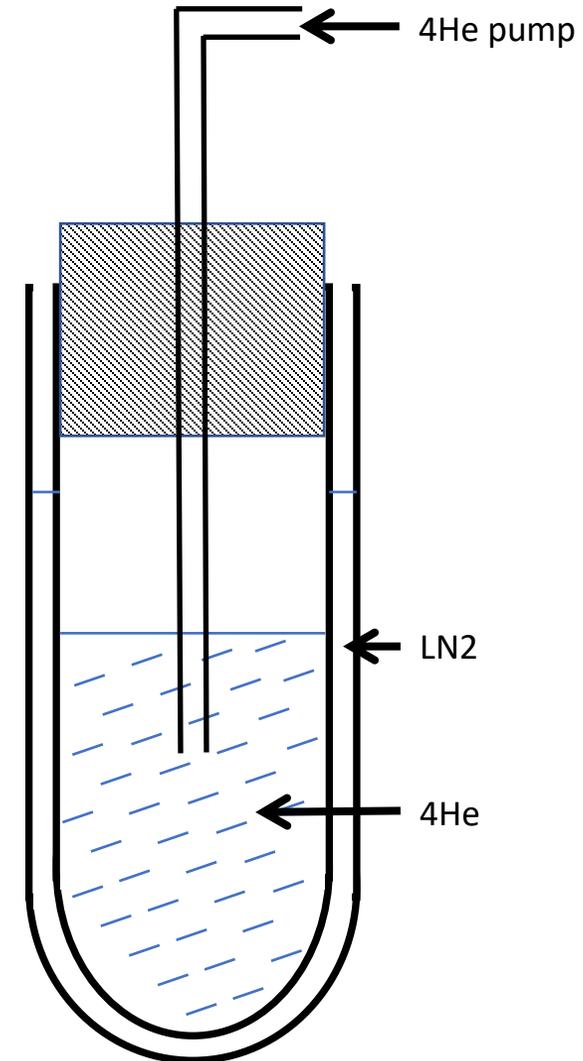
# Criostatos de He4: Funcionamiento

- Los criostatos generalmente se componen de dos cámaras cilíndricas para los criolíquidos, con varias cámaras de vacío intermedias.
- Las cámaras cilíndricas (o Dewar) se fabrican tradicionalmente en cristal.
- Esto permite la observación directa del experimento.



# Criostatos de He4: Funcionamiento

- Sin embargo, la fragilidad del cristal impone varios problemas de seguridad.
- Situaciones peligrosas pueden darse si se producen grietas en las cámaras de vacío.
- Para ello es necesario recubrir estos criostatos con una estructura de seguridad.



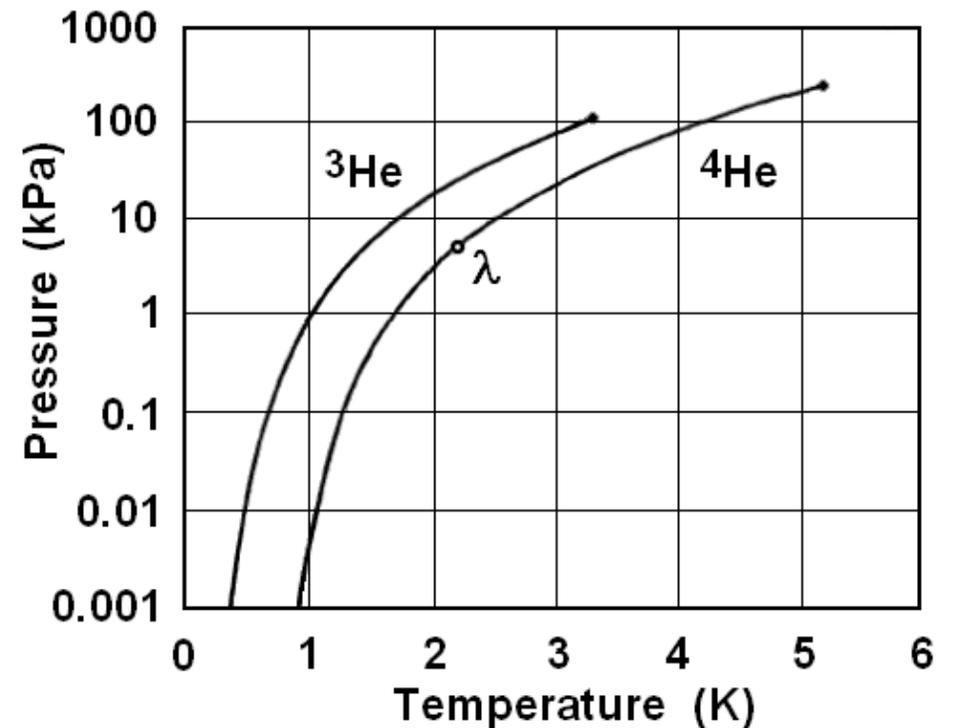
# Criostatos de He4: $4.2\text{K} > T > 1.2\text{K}$

---

- El rango superior de temperaturas de estos criostatos viene determinado por el punto de condensación del He.
- Por su parte, la temperatura mínima viene dada por la insuficiente presión de vapor.

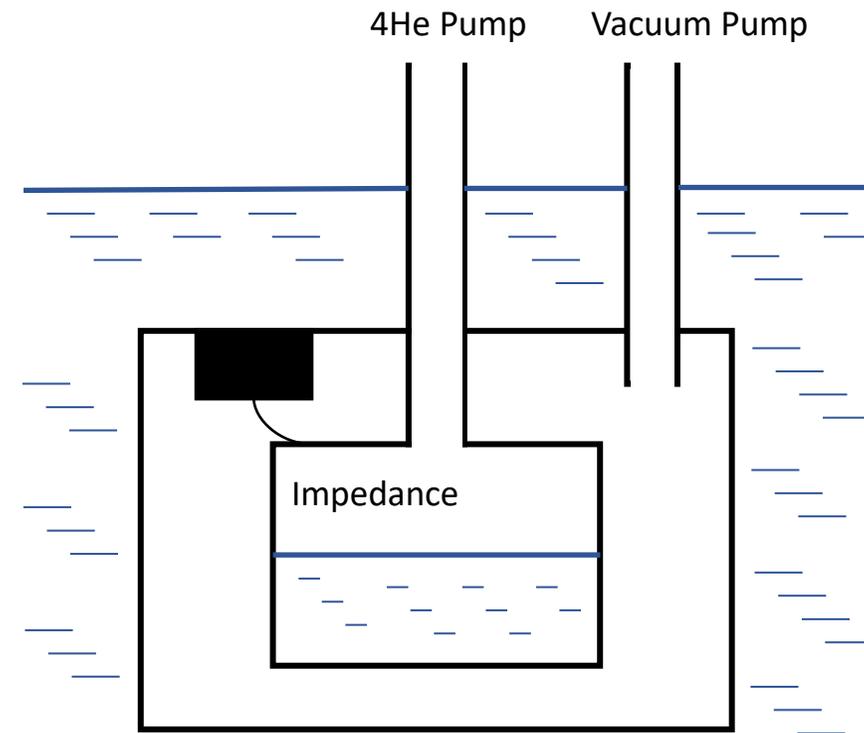
# Criostatos de He4: $4.2\text{K} > T > 1.2\text{K}$

- Una vez se tiene un baño estable de LHe4, el enfriamiento se obtiene disminuyendo la presión de vapor del He4.
- Resulta bastante ineficiente bombear el baño directamente puesto que alrededor del 40% del He ha de evaporarse para alcanzar 1.2K.



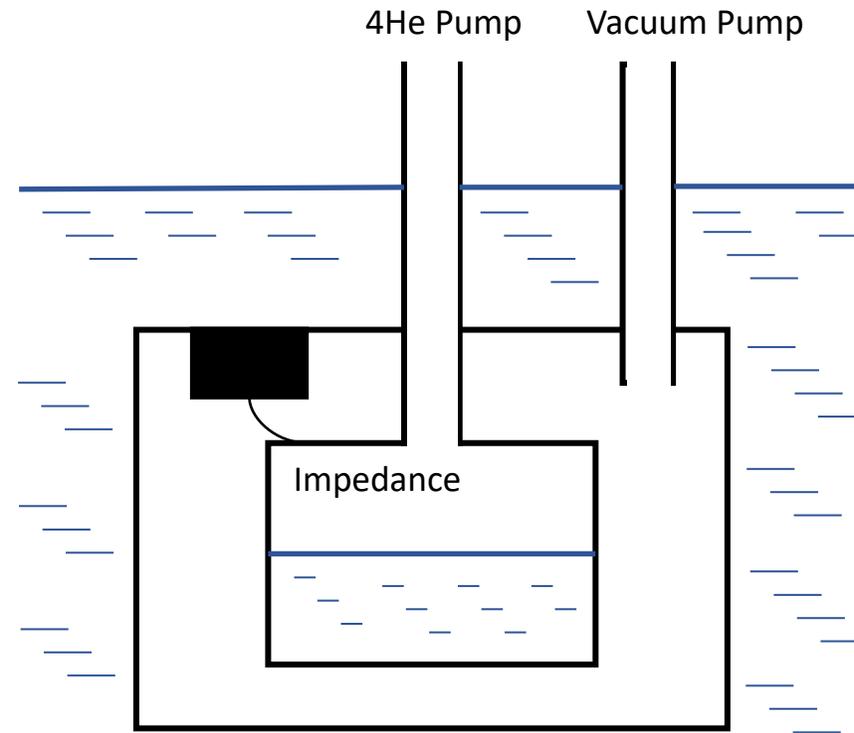
# Criostatos de He4: $4.2\text{K} > T > 1.2\text{K}$

- Para ello, una alternativa es utilizar un pequeño reservorio de He4 conectado al baño principal.
- El He4 del baño principal fluye a través de un pequeño capilar hacia un reservorio más pequeño.



# Criostatos de He4: $4.2\text{K} > T > 1.2\text{K}$

- El reservorio se va llenando a la vez que se bombea, hasta que la columna de líquido alcanza el equilibrio entálpico.
- Si se aumenta la carga térmica, la columna de He4 disminuye, lo cual reduce el calor transferido al tubo y mantiene la  $T = \text{cte}$ .



$$\dot{Q}_{He} = \dot{Q}_{tube} + \dot{Q}_{ext}$$

# Criostatos de He4: Equipo auxiliar

- B: Válvula de sobrepresión.
- D: Manómetro.



- Conexión al tubo de transferencia.
- Válvula de seguridad.
- Conexión a la fase vapor

# Criostatos de He4: Equipo auxiliar

---



# Criostatos de He3

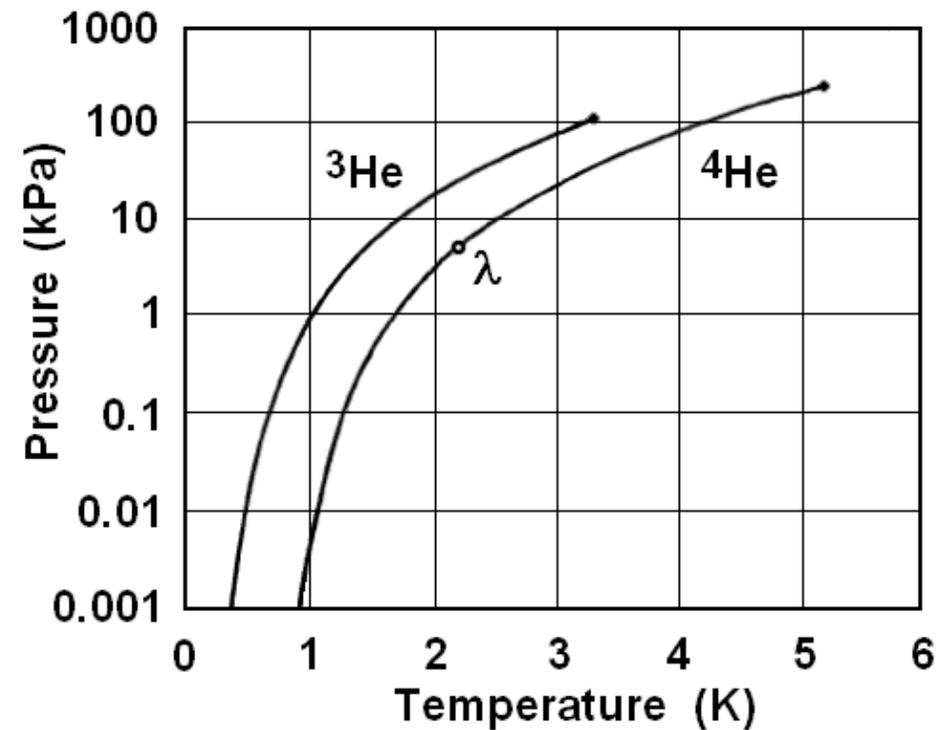
# Criostatos de He3

---

- La temperatura mínima para un criostato de He4 ronda los 1.2K.
- A partir de ese valor la presión de vacío es demasiado pequeña como para enfriar.
- Resulta necesario recurrir a un nuevo componente, el He3.

# Criostatos de He3

- A 1 K, la relación P3/P4 es 74.
- Sin embargo, a 0.5K dicha relación llega a ser  $10^4$ .



# Criostatos de He3

---

- Sin embargo, existen varios problemas.
- Por un lado, el calor latente del He3 es mucho más pequeño que el del He4.
- Además, el mayor problema es que el He3 es MUCHO más caro que el He4 (lo que implica no poder poseerlo en grandes cantidades).

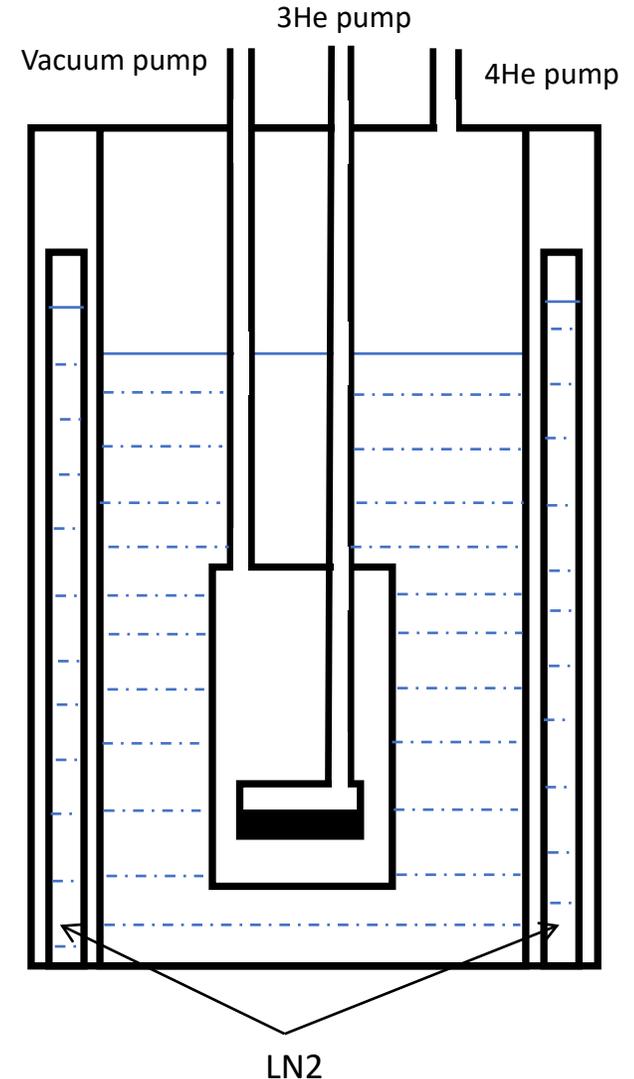
# Criostatos de He3

---

- Por tanto, para refrigerar con He3, resulta indispensable tener un circuito cerrado de gases, sin ninguna fuga.
- Además, la licuefacción del He3 ha de llevarse a cabo únicamente en el propio criostato, utilizando un criostato previo de He4.
- Esto permite utilizar el He4 como un escudo ante las fuentes de calor externas.

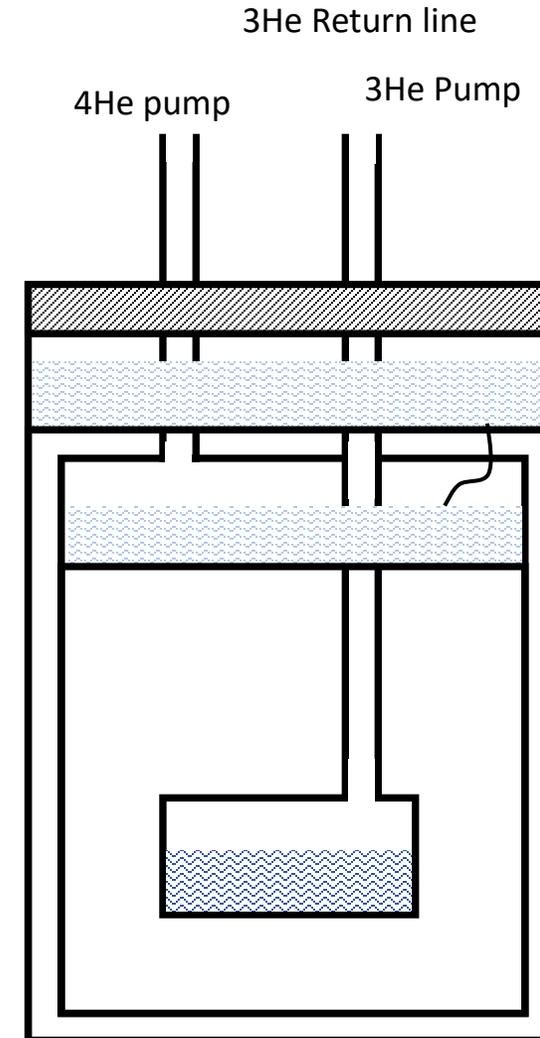
# Criostatos de He3: Funcionamiento

- El principio básico es análogo a los criostatos de He4.
- Primeramente, el He3 es condensado en los tubos, y el líquido precipita al contenedor, enfriándolo.
- Una vez todo el He3 ha condensado, se bombea la fase gaseosa reduciendo su temperatura.



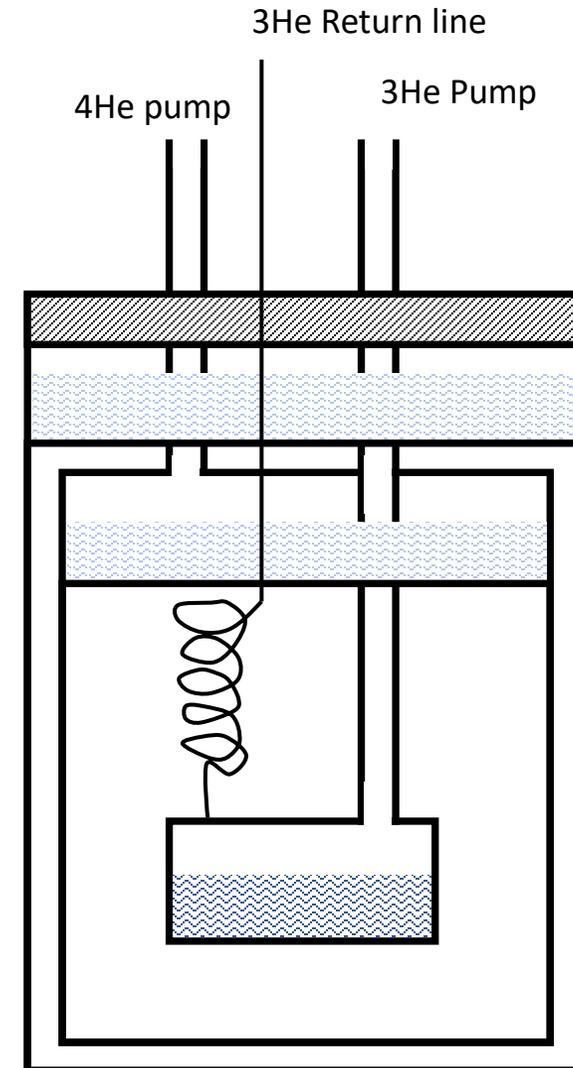
# Criostatos de He3: Funcionamiento

- Otros diseños utilizan un baño permanente de He4 a 4.2K.
- Parte del He4 se filtra a través de un capilar y es bombeado a 1.3K.
- El proceso es un ciclo cerrado discontinuo, puesto que el He3 se evapora de forma rápida.



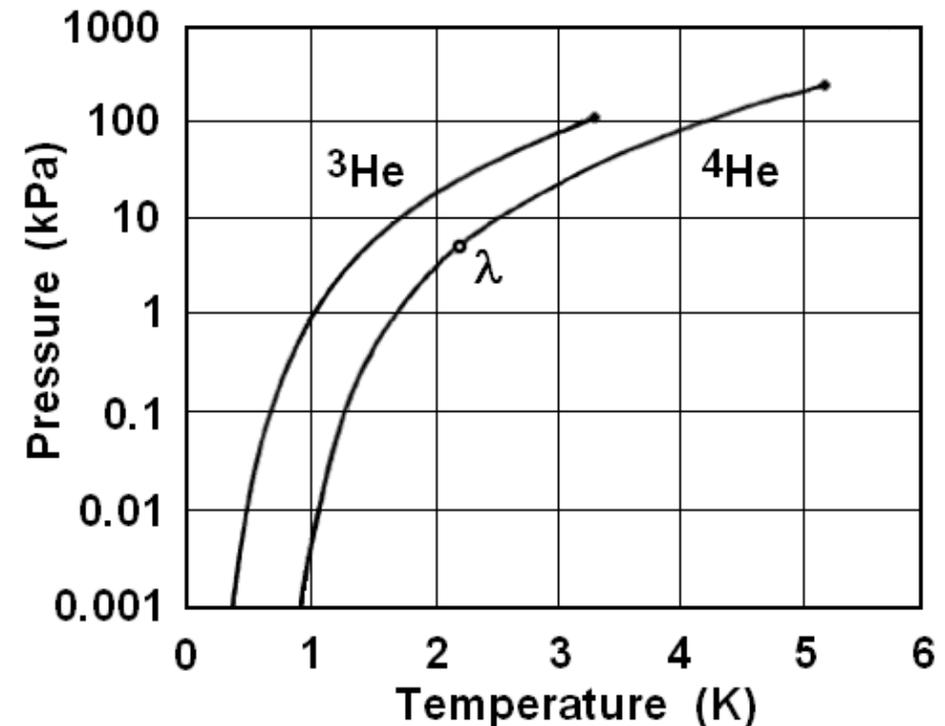
# Criostatos de He3: Funcionamiento

- Finalmente, los diseños más avanzados permiten utilizar estos criostatos en modo continuo.
- Para ello, el He3 evaporado es reintroducido a través de intercambiadores de calor.
- Ha de tenerse especial cuidado con las impurezas



# Criostatos de He3: Bombeo

- A 0.5-0.7K, la presión de vapor es muy baja.
- Es necesario un buen dimensionamiento de las bombas para garantizar la correcta difusión del He3.
- Se suelen utilizar combinaciones de bombas rotodinámicas y de difusión de aceite.



# Criostatos de He3: Bombeo

---

- Sin embargo, incluso si la bomba lo permite, la conductancia del tubo requiere un diámetro generalmente demasiado grande.
- Es posible reducir la sección de los tubos cerca del contenedor, pero no fuera.

# Criostatos de He3: Bombeo

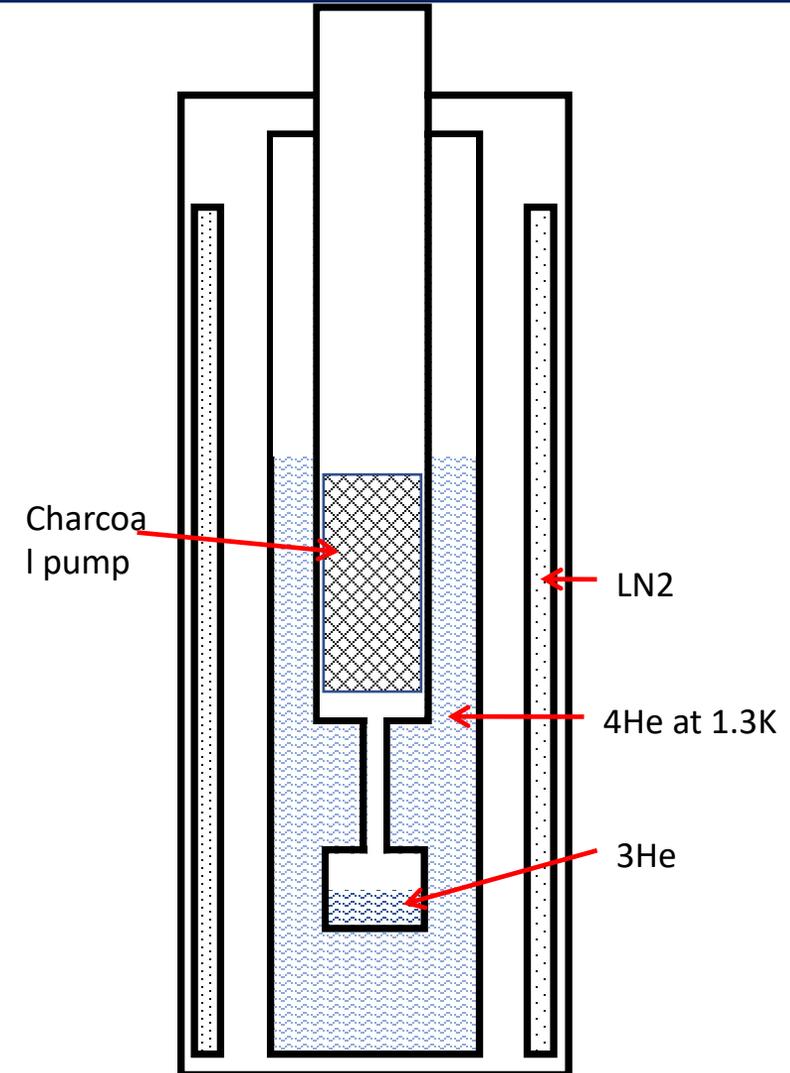
---

- Por este motivo, muchas veces resulta muy práctico el uso de otro tipo de bombeo: una bomba de absorción.
- Este tipo de bomba utilizan la propiedad de condensación de los gases sobre superficies frías.
- Se usan materiales de gran relación A/V para ello.



# Criostatos de He3: Criostato hermético

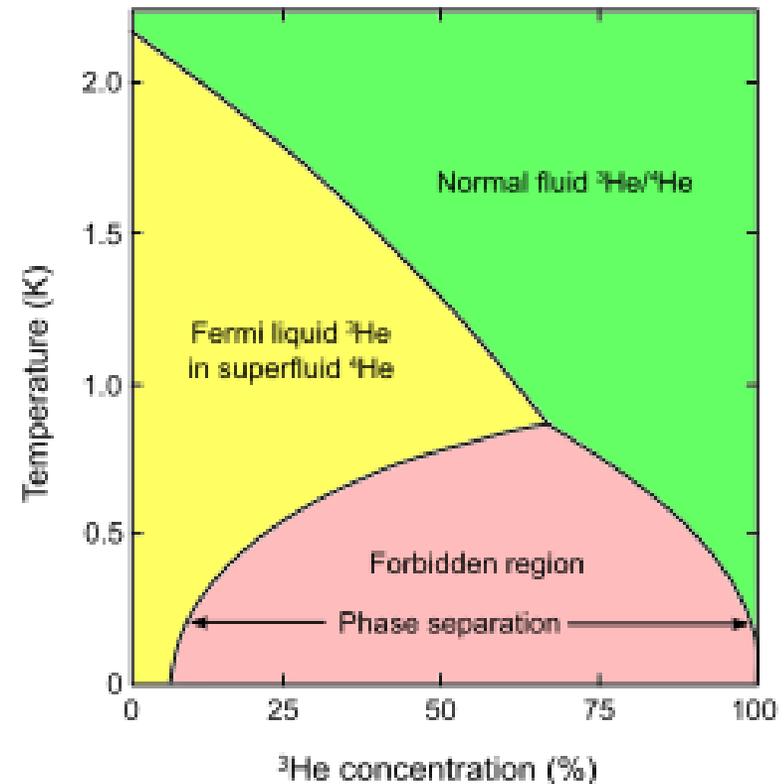
- Este tipo de materiales succiona el He3 hasta que todo el líquido se haya evaporado.
- Una vez se ha evaporado, únicamente es necesario subir el material a zonas de mayor temperatura para que condense de nuevo.
- Se suele utilizar el He4 como fuente térmica



# Refrigeradores de dilución

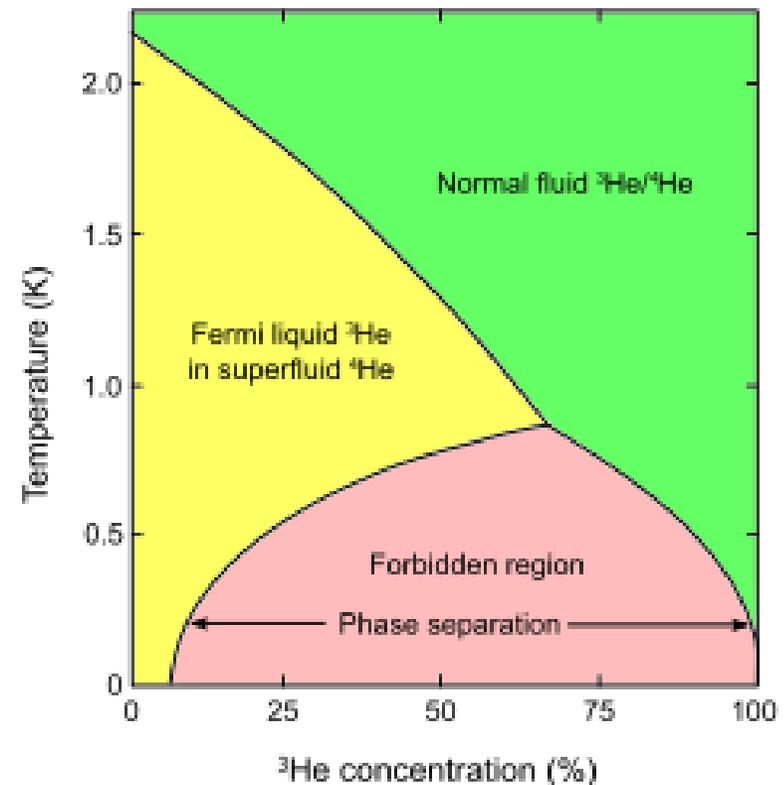
# Refrigeradores de dilución

- Es el método más usado para alcanzar temperaturas  $T < 0.3\text{K}$ .
- Pueden alcanzar hasta  $T = 2\text{mK}$  y son la base de partida para alcanzar las temperaturas más bajas de forma continua.
- Utilizan como medio refrigerante una mezcla de  $\text{He}4$  y  $\text{He}3$ .



# Refrigeradores de dilución: Diagrama

- En el rango de temperaturas considerado, el He4 presenta transición superfluida (variable).
- Existe una región prohibida en la cual las dos fases son inmiscibles.
- La solubilidad se mantiene incluso en  $T=0$  (6.67%).



# Refrigeradores de dilución

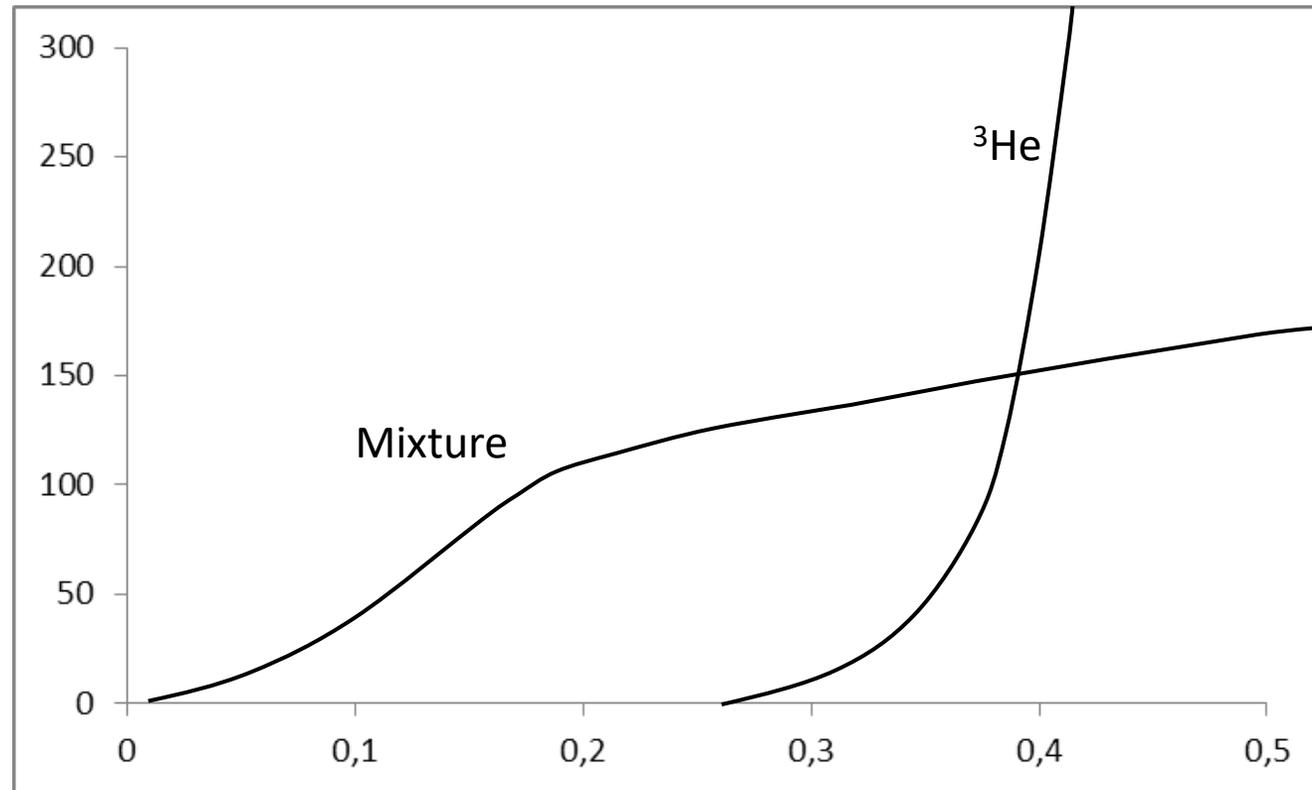
---

- El enfriamiento con estos métodos se obtiene por el calor transferido al mezclarse ambas fases.
- A diferencia de los métodos anteriores, la dependencia con la temperatura de este proceso es menos acusada.

$$\dot{Q} \propto P(T) \propto e^{-\frac{1}{T}}$$

$$\dot{Q} \propto x\Delta H \propto T^2$$

# Refrigeradores de dilución



# Refrigeradores de dilución: solubilidad

- Al llegar a la interfaz, los átomos de He3 se diluirán si la energía de enlace es menor en el He4.
- Debido a su menor masa, los átomos de He3 tienen mayor energía del punto cero, por tanto, ocupan mayor volumen.
- Debido a esto, un átomo de He3 estará más cerca de uno de He4 que del resto de He3.

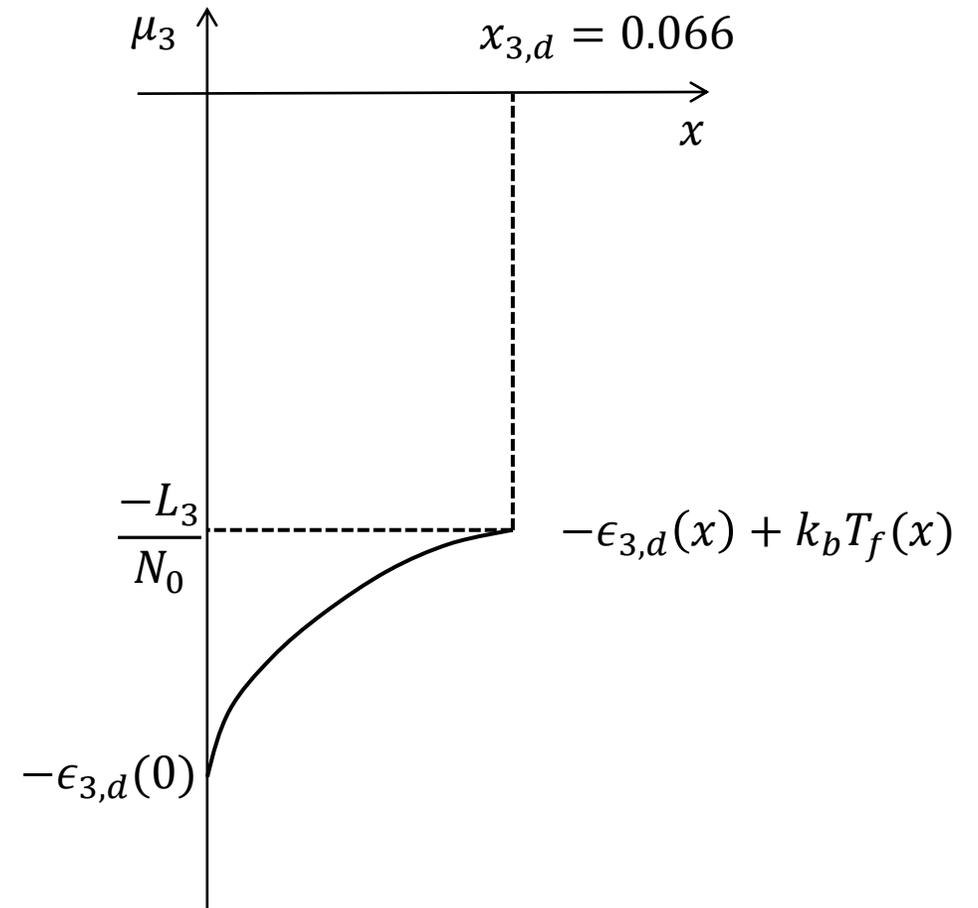
$$\mu_{3,c} = -L_3$$

$$\mu_{3,d}(0)/N_0 = -\epsilon_{3,d}(0)$$

$$\mu_{3,d}(0) < \mu_{3,c}(0)$$

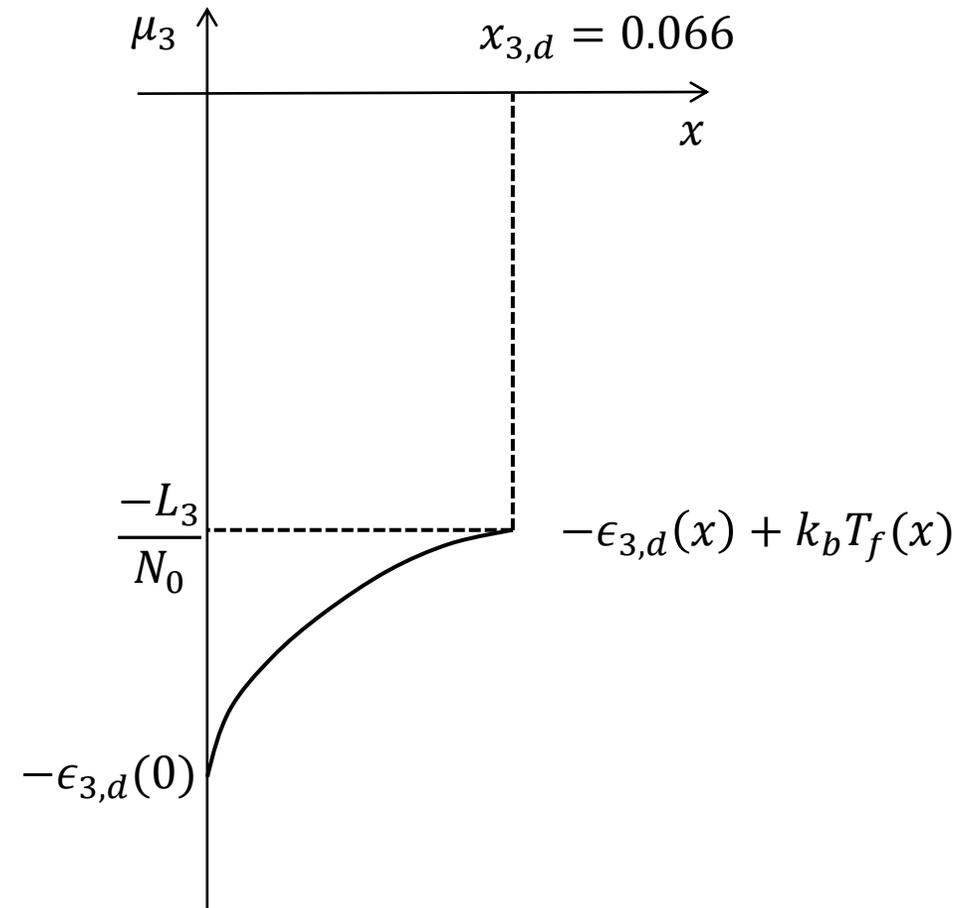
# Refrigeradores de dilución: solubilidad

- A medida que la concentración aumenta, los átomos de He3 se atraen mutuamente.
- Debido a su carácter fermiónico, la energía de enlace del He3 en la mezcla va disminuyendo.
- A una concentración de 6.67%, esta energía iguala a la de la fase pura He3



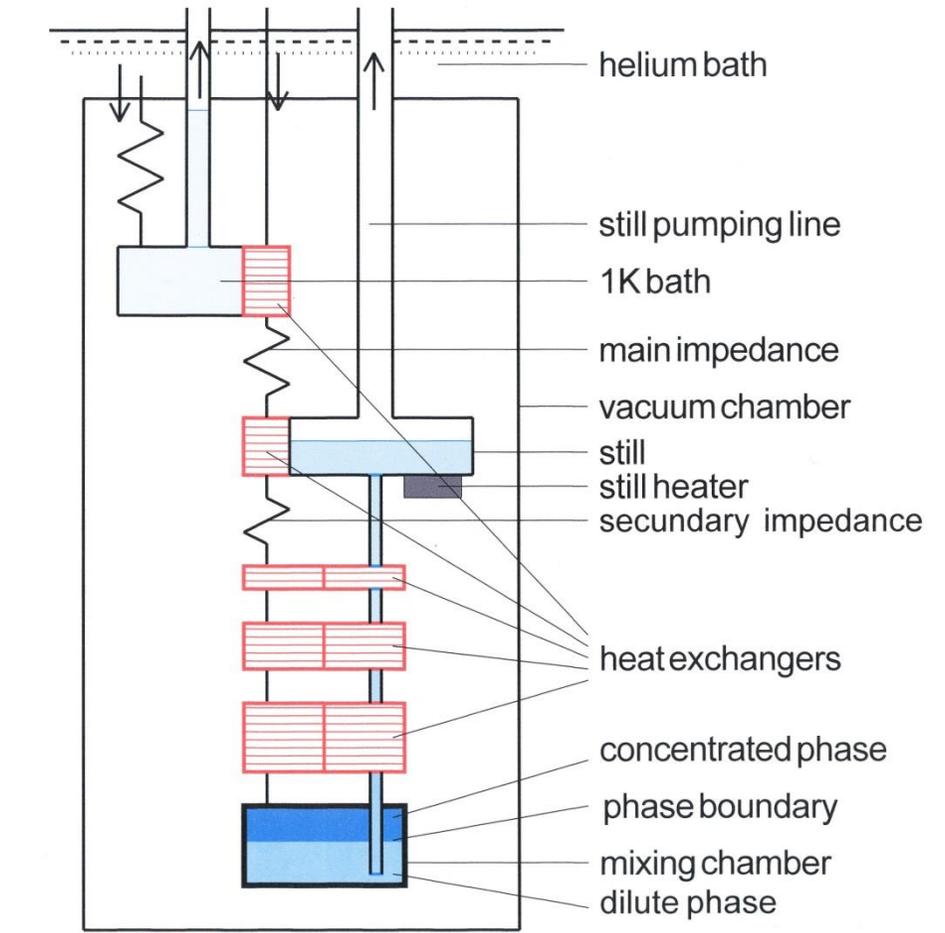
# Refrigeradores de dilución: presión osmótica

- En un refrigerador de dilución, se utiliza una mezcla de He3-He4 que estará presente en distintas concentraciones a lo largo del aparato.
- Esto genera a su vez una presión osmótica que será la encargada de mantener la potencia de refrigeración.

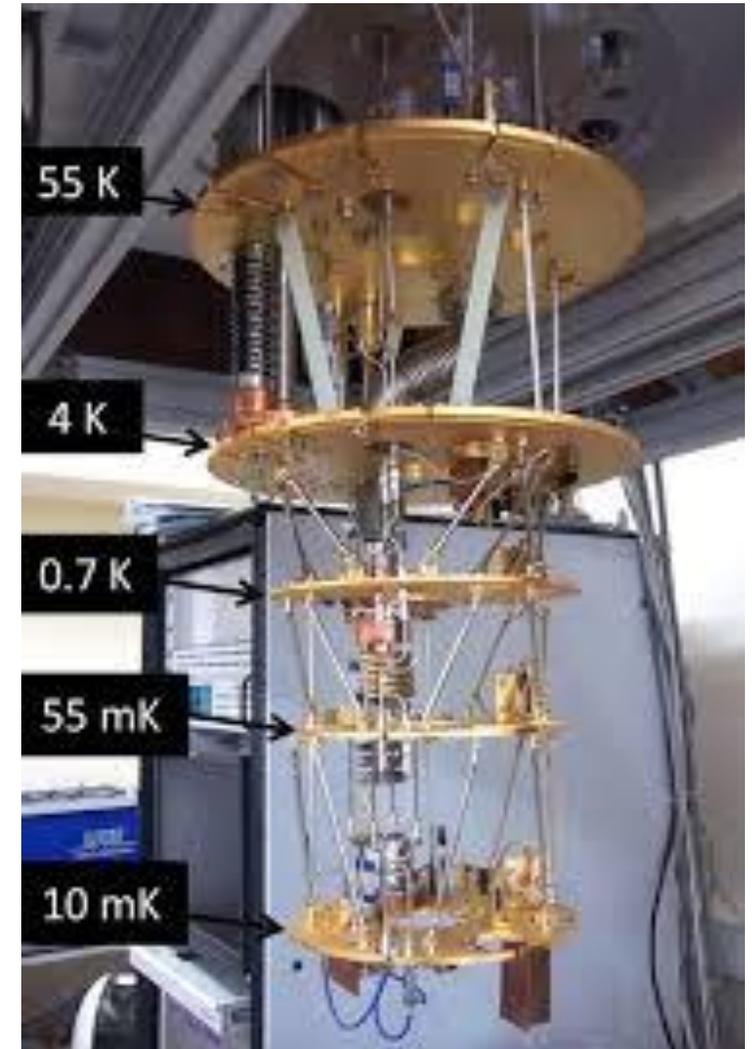
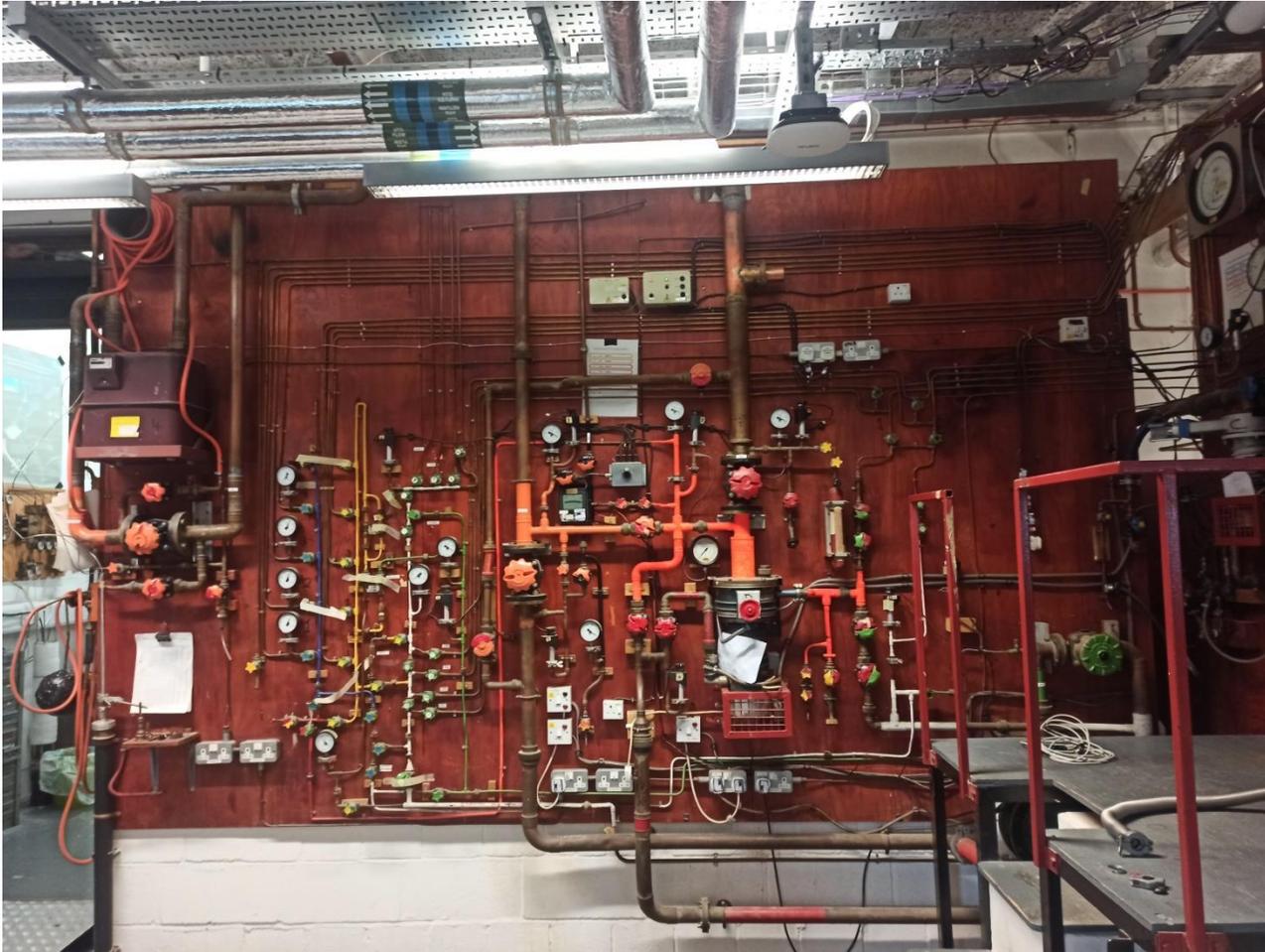


# Refrigeradores de dilución: funcionamiento

- El 'still' actúa como un destilador, consiguiendo extraer gas He3 prácticamente puro debido a la superior presión de vapor del He3 sobre el He4.
- El He3 frío que fluye hacia el still, se utiliza para enfriar aún más el He3 entrante en la cámara de mezclado.



# Refrigeradores de dilución: funcionamiento



- El máximo poder de enfriamiento se obtiene cuando se iguala la temperatura de la cámara con la del último cambiador de calor.

$$\dot{Q} = \dot{n}_3 (95T_{mc}^2 - 11T_{ex}^2)$$

- Por otra parte, existe una temperatura máxima a la cual puede estar este intercambiador de calor

$$T_{ex} \leq 3T_{mc}$$

# Refrigeradores de dilución: Intercambiadores

- Se utilizan entre el still y la cámara de mezcla para adecuar la temperatura a esta última.
- Suelen consistir en varios intercambiadores con distintos diseños.
- Se puede calcular el número de etapas a través del balance entálpico. Entre 3 y 5.

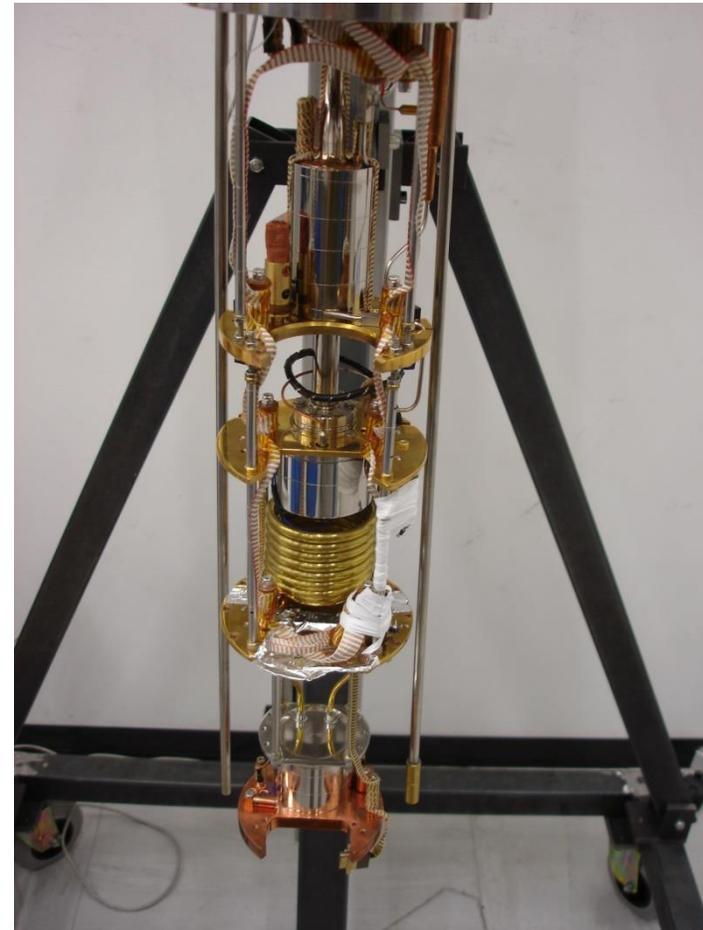
$$\dot{Q}_N + \dot{n}_3 [H_3(T_{n-1}) - H_3(T_N)] = \dot{n}_3 [H_{3,d}(T_n) - H_{3,d}(T_{N+1})]$$

- Deben ser pequeños para que el equilibrio se alcance rápidamente.
- Deben tener poca impedancia para no producir calentamiento viscoso.
- Deben tener baja resistencia térmica, lo que implica que posean una gran área.

$$R_K = \frac{a}{A} T^{-3}$$

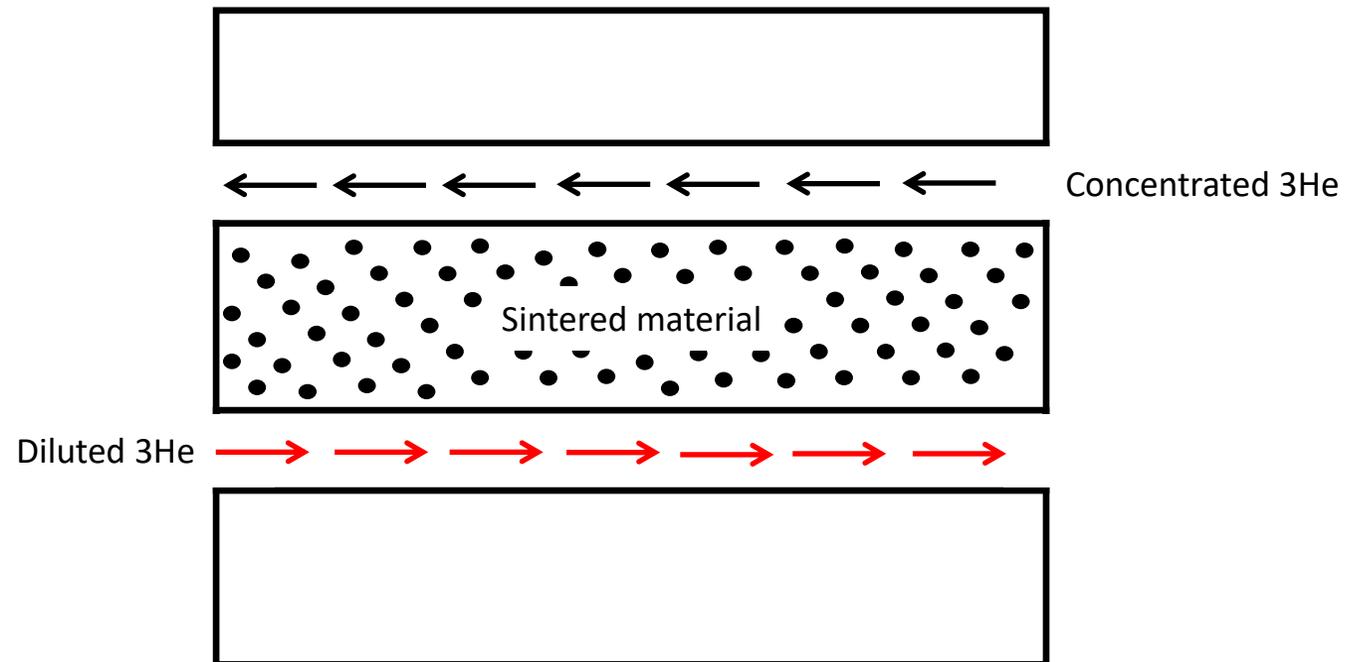
# Refrigeradores de dilución: Intercambiadores

- Un ejemplo rudimentario consiste en el uso de un intercambiador concéntrico continuo.

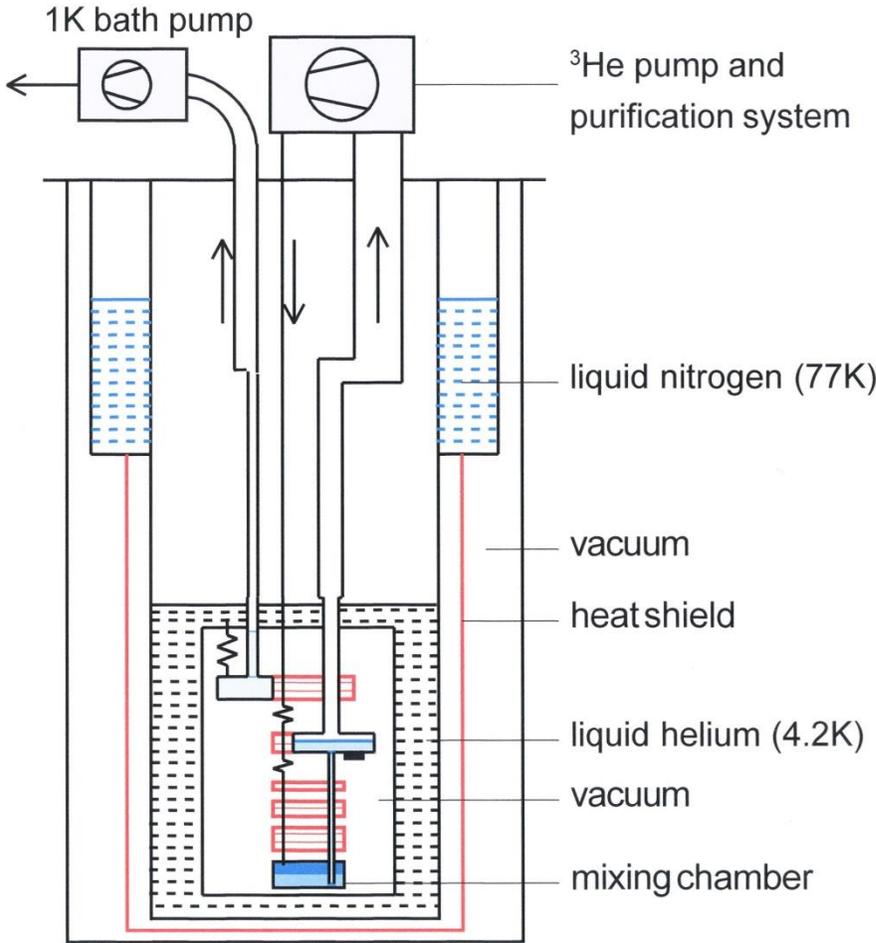


# Refrigeradores de dilución: Intercambiadores

- Diseños más sofisticados incluyen varias etapas de intercambiadores fabricados con polvo sinterizado.



# Refrigeradores de dilución: Ejemplos



# Pérdidas térmicas

---

- Debido a las bajísimas temperaturas alcanzadas, minimizar las pérdidas caloríficas resulta crucial.

# Pérdidas térmicas

---

- A 4K las pérdidas por radiación son de  $1\text{nW}/\text{cm}^2$ , muy superiores a las deseadas.
- Se debe apantallar por tanto, cualquier superficie en contacto con la zona de bajas temperaturas.

# Pérdidas térmicas

- En cualquier experimento existen cables que van desde la zona de bajas temperaturas a la zona de altas.
- Esto puede producir calentamiento por radiofrecuencia.
- Es necesario aislar la cámara eléctricamente.



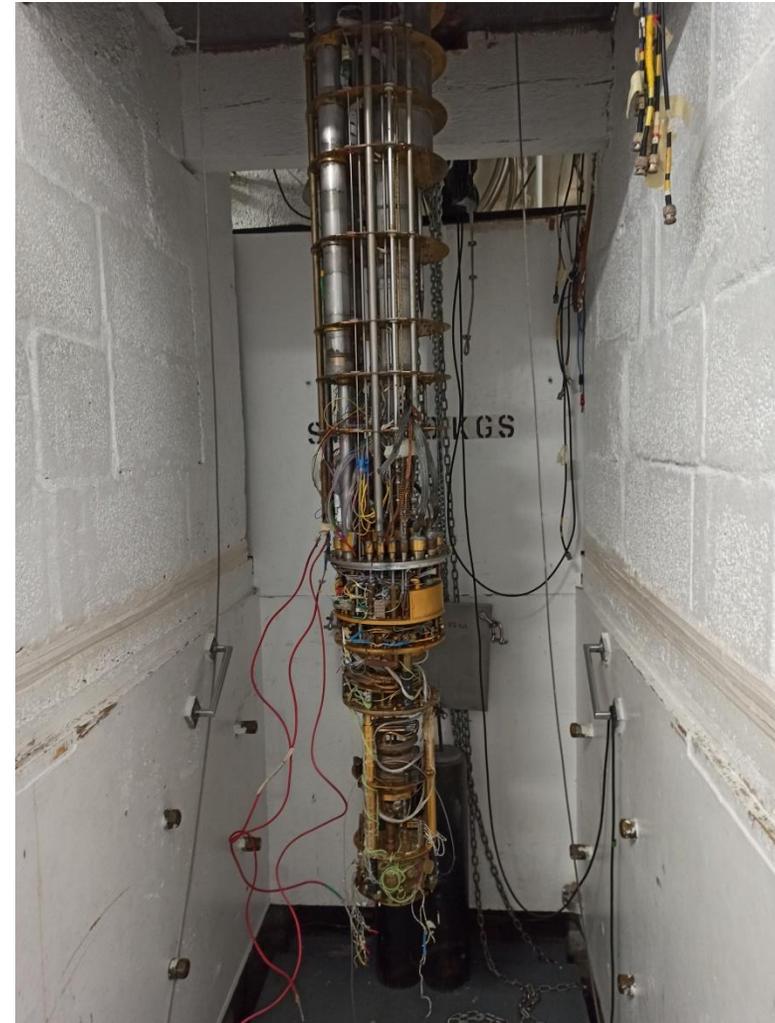
# Pérdidas térmicas

---

- Además, el equipo interior también puede producir interferencias.
- Es necesario aislar correctamente todo el equipo en soportes separados.

# Pérdidas térmicas

- Las vibraciones del propio edificio pueden causar calentamiento.
- Los criostatos siempre se encontrarán en plantas bajas o sótanos.



# Bibliografía

- *Matter and methods at low temperature, F.Pobell, Springer, 1992*
- *Low Temperature Physics, C.Enss & S.Hunklinger, Springer, 2005*

**GRACIAS!**