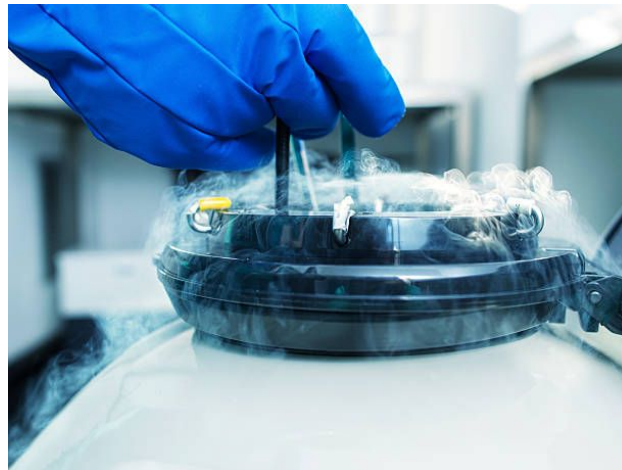


PID-LNGS Programma INFN per Docenti

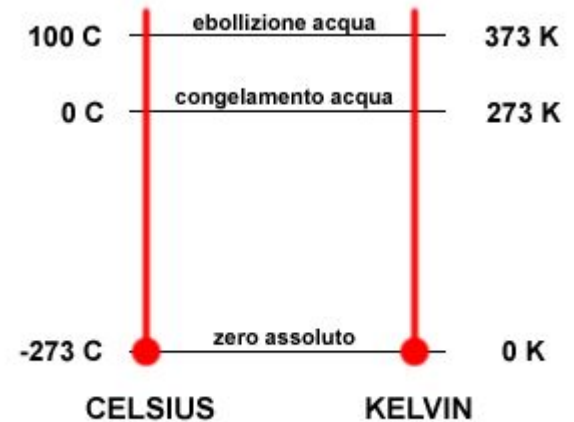
Introduzione alla Criogenia e ai Sistemi di Refrigerazione



17.10.2022
Andrei Puiu

Scale di temperatura

- Scala K: misura della temperatura assoluta
- Funzione dell'energia cinetica delle molecole
- Utile per confronti e calcoli in criogenia



Cos'è la criogenia

- Scienza che studia il *freddo*
- Le temperature di riferimento sono quelle inferiori a 120 K
- È la T che separa le temperature di ebollizione dei gas permanenti (azoto, ossigeno, neon, elio, idrogeno) dagli idrocarburi (freon)



Perché le basse temperature

Come ausilio a tecniche di misura

- Magneti per RM
- Rivelatori più performanti a basse T (diodi Germanio)

Rivelatori per radiazione

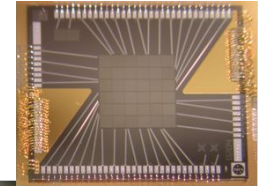
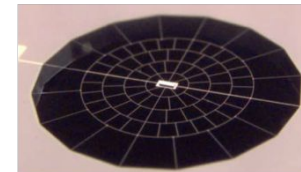
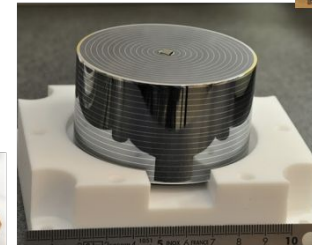
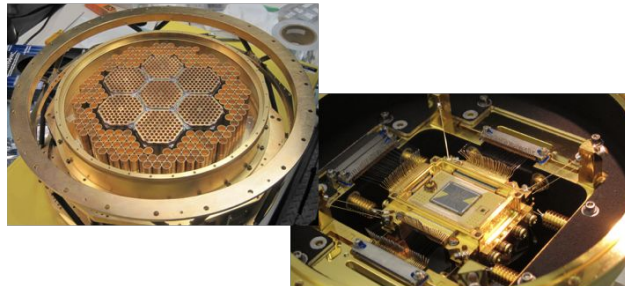
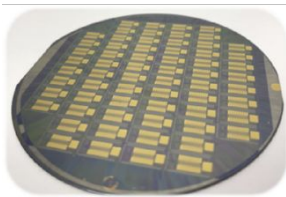
- Gas liquefatti come mezzo di rivelazione scintillanti (gas nobili)
- Rivelatori termici di fononi



Che fisica fare?

Rivelatori che funzionano a $T < 1$ K sono ampiamente usati per la fisica degli eventi rari

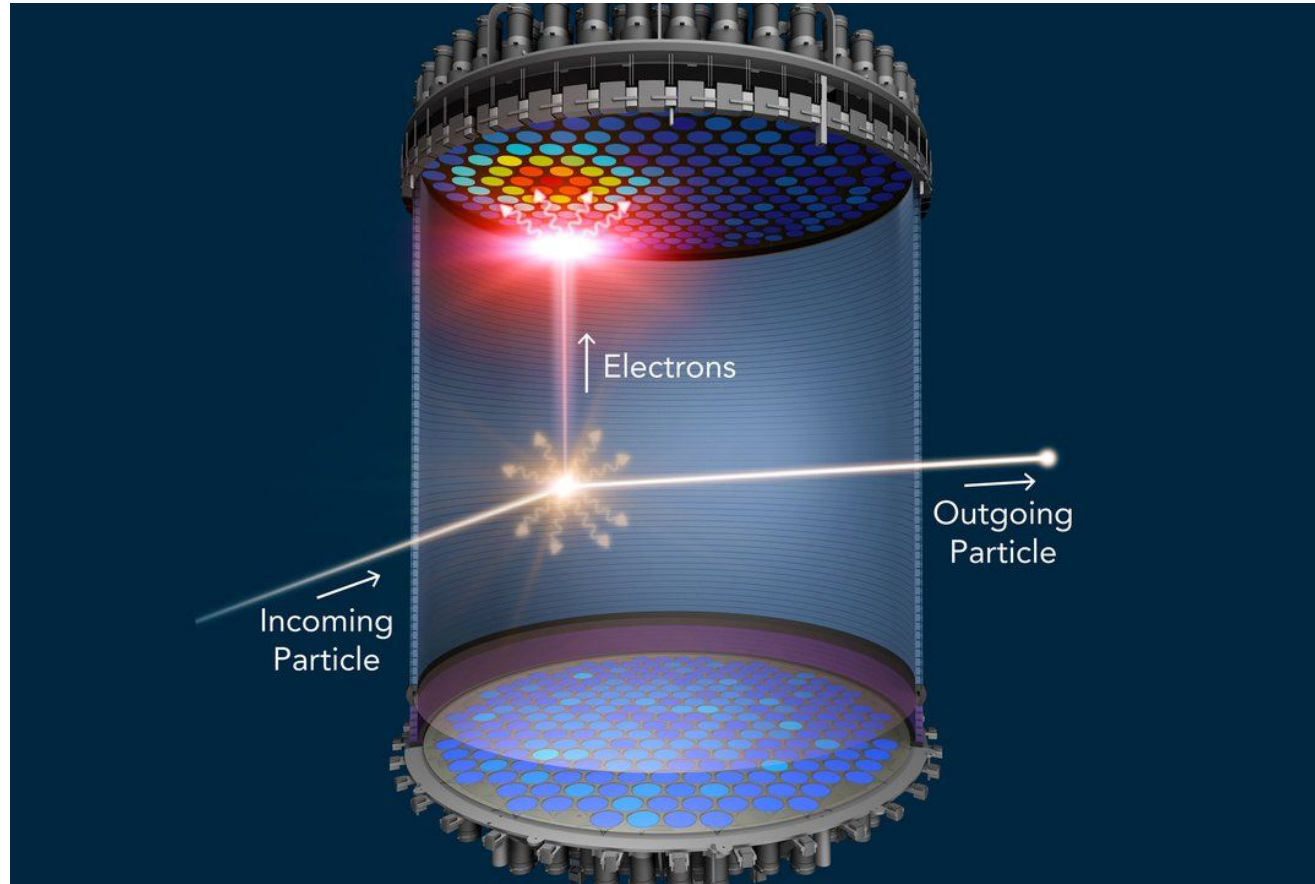
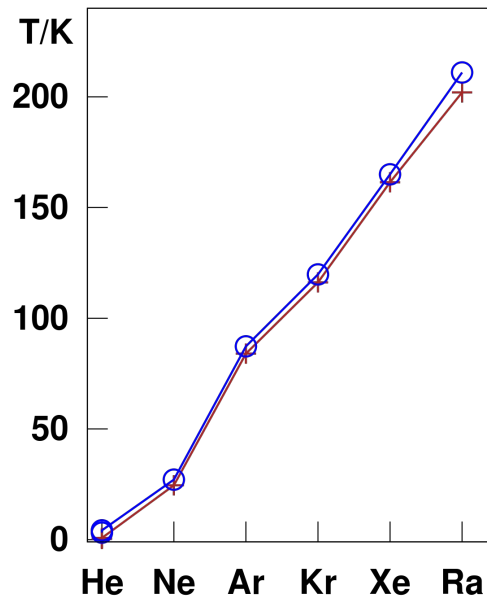
- Ricerca di Materia Oscura
- Doppio Decadimento Beta senza Neutrini
- Cosmic Microwave Background
- Misura diretta della Massa del Neutrino
- Scattering Coerente di Neutrini
- X-Ray AstroPhysics



Gas nobili liquefatti

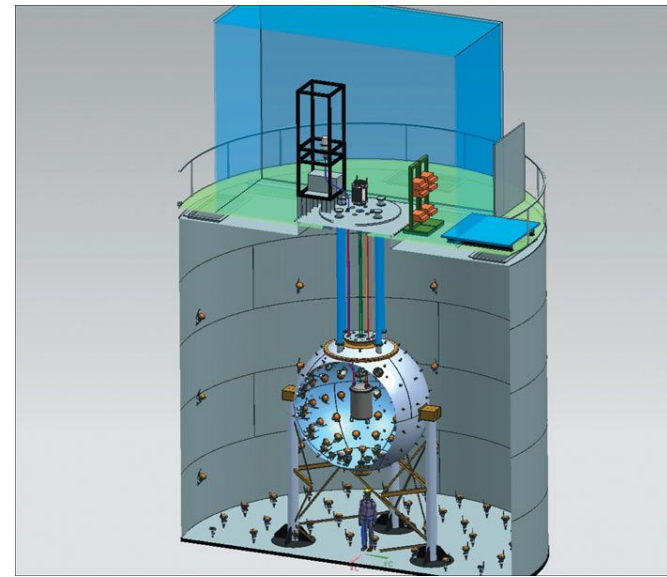
Rivelatori su scala di 10 Ton

- temperatura costante
- ricircolo e purificazione del gas liquefatto
- sistemi criogenici molto grandi e complessi

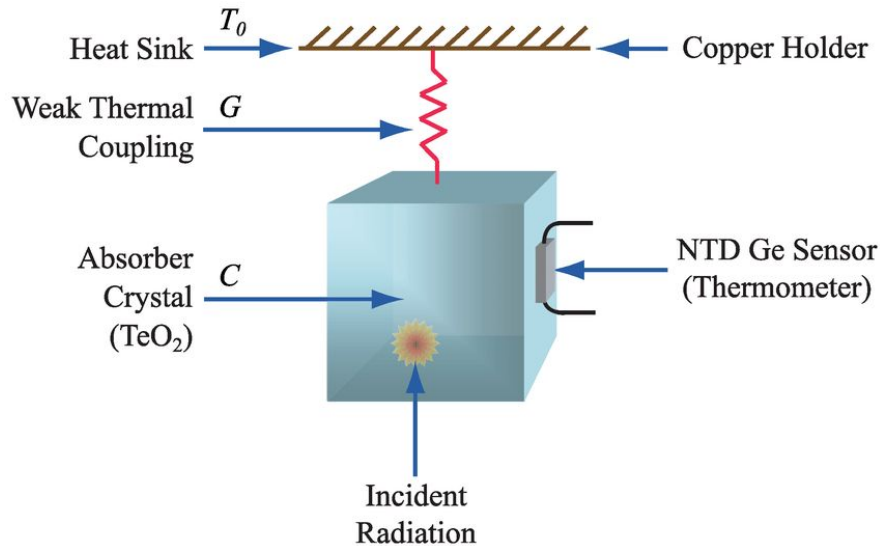


Ai laboratori

- Xenon 1T, Xenon nT
- DarkSide
- GERDA, Legend

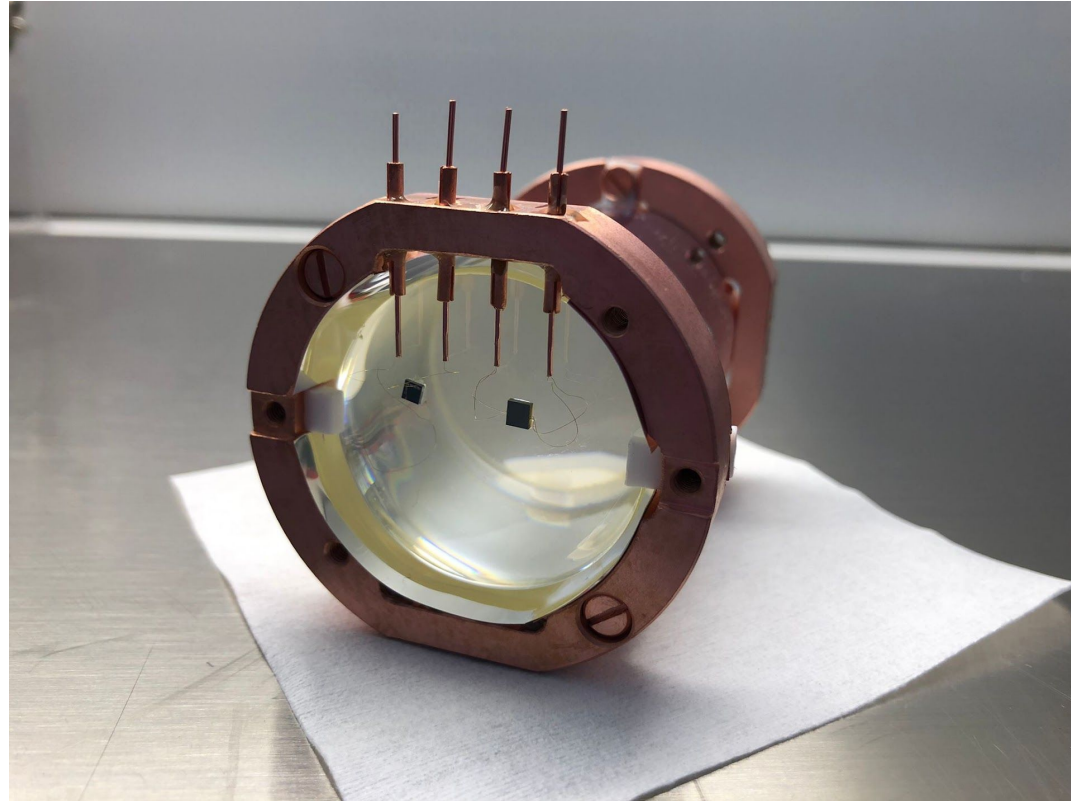


Il rivelatore di fononi

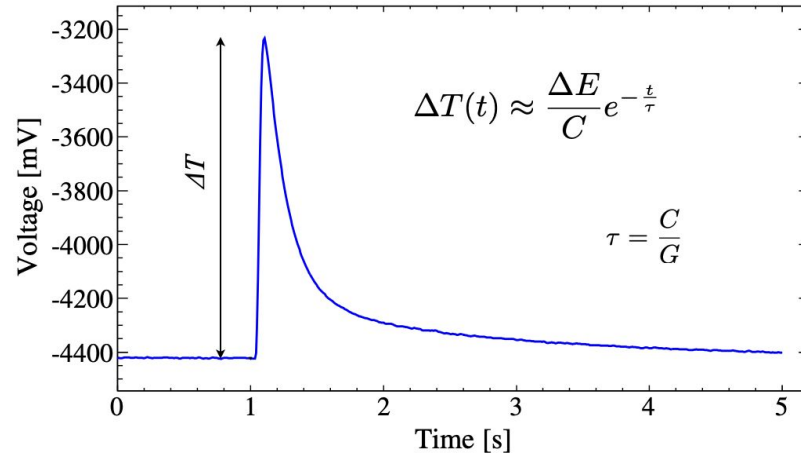
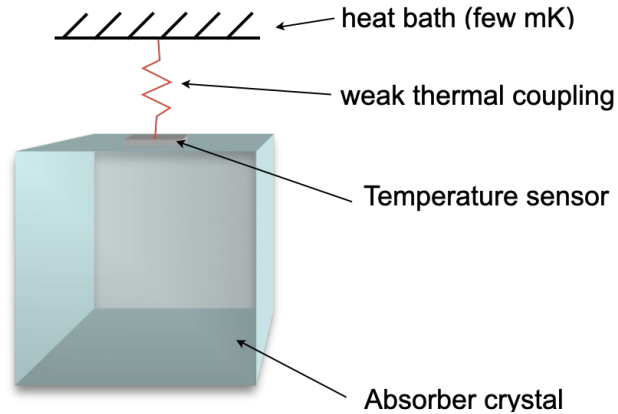


Tenere rivelatori al mK permette di misurare i fononi prodotti dopo un rilascio di energia

- statistica dei portatori molto più alta dei convenzionali rivelatori
- possibilità di usare diversi cristalli
- tecniche di misura della temperatura raffinate



Calorimetri criogenici



Calorimetro - rivelatore termico

- misura l'aumento di temperatura in seguito a un rilascio di energia
- ΔT proporzionale all'energia (spettroscopia)
- segnali tanto più alti quanto minore è la capacità termica del rivelatore

Requisiti

- materiali a bassa capacità termica
- conduttanze termiche regolate per sviluppo temporale del segnale

Esperimenti al mK ai laboratori

- CRESST
- CUORE
- CUPID
- COSINUS



Sfida sperimentale

- Raggiungere la temperatura di funzionamento dei rivelatori \sim mK
- Mantenere la temperatura

Che dal punto di vista termico significa:

- Trasportare calore dai materiali che devono essere raffreddati
- Misurare la temperatura

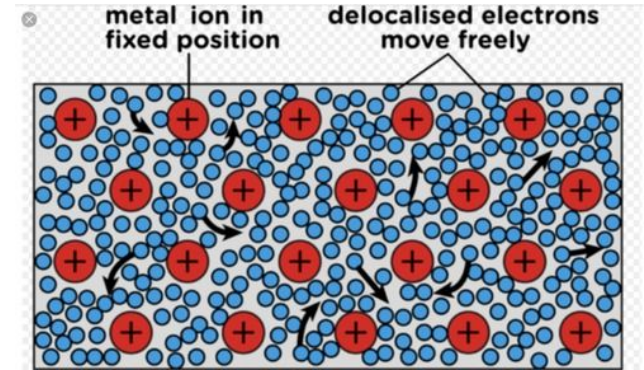
Trasferimento di calore

- Quanto rapidamente varia la temperatura di un oggetto caldo in contatto con un più freddo ?
- Capacità termica $C(T)$, funzione della temperatura
- Conduttanze termiche $G(T)$, funzione della temperatura

Metalli / Isolanti

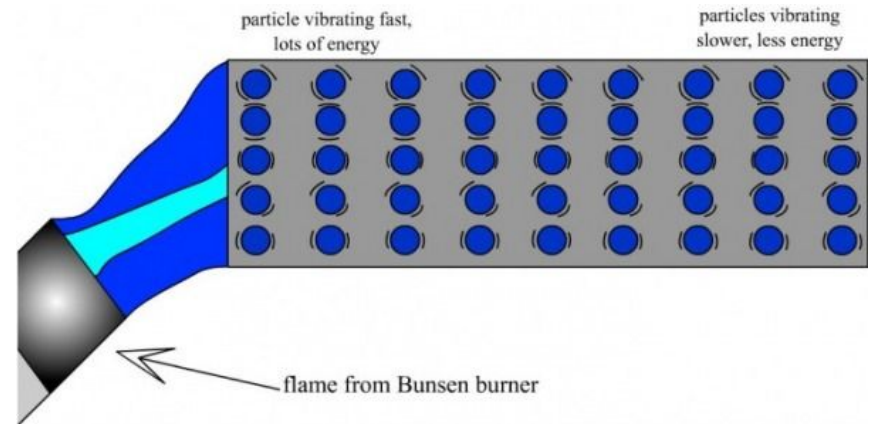
Metalli:

- Elettroni liberi di muoversi nel reticolo cristallino
- Contribuiscono alla conducibilità elettrica e termica



Isolanti:

- Elettroni vincolati nel reticolo
- La conduzione del calore avviene tramite vibrazioni del reticolo cristallino (fononi)



Capacità termica dei metalli

- I metalli hanno elettroni liberi a qualsiasi temperatura
- Gli e- sono liberi di muoversi e contribuiscono sia alla conduzione termica che alla capacità termica

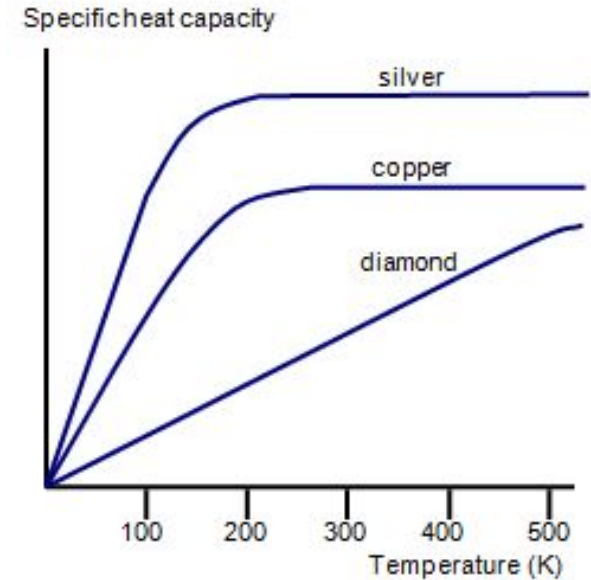


Figure 1

Capacità termica isolanti

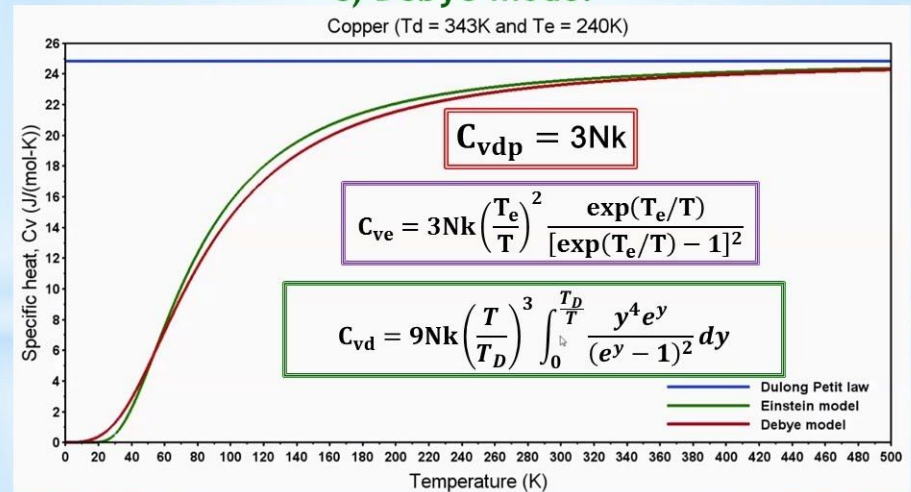
- A T ambiente la legge di Dulong Petit funziona per quasi tutti gli isolanti
- Quando la temperatura si abbassa si riducono i gradi di libertà in cui immagazzinare energia
- Diversi modelli per calcolare la capacità termica $C(T^3)$

Plot Specific heat of solids (C_v) with Temperature

a) Dulong-Petit's law

b) Einstein model

c) Debye model



Sistemi criogenici

Isolamento termico:

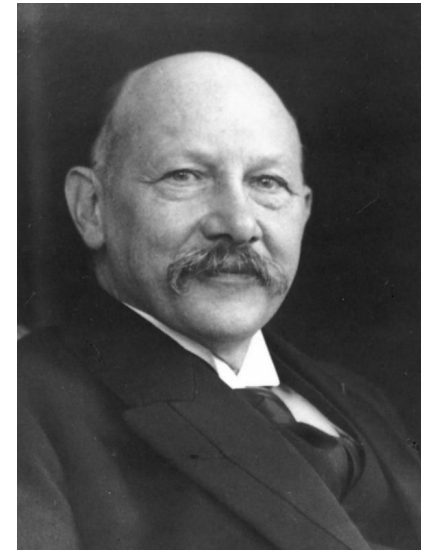
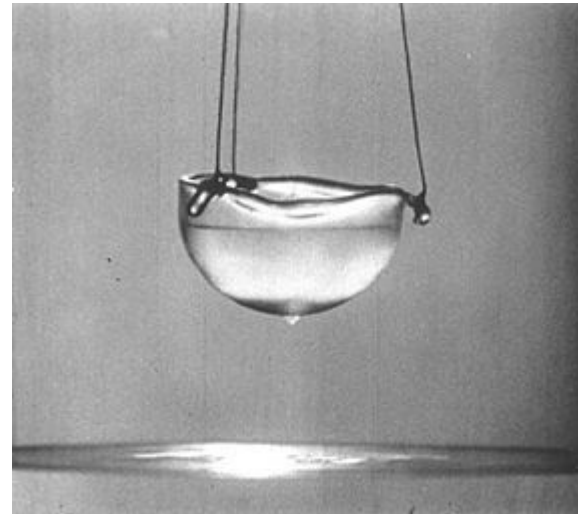
- si procede per stadi
- ciascuno stadio deve essere isolato termicamente dallo stadio più caldo per ottimizzare il potere refrigerante

ridurre il trasferimento di calore:

- convezione: vuoti di isolamento $p \sim 1e-4$ mbar
- irraggiamento: schermi multistrato a temperature diverse di materiale a bassa emissività (in vuoto)
- conduzione: accoppiamenti meccanici con materiali a bassa conduttanza termica

I Liquidi Criogenici

Liquido	punto di ebollizione (K)	(°C)
Helium-3	3.19	-269.96
Helium-4	4.214	-268.936
Hydrogen	20.27	-252.88
Neon	27.09	-246.06
Nitrogen	77.09	-196.06
Air	78.8	-194.35
Fluorine	85.24	-187.91
Argon	87.24	-185.91
Oxygen	90.18	-182.97
Methane	111.7	-161.45

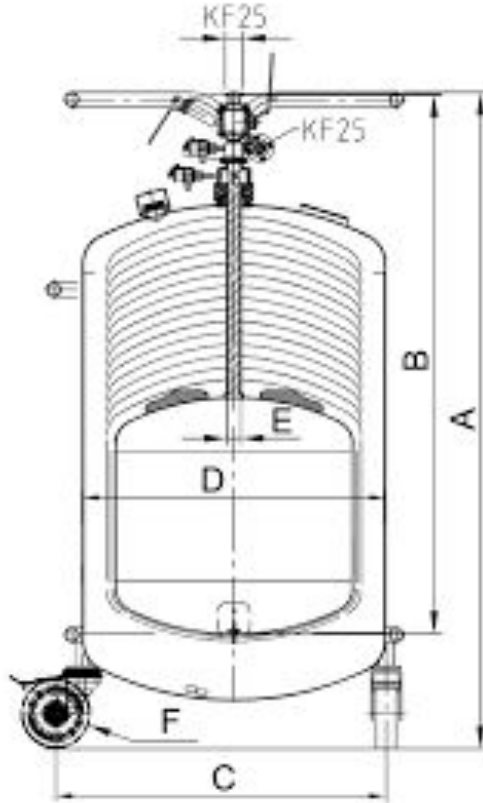


L'Elio liquido

- Molti sistemi di refrigerazione necessitano di uno stadio a 4.2 K costante
- Spesso si utilizza un bagno di Elio liquido a pressione atmosferica in cui il sistema sperimentale è immerso
- Lo svantaggio è la necessità di continuare a riempire il bagno che evapora
- Il vantaggio è che non produce vibrazioni

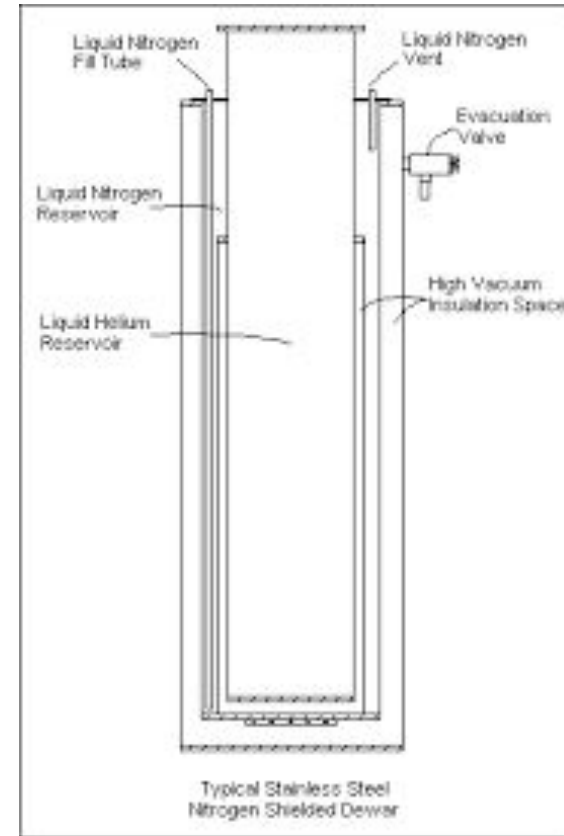


Dewar per liquidi criogenici



Per mantenere l'elio liquido (4 K) servono contenitori ben isolati per ridurre il tasso di evaporazione

- il vapore emesso dall'elio liquido si propaga verso lo sfiato
- schermi concentrici sono accoppiati a stadi a temperatura diversa per ridurre l'irraggiamento
- in alternativa si usa uno schermo immerso in azoto liquido a 77 K che assorbe la radiazione delle superfici più calde



Come si raffredda - 1

l'Entalpia è una grandezza fondamentale in criogenia: $H = U + pV$

- funzione di stato data dalla somma dell'energia interna del sistema e della sua configurazione geometrica (pressione e volume occupati)
- è particolarmente utile per stimare la quantità di energia che bisogna rimuovere da un sistema per raffreddarlo
- si può stimare la quantità di azoto liquido che serve per raffreddare 1 kg di alluminio da 300 K a 77 K sfruttando solo il calore latente di evaporazione:

$$\begin{array}{l} H_{300K}^{Al} = 170.4 \text{ J/g} \\ H_{77K}^{Al} = 8.4 \text{ J/g} \\ \downarrow \\ \Delta H_{300K-77K}^{Al} = 162 \text{ J/g} \end{array} \quad \begin{array}{l} H_{300K}^{N_2 \text{ gas}} = 462.1 \text{ J/g} \\ H_{77K}^{N_2 \text{ gas}} = 228.7 \text{ J/g} \\ H_{77K}^{N_2 \text{ liq}} = 29.4 \text{ J/g} \end{array} \quad \begin{array}{l} \longrightarrow \Delta H_{300K-77K}^{N_2} = 233.4 \text{ J/g} \\ \longrightarrow L_{vap}^{N_2} = 199.3 \text{ J/g} = 160.7 \text{ kJ/l} \end{array}$$

1.01 Litri sfruttando solo il calore latente a 77 K

0.41 Litri sfruttando la variazione di entalpia da 77 K a 300K

Come si raffredda 2

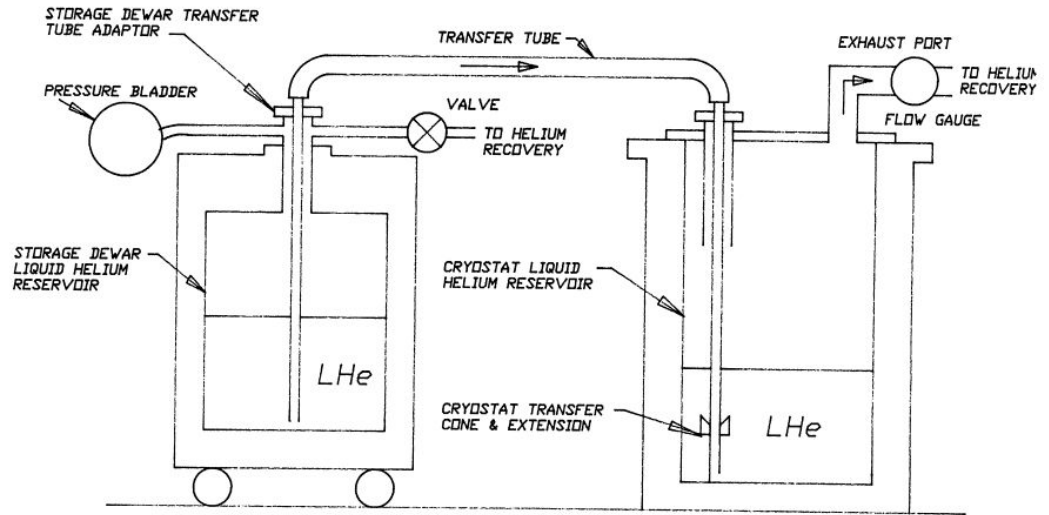
Cryogen		N ₂	⁴ He	⁴ He
From		300 K	77 K	300 K
To		77 K	4.2 K	4.2 K
Using only L _{vap}	Aluminum	1.01	3.20	66.6
	Copper	0.64	2.16	31.1
	Stainless Steel	0.53	1.43	33.3
Using ΔH+L _{vap}	Aluminum	0.41	0.22	1.61
	Copper	0.29	0.15	0.79
	Stainless Steel	0.33	0.11	0.79

Per sfruttare al massimo il potere refrigerante dei liquidi criogenici bisogna trasferire lentamente in modo da lasciar termalizzare il gas evaporato e raffreddare in stadi successivi. 300 K a 77 K con Azoto liquido. 77 K a 4 K con Elio liquido

Impiego efficiente dei liquidi

Massimizzare l'efficienza di raffreddamento trasferendo liquidi permette di usare quantità minori

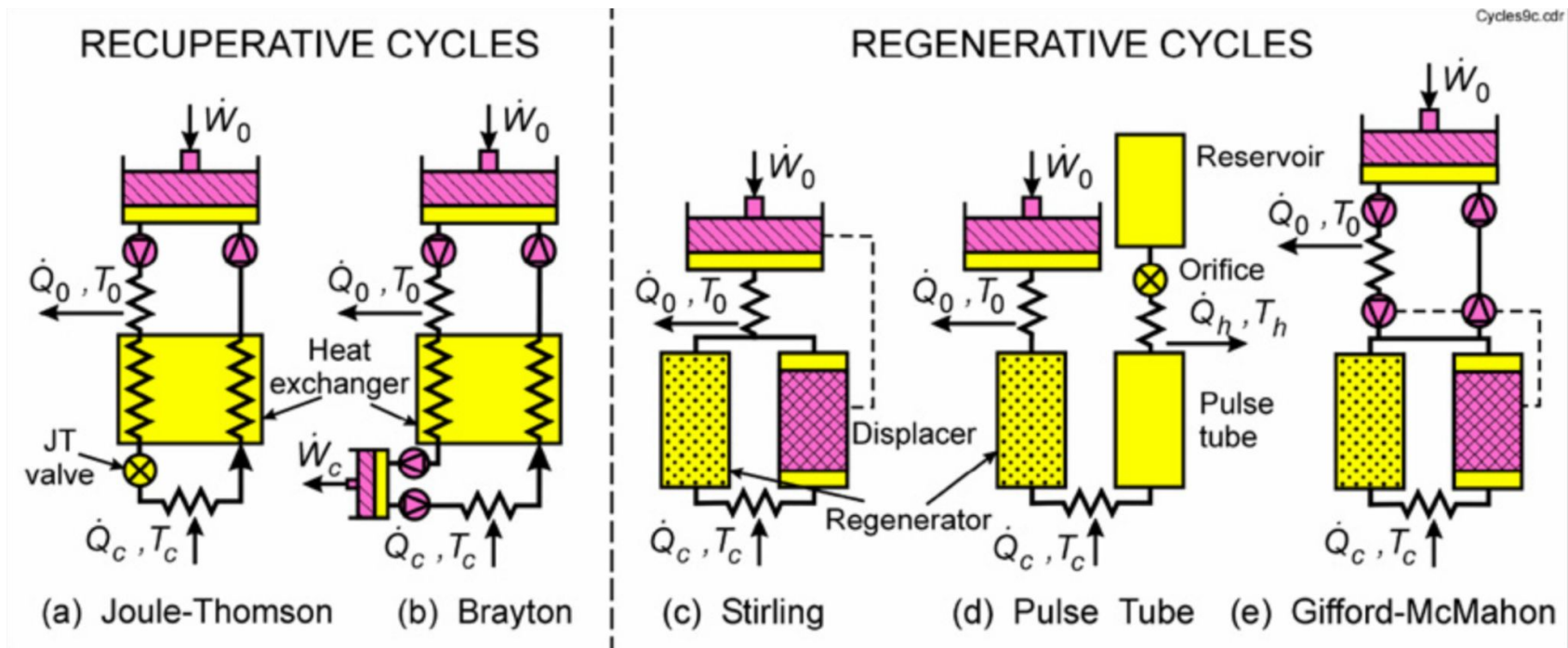
Il trasferimento deve procedere a flussi moderati in modo da non perdere energia raffreddando parti non necessarie



SCHEMATIC DIAGRAM OF LIQUID HELIUM TRANSFER.

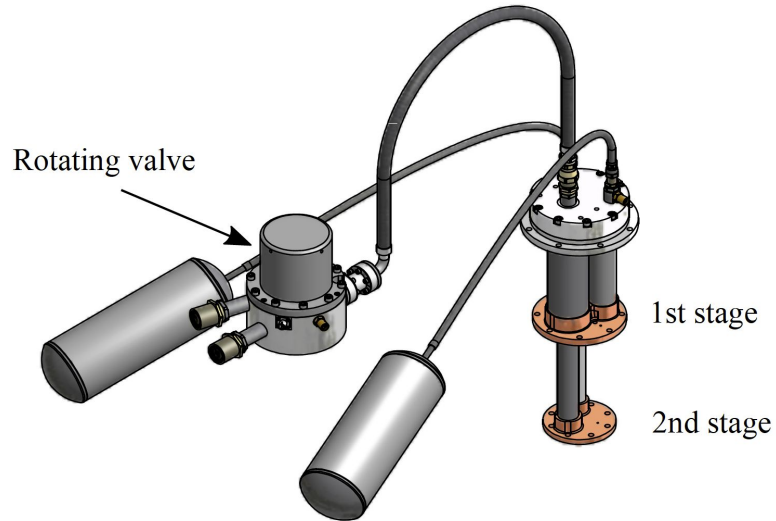
Stadi a 4.2 K senza liquidi

Esistono diversi metodi per raggiungere temperature pari o inferiori a 4.2 K con refrigeratori meccanici che non richiedono liquidi a esaurimento



Sotto 4 K - senza liquidi: Pulse Tube

- sfrutta l'espansione isoentalpica da una regione ad alta pressione di onde di pressione
- si può usare come refrigeratore indipendente
- integrabile in sistemi più complessi per raffreddare stadi più esterni



Da 4 K al mK: il refrigeratore a diluizione



1951: proposta di by H. London

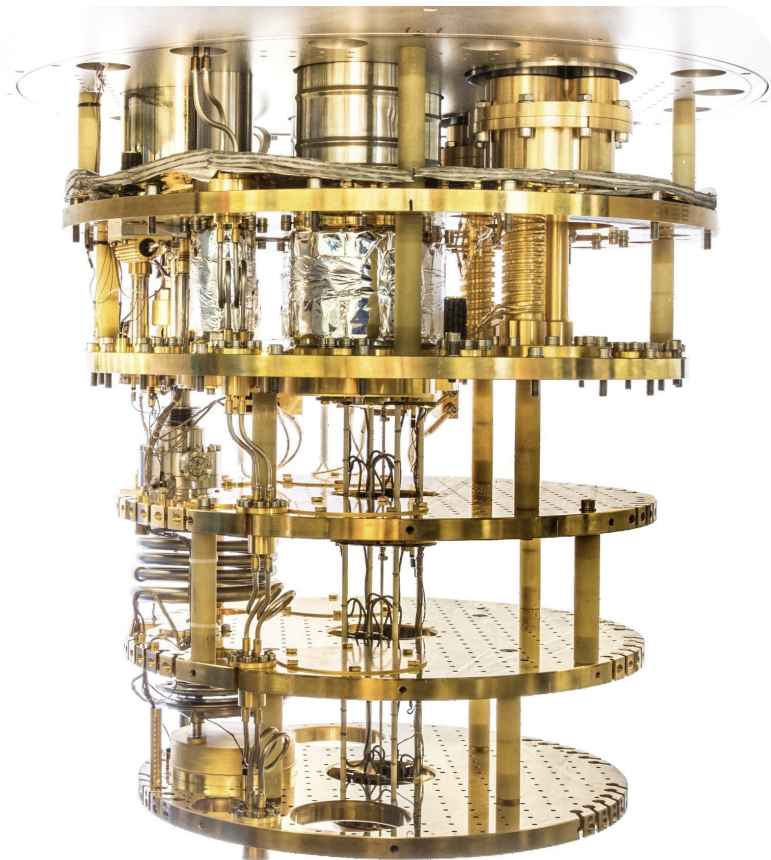
1962: H. London, G. R. Clarke, and E.

Mendoza, Phys. Rev. 128, 1992

1964: Prima Unità a Diluizione (Leiden)

1967: Prima Unità a Diluizione prodotta
commercialmente da Oxford Instruments

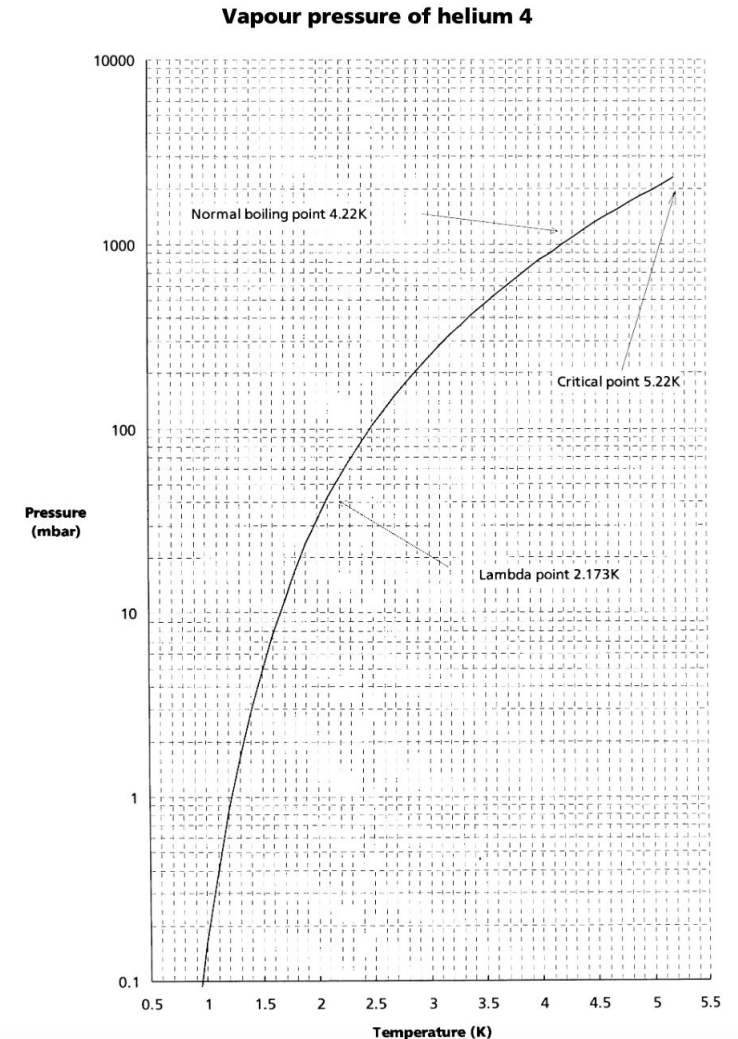
Dagli anni '70 il refrigeratore a diluizione è
diventato un sistema standard per raggiungere
temperature sotto 1 K



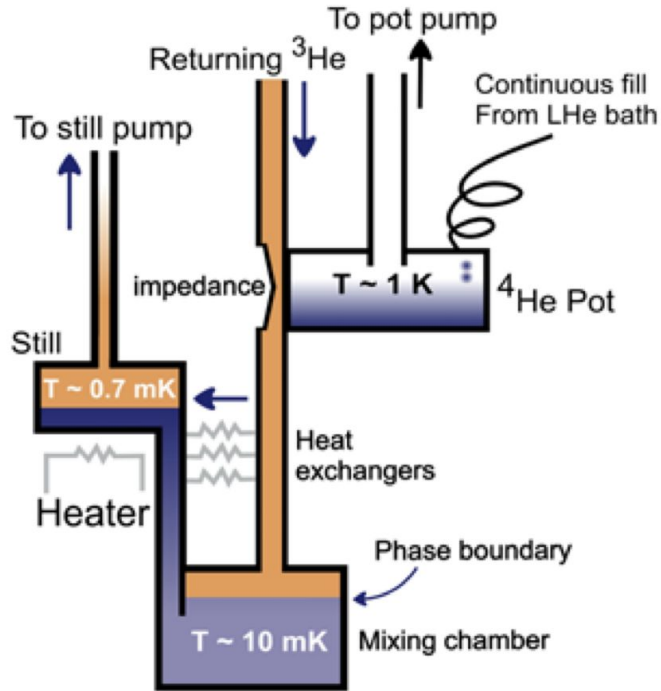
Sotto 4 K - con liquidi

La pressione di vapore dell'Elio liquido è funzione della temperatura:

- se si abbassa la pressione in un contenitore “chiuso” si riesce ad abbassare la temperatura del liquido che sta evaporando.
- collegando una pompa da vuoto a un contenitore dove l'Elio liquido evapora si riesce a raffreddare fino a 1 K senza circolare miscele speciali
- potere refrigerante alto



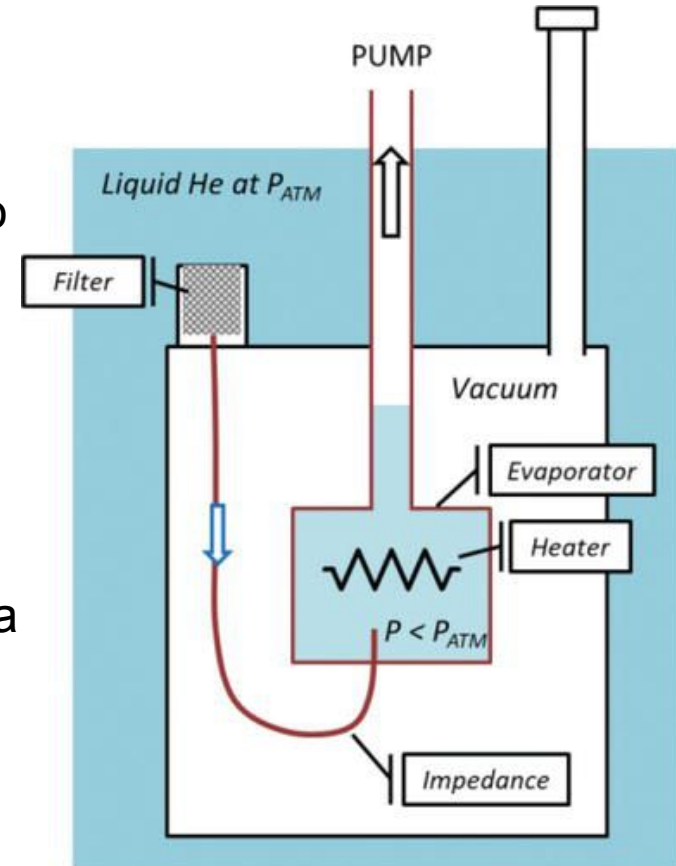
1 K pot



- un volume in cui viene inserito Elio liquido continuamente da un bagno di elio
- una linea di pompaggio collega il volume della pot da una pompa che tiene la pressione al valore desiderato

una 1 K pot può essere usata sia per raffreddare:

- direttamente apparati sperimentali
- flussi di Elio per raffreddare altri stadi



Pressione di vapore dell'Elío

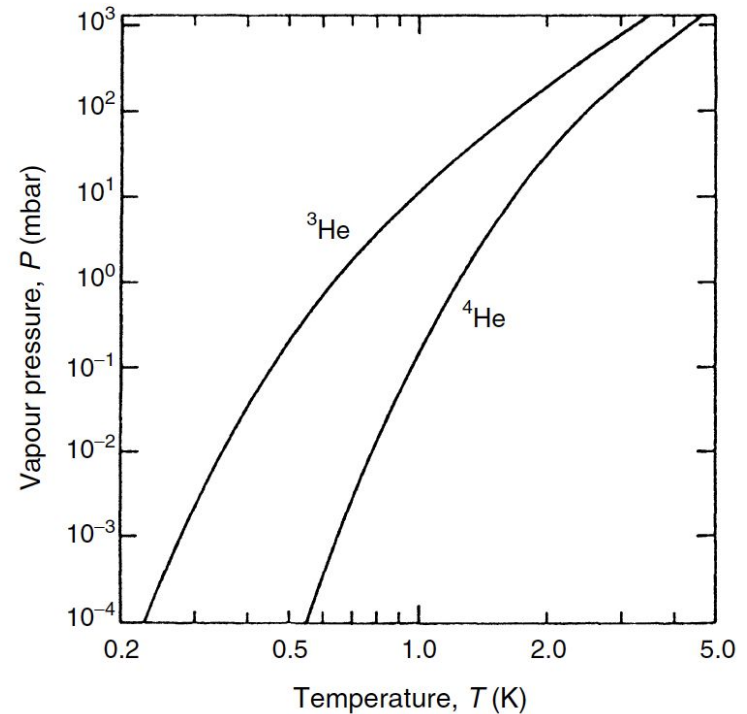
- la variazione di calore latente del gas evaporato abbassa la temperatura
- la pressione scende esponenzialmente con la temperatura -> il limite è dato dalla quantità di molecole presenti in fase gassosa
- Clausius–Clapeyron descrive la variazione di p in funzione di T alla separazione delle fasi

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_B - V_A)}$$

a calore latente L costante e basse pressioni (bassa densità)

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{vap} \simeq \frac{L p}{R T^2} \quad p_{vap} \propto e^{-\frac{L}{RT}}$$

- con ^4He si raggiunge 1.2 K, con ^3He , 0.250 K



Superfluidità di 4He

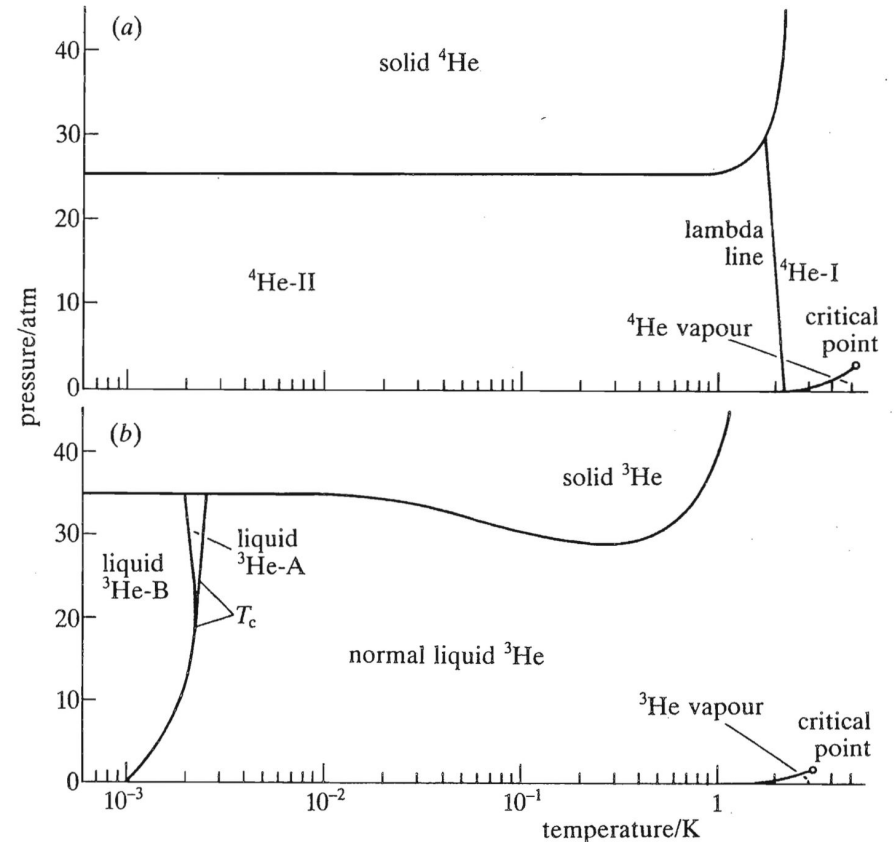
Un superfluido è uno stato della materia in cui un fluido ha viscosità nulla.

La sostanza appare come un liquido normale, ma l'assenza di viscosità comporta che il flusso attraverso sottili capillari è apparentemente indipendente dalla differenza di pressione come per i fluidi viscosi in regime laminare



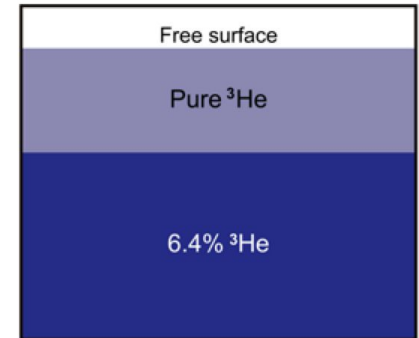
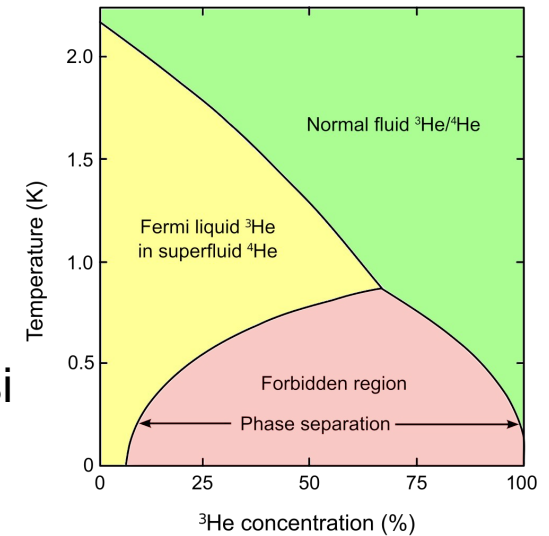
Diagramma delle fasi di ^3He e ^4He

- Ogni atomo di ^4He è un bosone, in quanto ha spin uguale a 0. Gli atomi di ^3He è un fermione e ha spin $\frac{1}{2}$
- La diversa natura conferisce ai due gas comportamenti diversi a basse temperature in funzione della pressione: ^3He non ha transizioni superfluide (almeno non fino a temperature molto più basse)
- Le miscele di $^3\text{He}/^4\text{He}$ vengono sfruttate per raggiungere temperature sotto i 300 mK



Miscela $^3\text{He}/^4\text{He}$

- La temperatura di transizione a superfluido di una miscela $^3\text{He}/^4\text{He}$ dipende dalla concentrazione di ^3He
- Quando una miscela viene raffreddata al di sotto del punto lambda transisce a superfluido.
- Raffreddando ulteriormente la miscela, si separa in due fasi con la fase ricca di ^3He che si colloca sopra la fase ricca di ^4He più pesante
- La fase ricca di ^4He (detta *fase diluita*) contiene il 6,4% di ^3He fino a 0 K.
- La solubilità finita di ^3He in ^4He è il principio che si sfrutta per la refrigerazione di diluizione



Mixing chamber

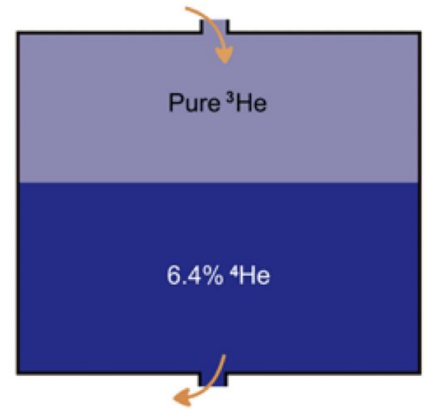
- La solubilità finita di ^3He in ^4He è data dalla diversa natura (e statistica): ^3He è un fermione, ^4He è un bosone.
- Gli atomi ^3He che stanno nella fase concentrata possono "decadere" in stati a un'energia inferiore nella fase diluita.
- Quando si raggiunge una concentrazione $x = 0,064$ non è più energeticamente conveniente dissolversi e le due fasi raggiungono un equilibrio.
- Se rimuoviamo gli atomi di ^3He dalla fase diluita, gli atomi di ^3He dalla fase concentrata attraverseranno la linea di separazione tra le fasi per occupare gli stati energetici vuoti nella fase diluita a cui mancano atomi di ^3He .
- Il potere refrigerante è quindi dato dalla differenza di entalpia ΔH tra ^3He in fase diluita e ^3He puro moltiplicato per il flusso di ^3He tra le due fasi:

$$L_{H_3} = \Delta H$$

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad \text{Specific heat of } ^3\text{He: } C \approx 22 T \text{ J/mol K}$$

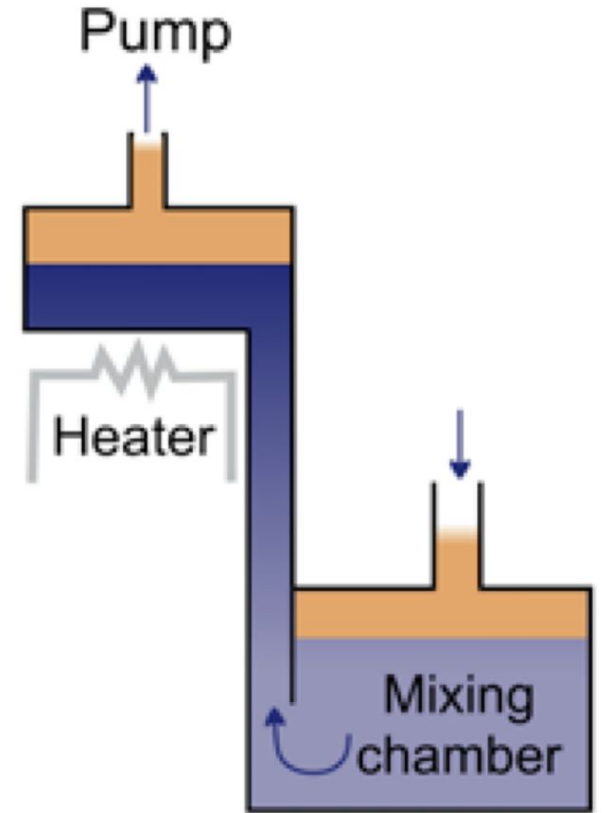
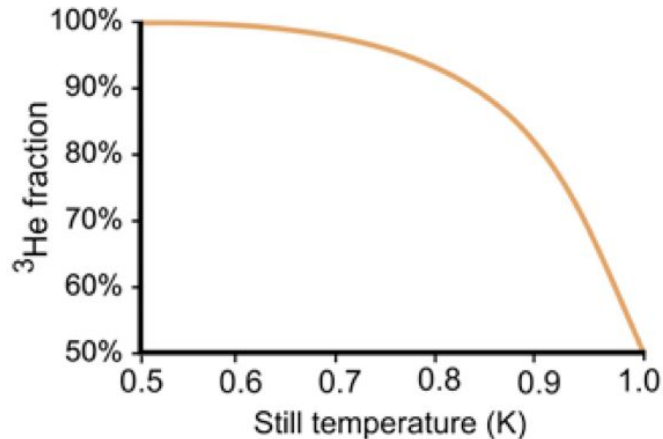
$$Q = \int_{T_{MC}}^{T_{HEX}} C dT = 11(T_{MC}^2 - T_{HEX}^2) \quad \text{Power injected by the returning } ^3\text{He}$$

$$\dot{Q} \simeq \dot{n}_3 (95 T_{MC}^2 - 11 T_{HEX}^2)$$



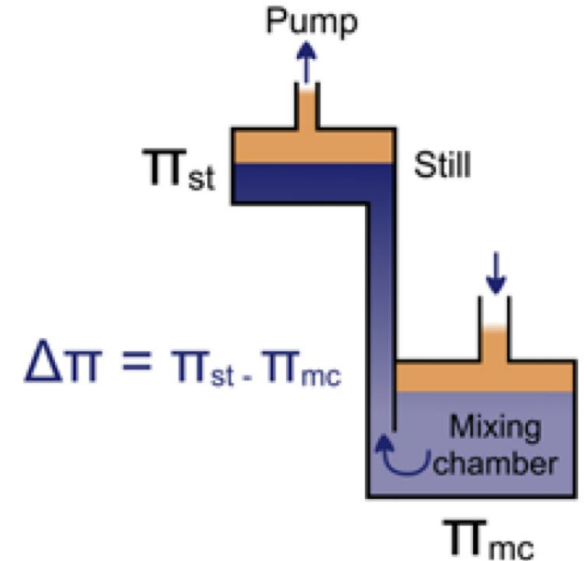
Lo Still

- La mixing chamber si collega a un distillatore ("still"), che distilla il ^3He dal ^4He per differenza di pressione del vapore
- Si preferisce scaldare lo still con potenza esterna per mantenere costante il flusso di evaporazione del ^3He .
- In pratica si ha una frazione di ^3He circa $\sim 90\%$ nel gas in circolo, risultando in una temperatura dello still di $0.7 - 0.8$ K.



Pressione osmotica

- Quando pompamo il vapore ^3He dalla fase diluita all'interno dello still, la concentrazione di ^3He nella fase diluita
- La differenza di concentrazione di ^3He tra lo still e la mixing chamber determina un gradiente di pressione osmotica lungo il tubo di collegamento
- Questa pressione osmotica spinge ^3He dalla mixing chamber verso lo still
- La pressione osmotica massima è di quasi 20 mbar.
- Che equivale alla pressione idrostatica di 1 metro di elio liquido
- Ciò significa che la differenza verticale tra Still e Mixing Chamber dovrebbe essere inferiore a 1 metro



Unità a diluizione

- Ridurre al minimo l'effetto della resistenza termica tra elio liquido e metalli (resistenza di Kapitza). Ciò consente scambiatori di calore efficienti e quindi una temperatura di base più bassa
- Ridurre al minimo l'effetto del riscaldamento viscoso. Ciò consente un'elevata velocità di circolazione ^3He e quindi una maggiore potenza di raffreddamento
- Limitare il flusso del film superfluido nello still. Ciò garantisce che venga fatto circolare circa il 90% di ^3He puro
- Ridurre al minimo la quantità di ^3He necessaria per il funzionamento (costi)
- Rimanere a tenuta stagna per molti anni



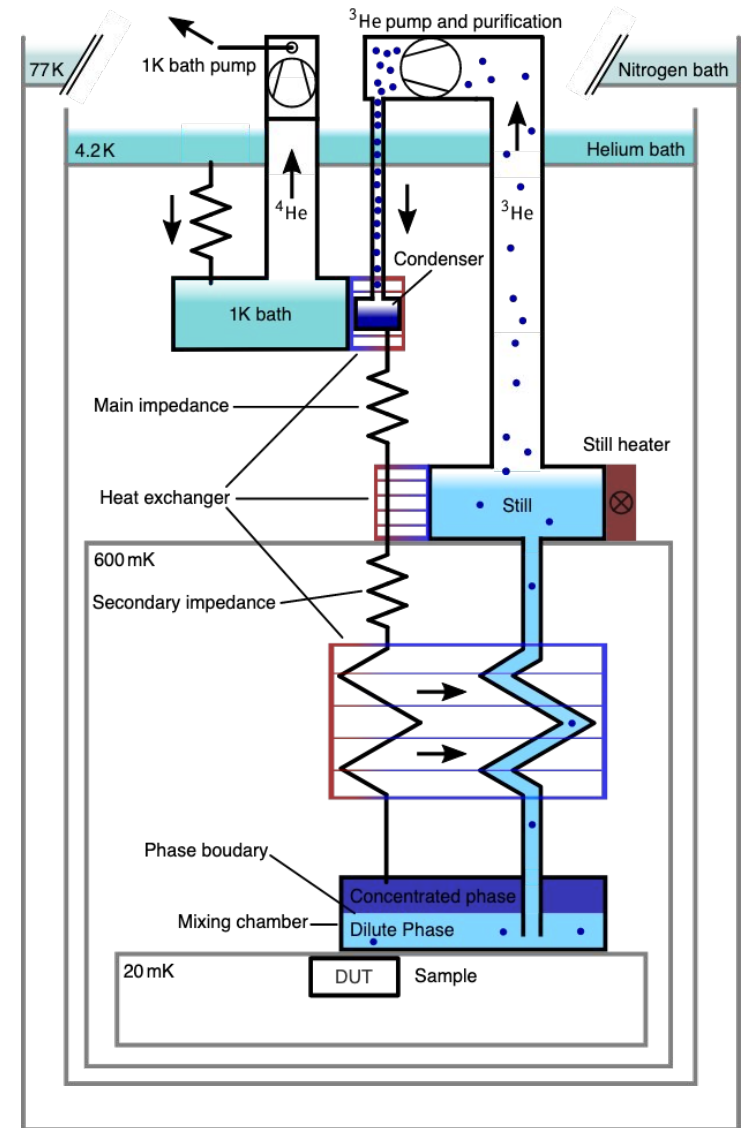
Criostato a diluizione

La parte cruciale del refrigeratore è l'unità a diluizione:

- mixing chamber
- still
- linea di iniezione del ^3He

Oltre ai sistemi di pompaggio e ricircolo dell'elio servono:

- 1K pot
- bagno esterno di elio liquido
- bagno esterno di azoto liquido



Criostati per rivelatori di eventi rari

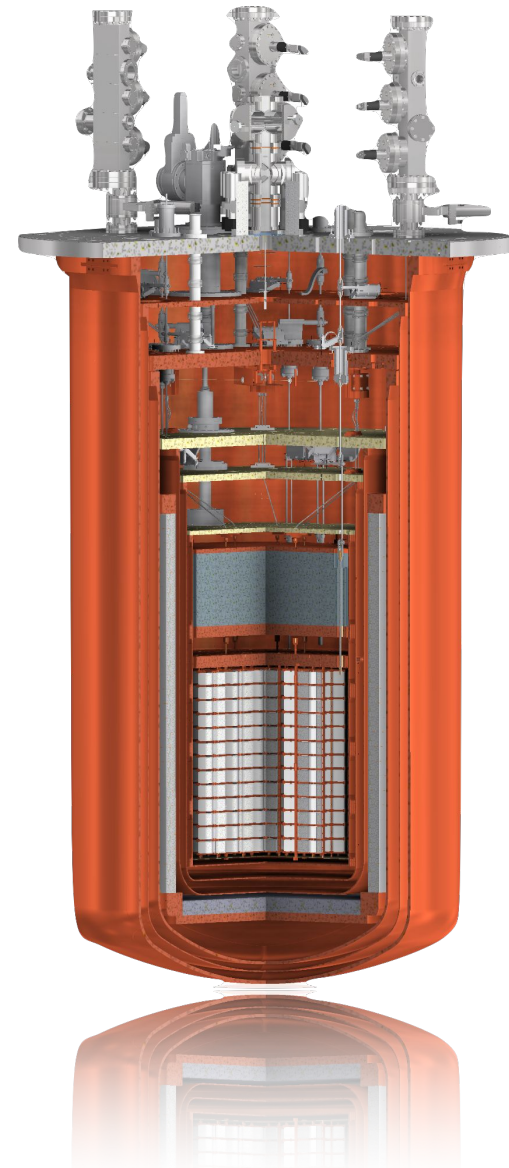
- In base alla temperatura a cui sono progettati per funzionare i rivelatori, esistono criostati a diluizione con geometrie diverse
- Le schermature sono parte cruciale degli esperimenti di eventi rari
- Le dimensioni e la posizione delle schermature deve essere studiata in modo da ottimizzare i tempi di raffreddamento



Refrigeratore a diluizione dell'esperimento CUORE

Un sistema criogenico con un volume sperimentale di $\sim 1 \text{ m}^3$ in cui opera un'enorme matrice di rivelatori a 10 mK a bassa radioattività e basse vibrazioni

La massa totale della parte raffreddata sotto 40 K è 15 tonnellate



Refrigeratore a diluizione dell'esperimento CUORE

Criostato senza elio liquido

- Tubi a impulsi, espansione JT invece di 1K Pot
- Temperatura di base <10 mK
- Unità di diluizione costruita appositamente ad alta potenza di raffreddamento
- Criostato verticale (più massa da raffreddare, design più semplice)

Dimensioni: esterno \varnothing 1687 × h 3100, volume sperimentale \varnothing 900 × h 1370

- Ampia schermatura in piombo freddo che circonda il rivelatore
- Supporto per carichi pesanti
- rivelatore ~ 1 tonnellata
- schermatura al piombo ~ 10 tonnellate

Selezione rigorosa dei materiali


- principalmente rame pulito radioattivamente
- altri materiali selezionati solo in piccole quantità (SS, TiAlSn, Kevlar...)

Contributo delle vibrazioni meccaniche basse sul rivelatore

- sospensione del rivelatore indipendente
- Il progetto è stato un processo iterativo in cui ogni scelta doveva essere validata dal punto di vista del bilancio termico e della radioattività



Metro cubo più freddo dell'Universo

**INTERACTIONS.ORG**
PARTICLE PHYSICS NEWS AND RESOURCES

A COMMUNICATION RESOURCE FROM THE WORLD'S PARTICLE PHYSICS LABORATORIES

HOME NEWS IMAGE BANK VIDEO CHANNEL

SEARCH

SITE NEWS

HOME

PHOTOWALK

ABOUT INTERACTIONS

IMAGE BANK

VIDEO CHANNEL

BLOG WATCH

NEWSWIRE ARCHIVE

BENEFITS TO SOCIETY

PEER REVIEWS

ADDITIONAL RESOURCES

COLLABORATION WORKSPACES

CONTACT US

Interactions NewsWire #71-14

21 October 2014 <http://www.interactions.org>

Source: INFN


Content: Press Release


Date Issued: 21 October 2014

CUORE: The Coldest Heart in the Known Universe

The CUORE collaboration at the INFN Gran Sasso National Laboratory has set a world record by cooling a copper vessel with the volume of a cubic meter to a temperature of 6 milliKelvins: it is the first experiment ever to cool a mass and a volume of this size to a temperature this close to absolute zero (0 Kelvin). The cooled copper mass, weighing approx. 400 kg, was the coldest cubic meter in the universe for over 15 days.

CUORE is an international collaboration involving some 130 scientists mainly from Italy, USA, China, Spain, and France. CUORE is supported by the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Italy; the Department of Energy Office of Science (Office of Nuclear Physics), the National Science Foundation, and Alfred P. Sloan Foundation in the United States.





2

+ Più...

Login

+ AddThis

grazie per l'attenzione