

Corso Nazionale di Criogenia e Vuoto INFN - PNF2025

INFN Milano Bicocca, 30 Settembre 2025



Tecniche di refrigerazione, liquefazione ed esempi di impianti

Antonio D'Addabbo



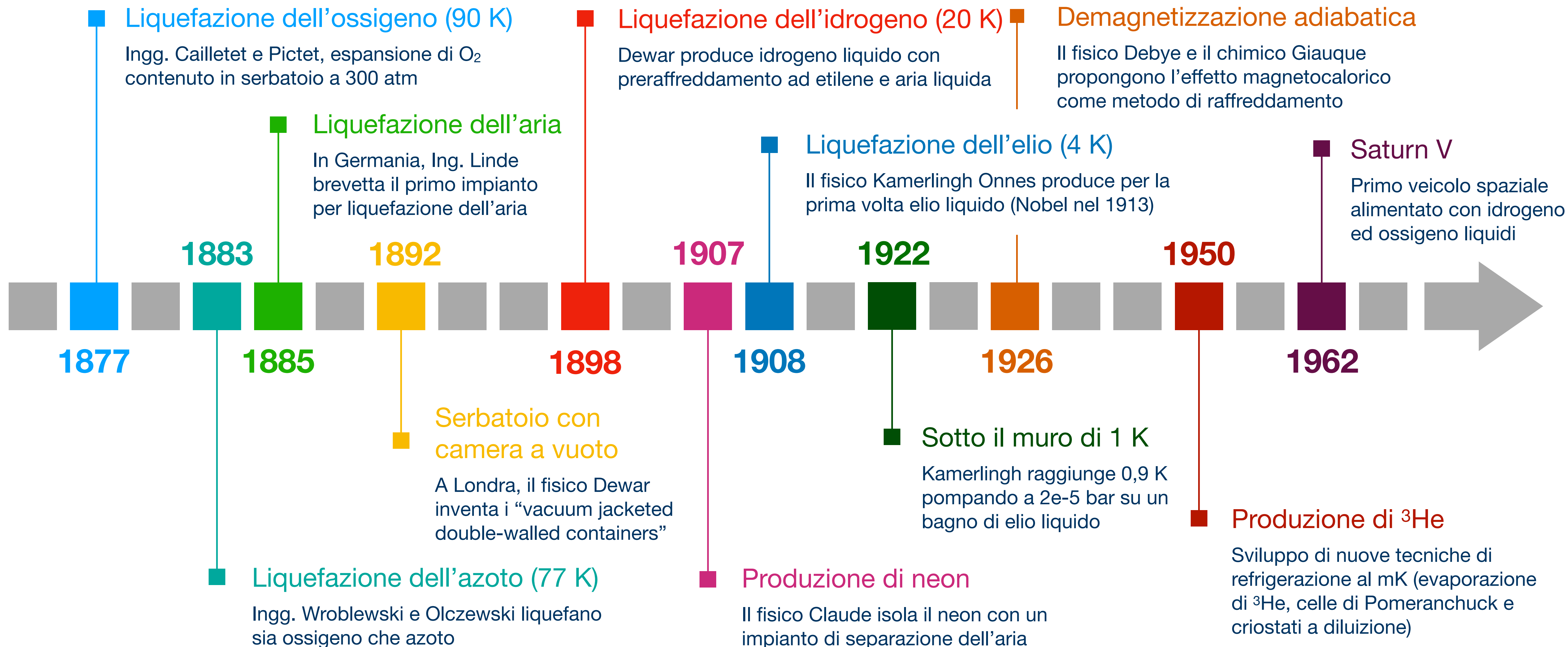
- Introduzione
- Concetti utili
- Crio-refrigeratori
- Cicli recuperativi
- Cicli rigenerativi
- Criorefrigeratori a confronto



Introduzione



Breve storia dell'ingegneria criogenica



Aree di applicazione



Industria alimentare

Consente di ottenere, grazie a temperature molto basse, un raffreddamento e/o una surgelazione molto rapidi degli alimenti.

Per ottenere questo risultato vengono impiegati dei liquidi criogenici: diossido di carbonio liquido e azoto liquido.

Industria aerospaziale

Attualmente i veicoli spaziali utilizzano combustibili criogenici per la propulsione.

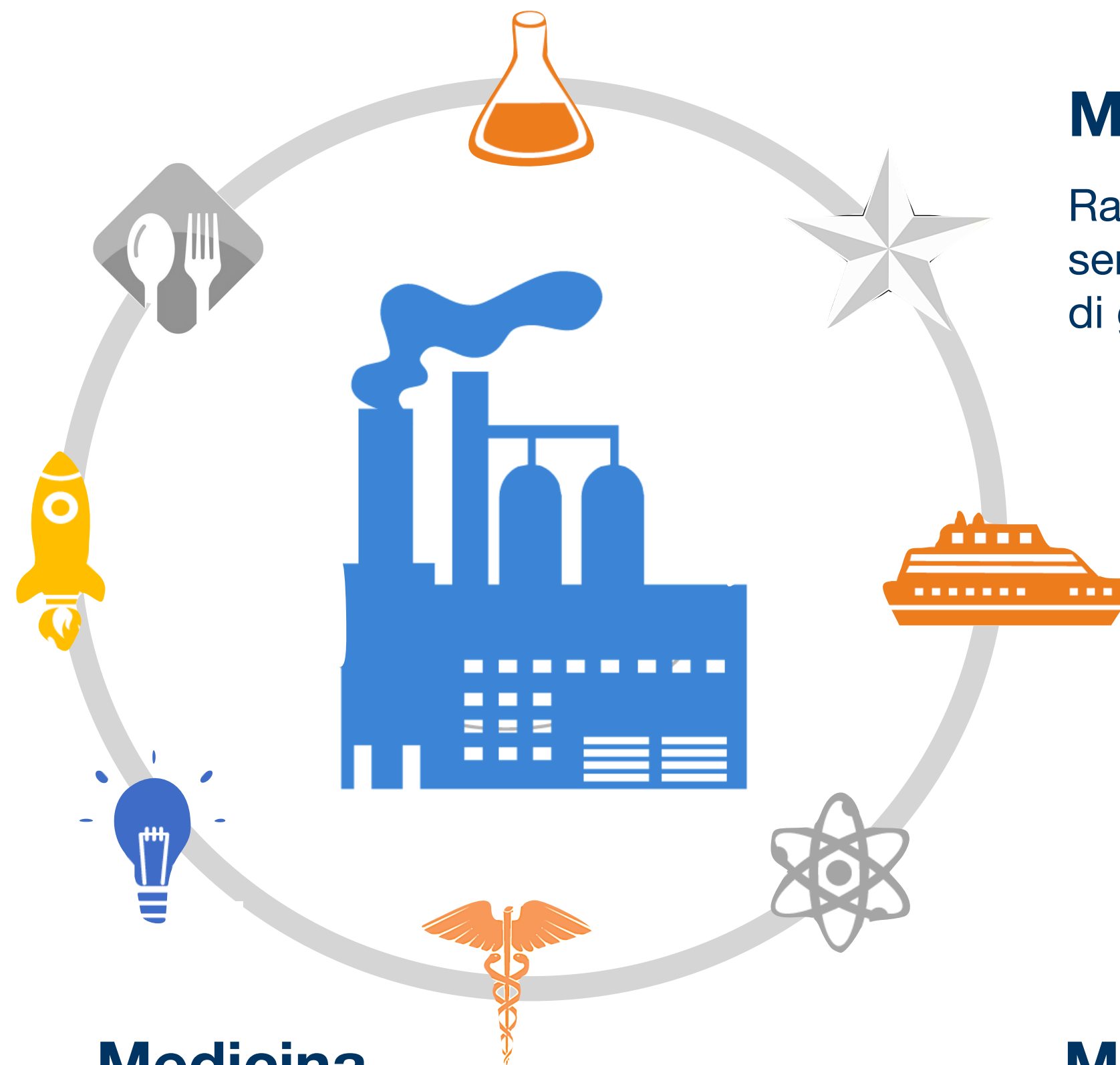


Superconduttività

Alle basse temperature alcuni materiali presentano resistenza elettrica trascurabile. Grazie a tali proprietà, si sono sviluppati nuovi sistemi per la trasmissione elettrica, computer ad alta velocità e migliori sistemi di comunicazione.

Ricerca

Vi sono numerose applicazioni nell'ambito della ricerca fondamentale e della tecnologia ad essa connessa (criostati, criopompe, sensori criogenici, ecc.)



Medicina

Applicazioni che riguardano la chirurgia e diagnostica (TAC). La crio-preservazione di embrioni e gameti, o la conservazioni di tessuti e componenti del sangue.

Militare

Raffreddamento di sensori infrarossi, sistemi di guida di missili, ecc.



Commerciale e trasporti

Liquefazione di gas per trasporto di fluidi criogenici (stoccati in forma liquida a bassa pressione, garantiscono buona densità energetica) e utilizzo come combustibili (es: LNG per veicoli stradali e marittimi, sviluppi per LH2 per azzerare l'emissione di CO2). Produzione di criopompe. Fabbricazione di semiconduttori.

Metallurgia criogenica

Alcuni materiali sono trattati con processi di tempra a bassa temperatura per migliorarne le caratteristiche fisico-tecnologiche



Concetti utili



Calore e lavoro

- **Calore:**

- è un fenomeno fisico dinamico che corrisponde allo **scambio di energia** fra due sistemi posti a contatto termico dovuto ad una differenza di temperatura
- il trasferimento di calore cessa quando tutte le parti del sistema abbiano raggiunto l'equilibrio termico fra di loro e con l'ambiente
- si parla SEMPRE di **trasferimento di calore** tra due corpi e MAI di calore posseduto da un corpo
- non è una funzione di stato
- non è associabile ad una configurazione di equilibrio termodinamico



- **Lavoro termodinamico:**

- è il processo attraverso cui un sistema termodinamico può interagire e **scambiare energia** con l'ambiente circostante
- si traduce in forze macroscopiche misurabili esternamente sull'ambiente circostante, che possono causare **lavoro meccanico** (es. per sollevare un peso o spingere un pistone), oppure causare cambiamenti in altre variabili
- può essere fatto dal sistema sull'ambiente (convenzionalmente segno +), oppure dall'ambiente sul sistema termodinamico (convenzionalmente di segno -)



Tipi di sistemi termodinamici

- Sistema **aperto**: consente un flusso con l'ambiente esterno, sia di massa sia di energia (tramite calore e/o lavoro e/o altra forma di energia), attraverso il suo confine
- Sistema **chiuso**: consente un flusso di energia con l'ambiente esterno, attraverso il suo confine (tramite calore e/o lavoro e/o altra forma di energia), ma non di massa
- Sistema **adiabatico** o **termicamente isolato** quando non scambia calore con l'ambiente
- Sistema **isolato** se non permette un flusso né di energia né di massa con l'ambiente esterno



Tipo di sistema	Flusso di massa	Lavoro	Calore
Aperto	✓	✓	✓
Chiuso	✗	✓	✓
Termicamente isolato	✗	✓	✗
Meccanicamente isolato	✗	✗	✓
Isolato	✗	✗	✗

Energia interna

- Esprime il contenuto energetico di un fluido date le sue condizioni termodinamiche (p, V, T)

$$U = \int T dS - p dV + \cancel{\Sigma_i \mu_i dN_i}$$

$T dS$ ↑ capacità di rilasciare calore
 $- p dV$ ↑ capacità di fare lavoro meccanico
 $\cancel{\Sigma_i \mu_i dN_i}$ ↑ capacità di fare lavoro chimico (per noi = 0)

Entropia

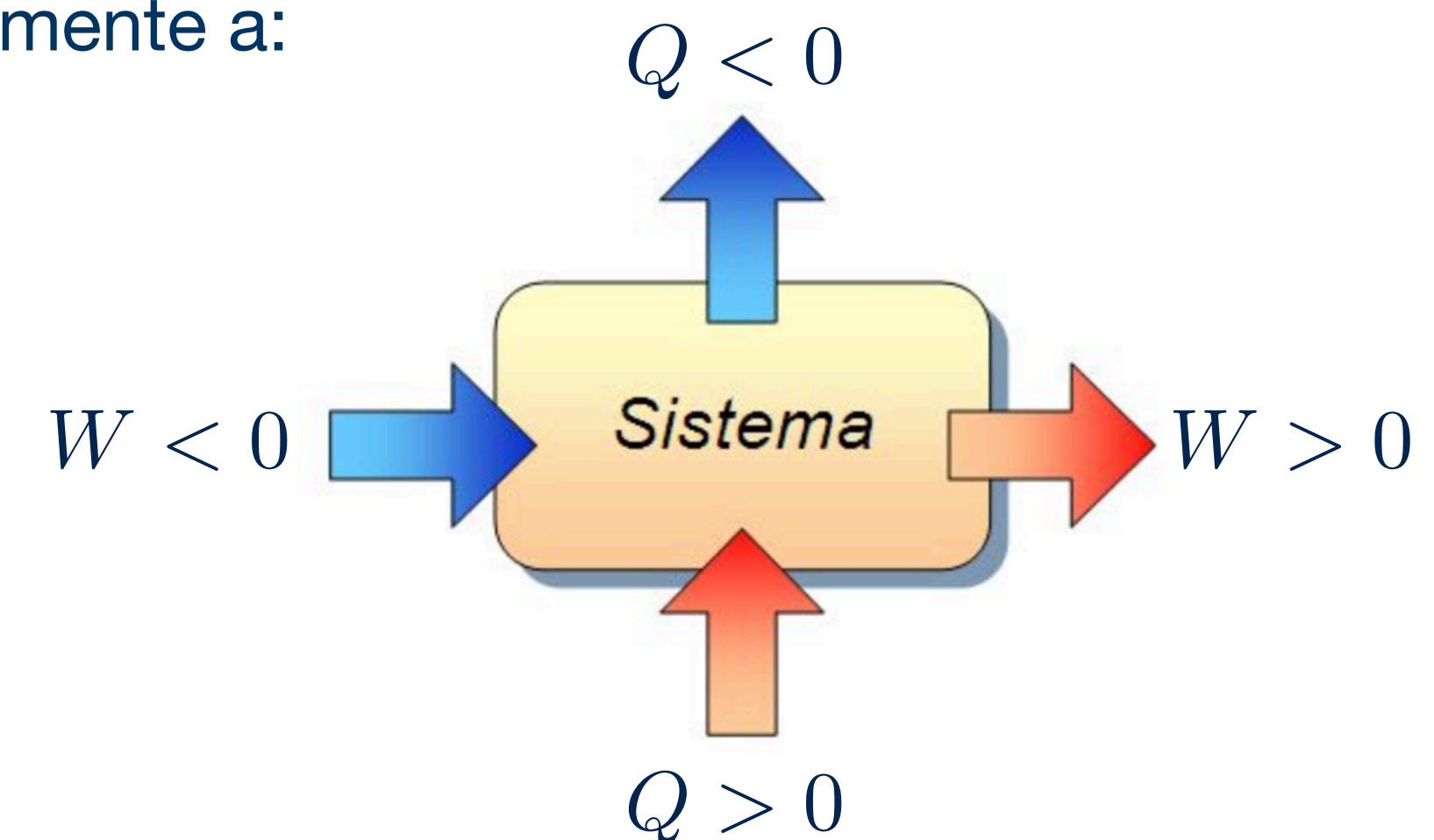
$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- Consideriamo solo sistemi chiusi, senza trasferimenti di massa con il mondo esterno
- Per un sistema chiuso, le variazioni di energia interna ΔU sono dovute esclusivamente a:
 - scambio di calore con il mondo esterno
 - lavoro meccanico fatto dal sistema sul mondo esterno o viceversa

1° principio termodinamica

$$\Delta U = Q - W$$

Q ↑ calore assorbito dal sistema
 W ↑ lavoro svolto dal sistema



Entalpia

- **L'Entalpia H esprime il contenuto energetico di un fluido in una particolare condizione termodinamica:**

$$H = U + pV$$

L'Entalpia è una quantità fondamentale in criogenia (i valori di H sono tabulati spesso in entalpia specifica in J/g o J/mol)

Entalpia

$$dH = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{capacità di} \\ \text{rilasciare calore}}}{TdS} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{capacità di fare} \\ \text{lavoro non-meccanico}}}{Vdp}$$

Energia Interna

$$dU = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{capacità di} \\ \text{rilasciare calore}}}{TdS} - \underset{\substack{\uparrow \\ \text{capacità di fare} \\ \text{lavoro meccanico}}}{pdV}$$

H è particolarmente utile per **calcolare la quantità di calore da rimuovere (aggiungere) per freddare (scaldare) una determinata quantità di massa**

$$H_{300K}^{N_2 gas} = 462.1 \text{ J/g}$$

$$H_{77K}^{N_2 gas} = 228.7 \text{ J/g}$$



$$\Delta H_{300K-77K}^{N_2} = 233.4 \text{ J/g}$$

Raffreddamento con liquidi criogenici (I)

- Il modo più semplice per freddare un campione è **utilizzare il calore latente di evaporazione di un liquido criogenico**, tipicamente accumulato in un serbatoio isolato termicamente (bagno) dall'ambiente esterno ma in contatto termico con il campione da freddare

Gas	Punto ebollizione (K)	Calore latente evaporazione (J/g)
Elio 3	3,19	8,6
Elio 4	4,15	20,7
Idrogeno	20,27	434
Neon	27,09	86
Azoto	77,36	199
Argon	87,3	161
Ossigeno	90,18	213
Metano	111,7	512
Xenon	165,1	96
Etilene	169,4	485



Raffreddamento con liquidi criogenici (II)

- Il modo più semplice per freddare un campione è **utilizzare il calore latente di evaporazione di un liquido criogenico**, tipicamente accumulato in un serbatoio isolato termicamente (bagno) dall'ambiente esterno ma in contatto termico con il campione da freddare

Quanta energia serve rimuovere dall'azoto per liquefarlo?

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

Quanta energia serve rimuovere dall'alluminio per freddarlo da 300 K a 77 K?

$$\begin{array}{ll}
 H_{300K}^{Al} = 170.4 \text{ J/g} & \longrightarrow \Delta H_{300K-77K}^{Al} = 162 \text{ J/g} \\
 H_{77K}^{Al} = 8.4 \text{ J/g} &
 \end{array}$$



Quanti litri di LN2 servono per freddare
 un kg di alluminio da 300 K a 77 K?
 (1 litro LN2 = 0,8086 kg)

Raffreddamento con liquidi criogenici (II)

- Il modo più semplice per freddare un campione è **utilizzare il calore latente di evaporazione di un liquido criogenico**, tipicamente accumulato in un serbatoio isolato termicamente (bagno) dall'ambiente esterno ma in contatto termico con il campione da freddare

Quanta energia serve rimuovere dall'azoto per liquefarlo?

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

Quanta energia serve rimuovere dall'alluminio per freddarlo da 300 K a 77 K?

$$\begin{array}{ll}
 H_{300K}^{Al} = 170.4 \text{ J/g} & \longrightarrow \Delta H_{300K-77K}^{Al} = 162 \text{ J/g} \\
 H_{77K}^{Al} = 8.4 \text{ J/g} &
 \end{array}$$



**Quanti litri di LN2 servono per freddare
 un kg di alluminio da 300 K a 77 K?
 (1 litro LN2 = 0,8086 kg)**

- 1.01 litri usando solo il calore latente di evaporazione
- 0.46 litri usando anche l'entalpia fino a 300 K

Raffreddamento con liquidi criogenici (III)

Quantità di liquidi criogenici necessari per raffreddare i metalli più comuni (litri/kg)
usando solo il calore latente di evaporazione

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	0.46	0.22	1.61
	Copper	0.29	0.15	0.79
	Stainless Steel	0.33	0.11	0.79

- Per arrivare a 4 K, un trasferimento veloce di liquido è altamente inefficiente (specialmente per LHe)
- E' preferibile un raffreddamento in due fasi, prima con LN2 fino a 77K e poi con LHe



Criorefrigeratori



Criorefrigeratori vs criogeni

- Un'alternativa al raffreddamento con bagni di liquidi criogenici sono i criorefrigeratori
- Un criorefrigeratore è una macchina in grado di fornire un raffreddamento attivo fino a temperature criogeniche (< 150 K)
- Principali vantaggi e svantaggi dell'uso di criorefrigeratori rispetto ai liquidi criogenici (criogeni):

PRO

- Affidabilità
- Sicurezza
- Semplicità di operazione
- Minor costo di gestione
- Alto duty cycle

CONTRO

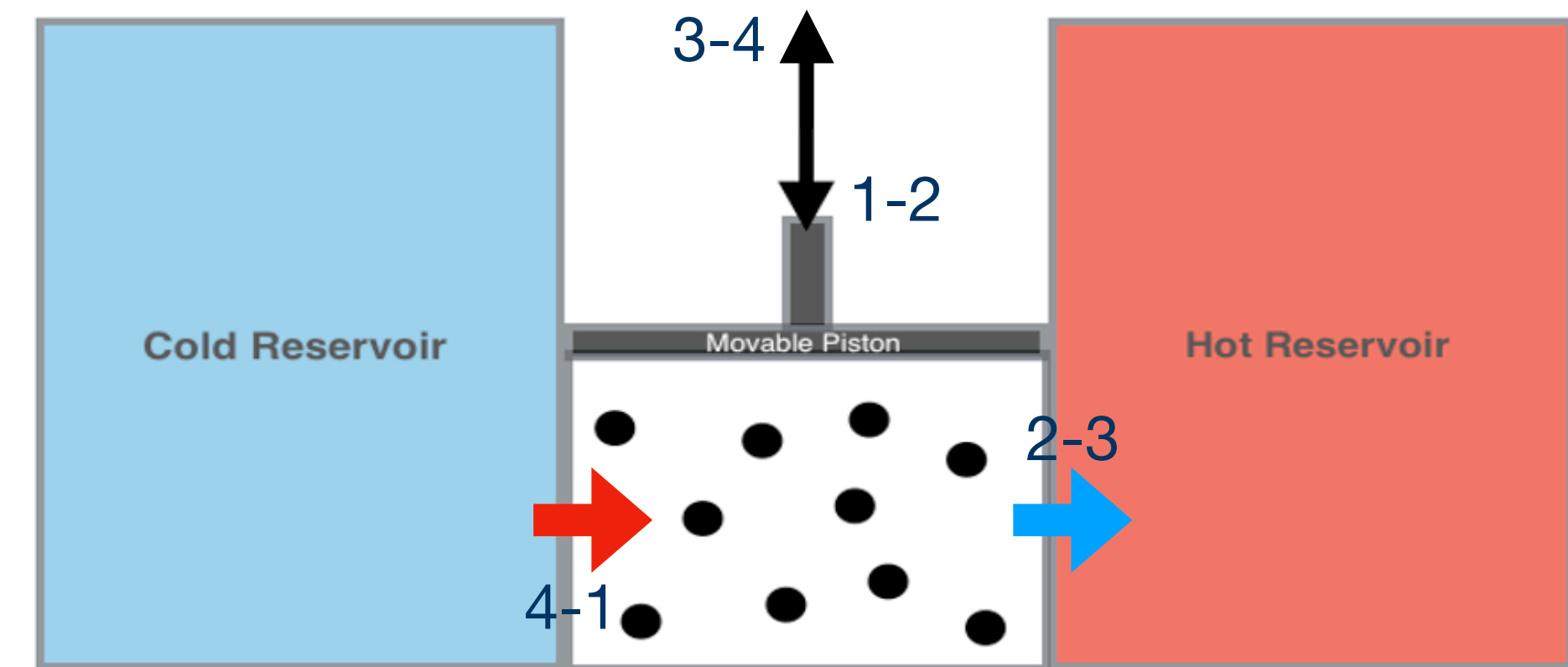
- Efficienza
- Vibrazioni
- Interferenze elettromagnetiche
- Rimozione del calore
- Alto costo di acquisto
- Dimensione e massa

Il ciclo di Carnot (inverso)

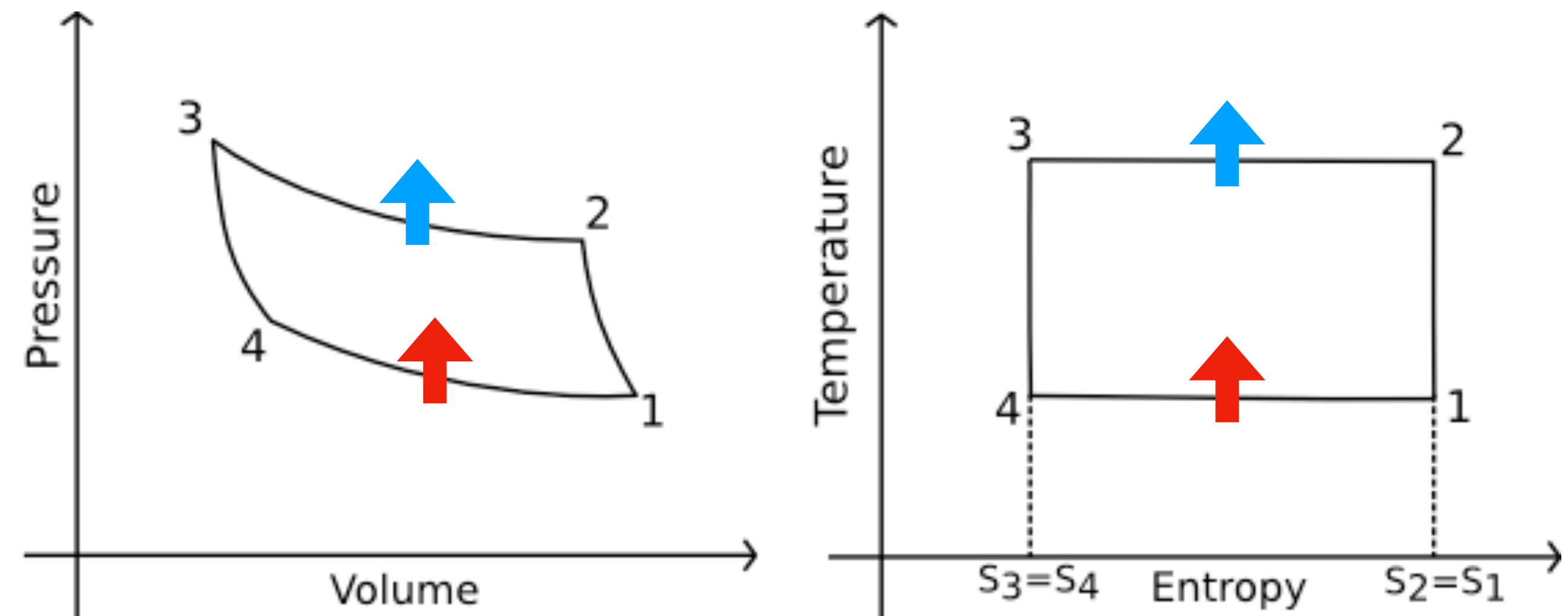
Il ciclo di Carnot (inverso): ciclo termodinamico ideale con la massima efficienza possibile (tutto il lavoro fornito è trasformato in rimozione di calore):

- 1-2 compressione isentropica:
il gas è isolato e compresso adiabaticamente dal pistone, si scalda
- 2-3 espansione isoterma:
il gas è messo in contatto con l'ambiente esterno (hot reservoir) ed è lasciato libero di cedergli il proprio calore e comprimersi
- 3-4 espansione isentropica:
il gas è isolato e espanso adiabaticamente dal pistone, si raffredda
- 4-1 compressione isoterma:
Il gas è messo in contatto con il campione (cold reservoir) ed è lasciato libero di assorbirne il calore ed espandersi

Schematico del ciclo di Carnot inverso



Diagrammi pV e TS del ciclo di Carnot inverso



Coefficiente di performance

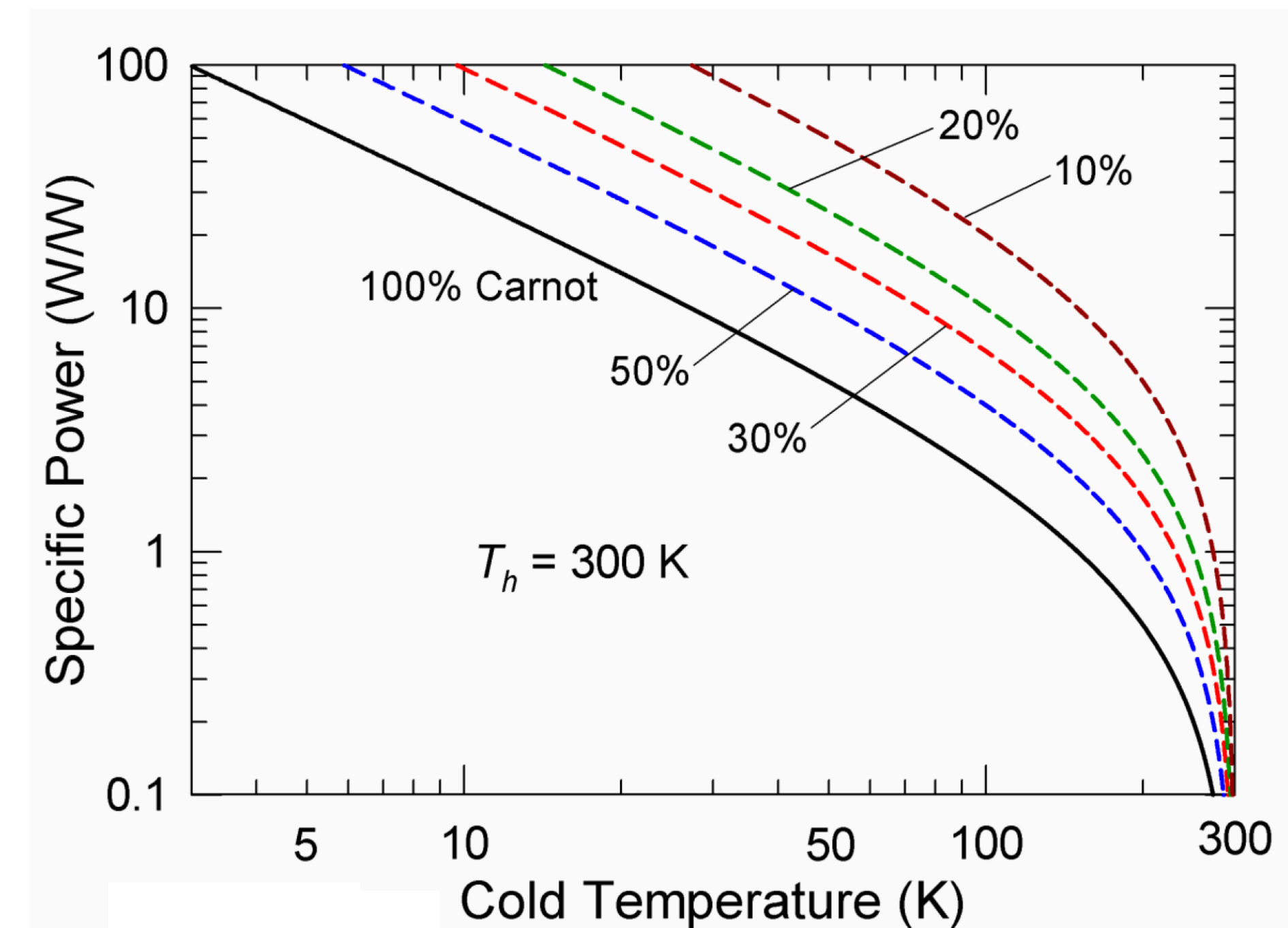
- Il rapporto tra il potere frigorifero generato e la potenza in ingresso necessaria per farlo funzionare si chiama **coefficiente di performance (COP)**. Il suo reciproco è chiamato *Specific Power*.
- Sono entrambi riferiti a processi di refrigerazione reversibili in cui il COP è dato dal valore di Carnot

$$COP_{Carnot} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_{0,ideal}} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

dove $\dot{W}_{0,ideal}$ è la potenza in ingresso per un sistema ideale, reversibile e T_h e T_c sono le temperature a caldo (hot) e freddo (cold)

- Il COP effettivo di un criorefrigeratore reale si può esprimere come percentuale del COP di un ciclo di Carnot (**second law efficiency**)
- Oggi si arriva a efficienze dal 15 al 25% di Carnot a 80 K
- A 4 K le efficienze vanno da meno dell'1% di Carnot per piccoli criorefrigeratori (< 2 W), fino anche a ~35 % of Carnot per grandi impianti di refrigerazione/liquefazione

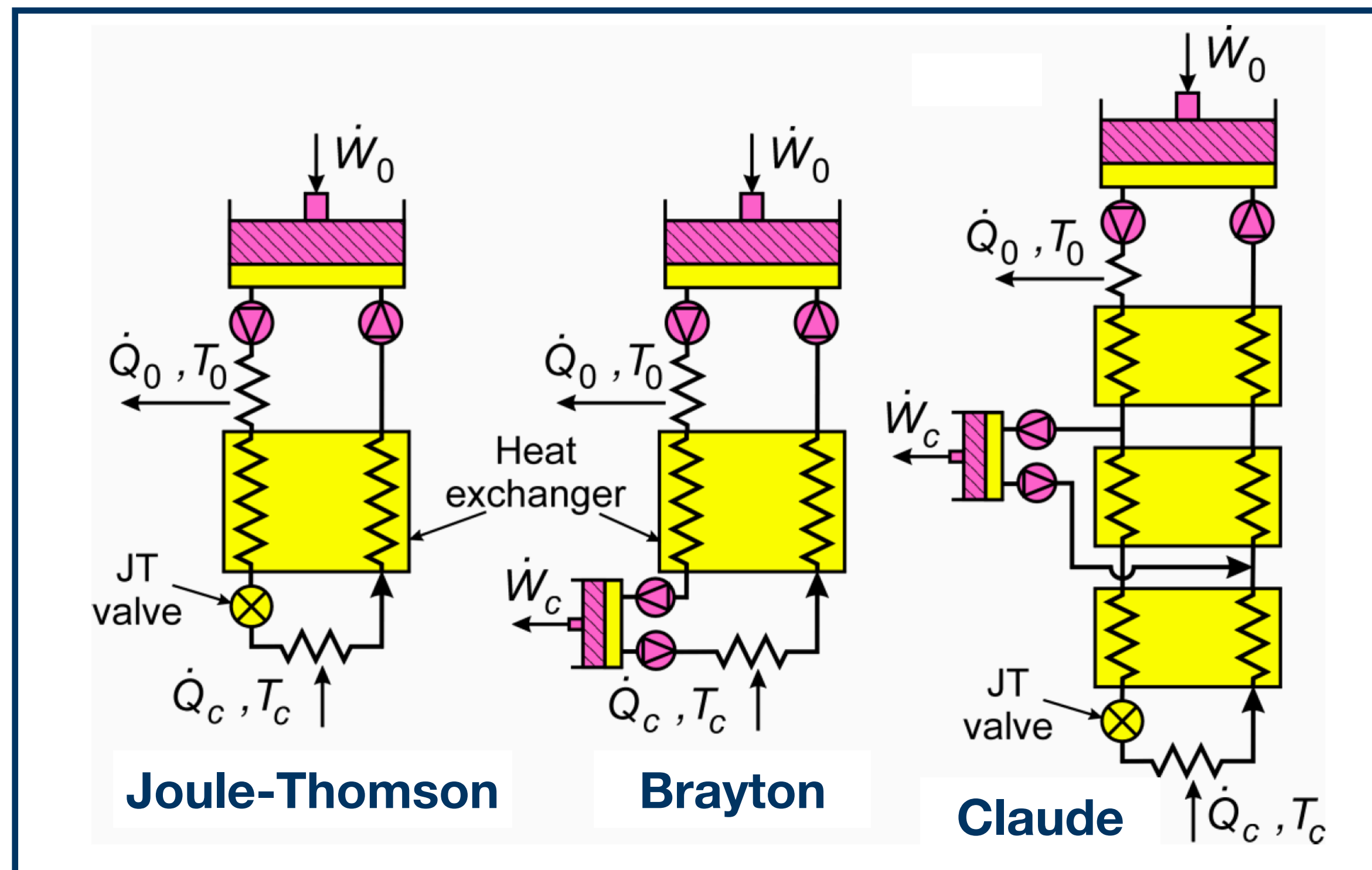
Andamento dello *Specific Power* in funzione della temperatura dello stadio freddo per diverse *Second-law efficiencies* dei criorefrigeratori



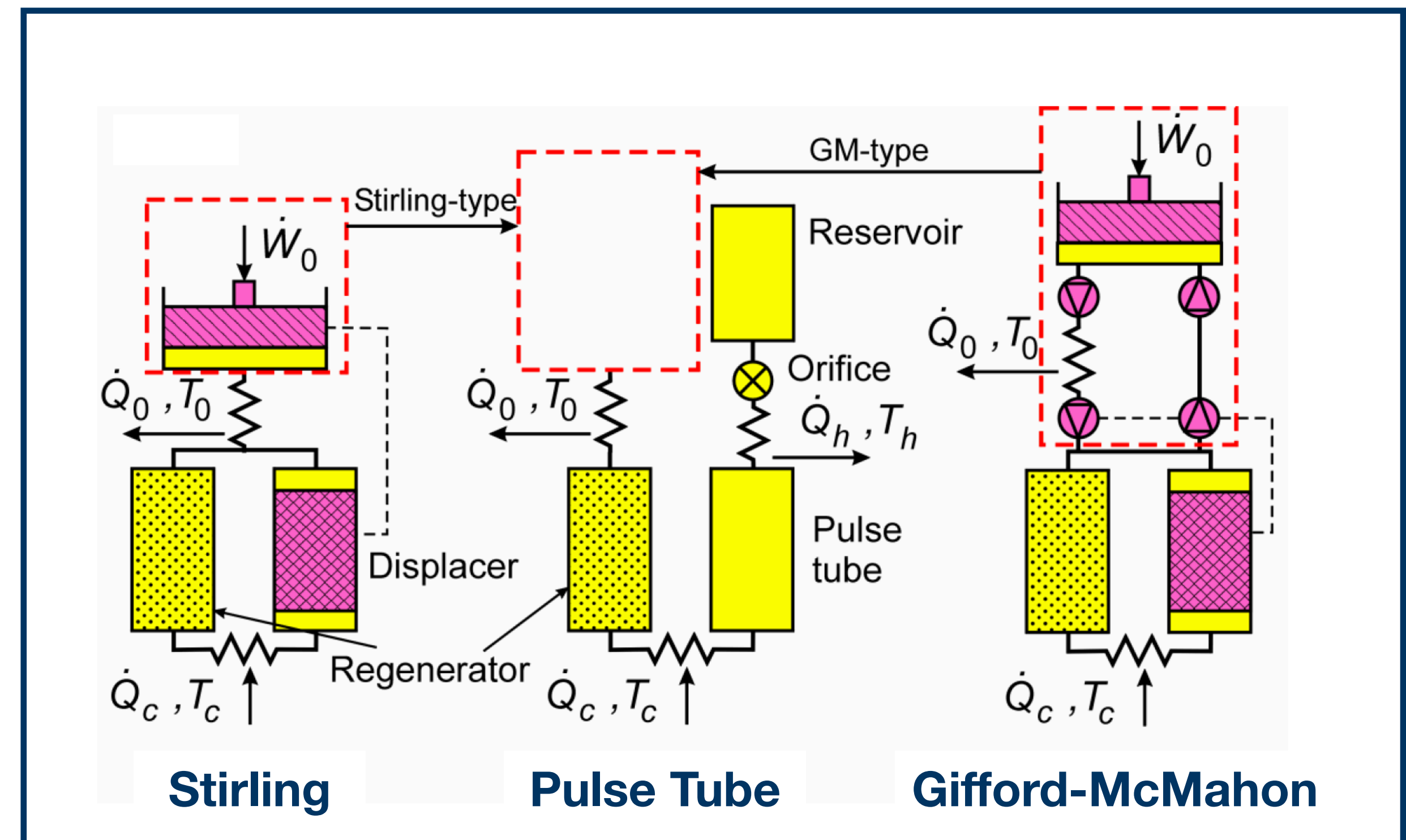
Tipi di criorefrigeratori

- Un'alternativa al raffreddamento con bagni di liquidi criogenici sono i criorefrigeratori
- Un criorefrigeratore è una macchina in grado di fornire un raffreddamento attivo fino a temperature criogeniche < 150 K
- Si possono usare differenti tipi di cicli termodinamici per produrre un potere frigorifero:

Cicli recuperativi più comuni



Cicli rigenerativi più comuni





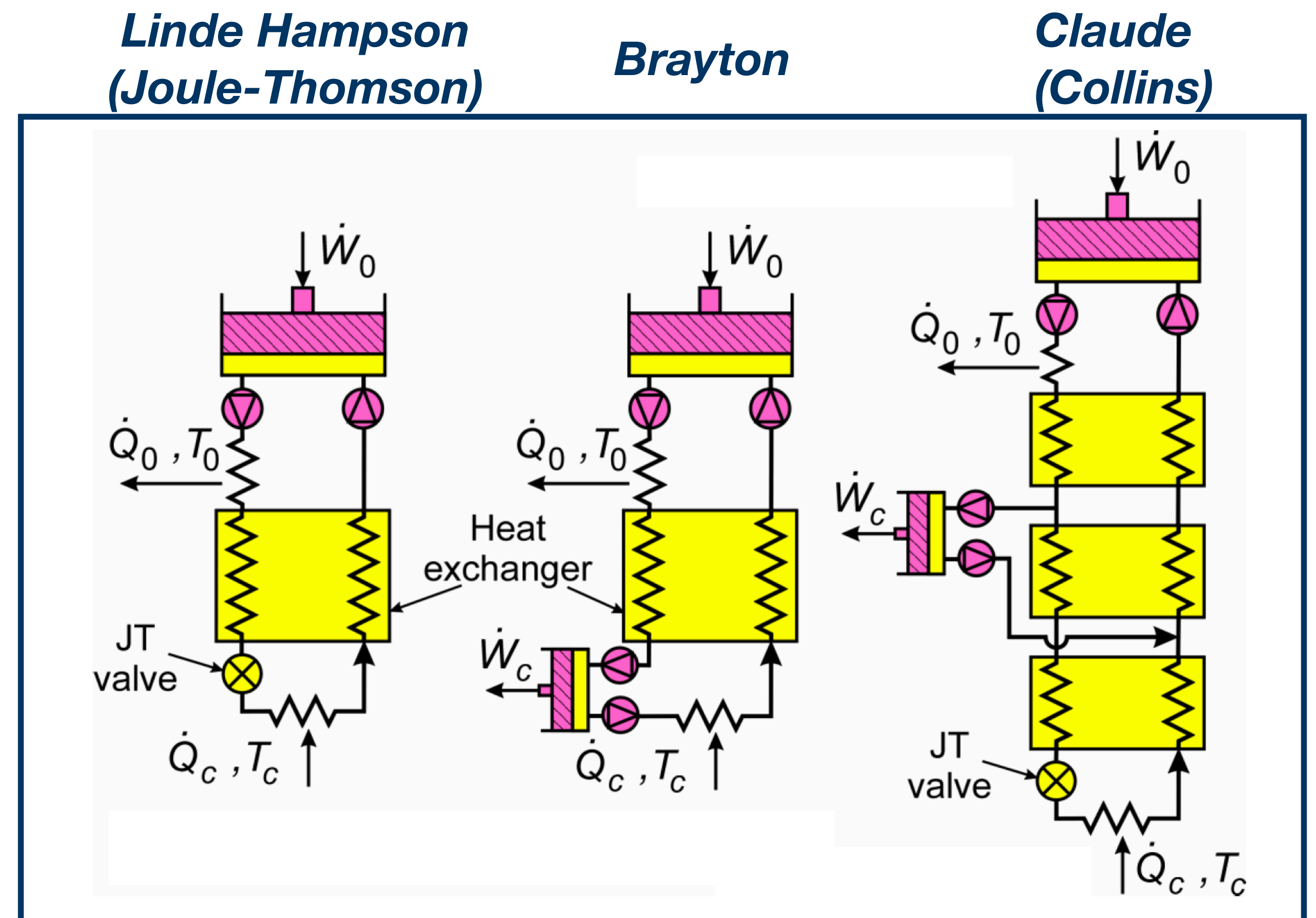
Cicli recuperativi



Crio-refrigeratori recuperativi

- Flusso di massa del fluido di lavoro costante ed in una sola direzione (analogo a sistemi elettrici DC)
- Linee di alta e bassa pressione indipendenti
- Basati sul recupero dell'entalpia del fluido tramite **scambiatori di calore recuperativi in controflusso**
 - trasferimento del calore dal flusso in ingresso al flusso in uscita (più freddo)
 - alta efficienza necessaria, possono essere molto costosi
 - calore scambiato durante 2 trasformazioni isobare (ceduto all'aftercooler durante raffreddamento isobaro, assorbito dal sample durante riscaldamento isobaro)
- Generalmente usati per liquefazione di gas e produzione di liquidi criogenici

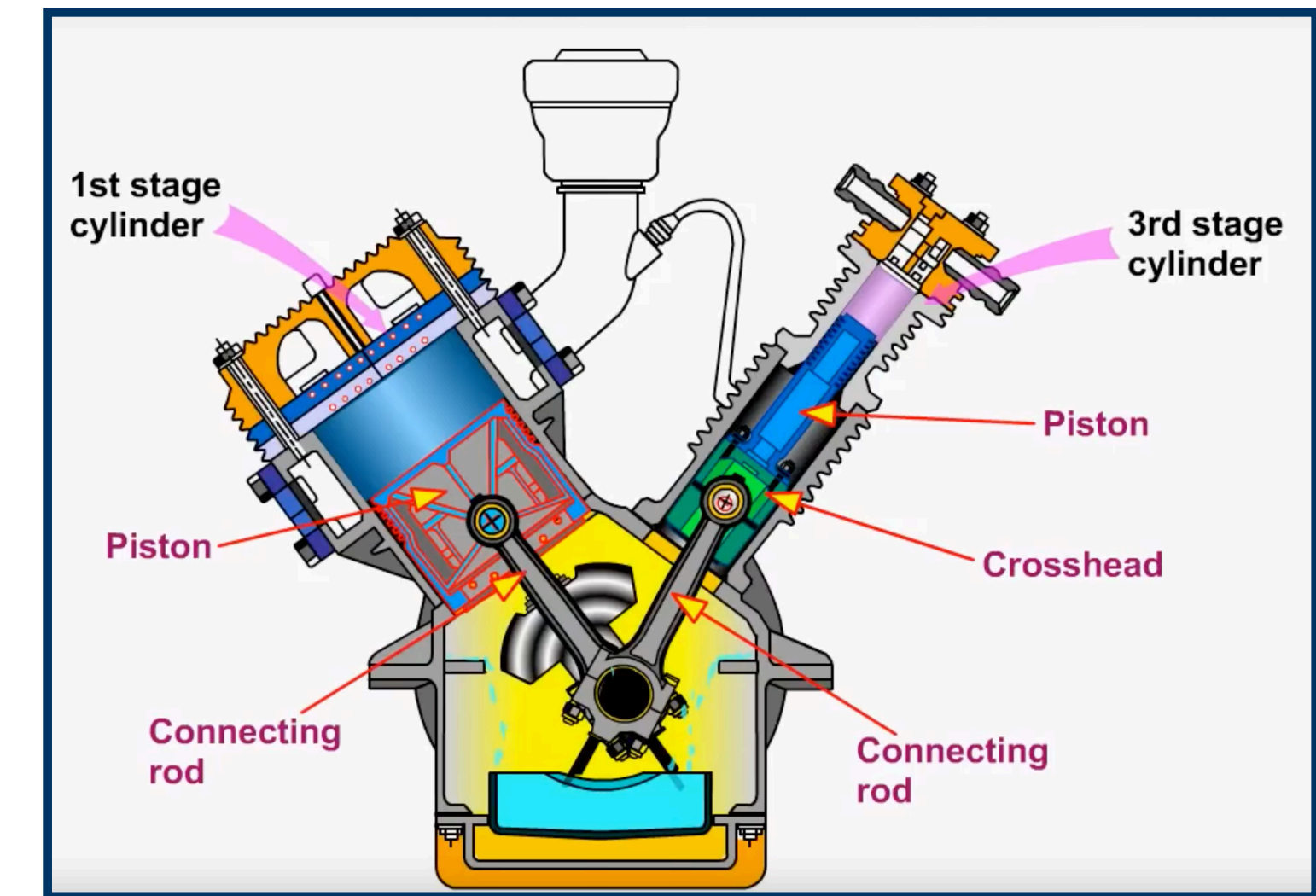
Principali cicli recuperativi



Crio-refrigeratori recuperativi

- si possono usare grandi volumi di gas (grandi portate) in qualsiasi punto del sistema senza particolari controindicazioni
- è possibile "trasportare il freddo" verso un numero qualsiasi di posti lontani dopo che il gas è stato espanso e raffreddato
- la testa fredda può essere molto lontana dal compressore:
 - enorme riduzione delle interferenze elettromagnetiche (EMI)
 - riduzione delle vibrazioni dovute al compressore
- Flusso e pressione costanti garantiti da compressori:
 - alternativi (es: a pistone) con l'ausilio di check valves in ingresso e uscita per mantenere un flusso stazionario
 - centrifughi o rotativi (es: a vite) senza bisogno di valvole
- Compressori lubrificati ad olio per garantire lunga durata:
 - filtri per la rimozione dell'olio si possono incorporare nei compressori appena dopo outlet ad alta pressione
 - rimozione totale dell'olio, in modo da evitare che si ghiacci negli scambiatori e tappi il sistema

Compressore a pistone

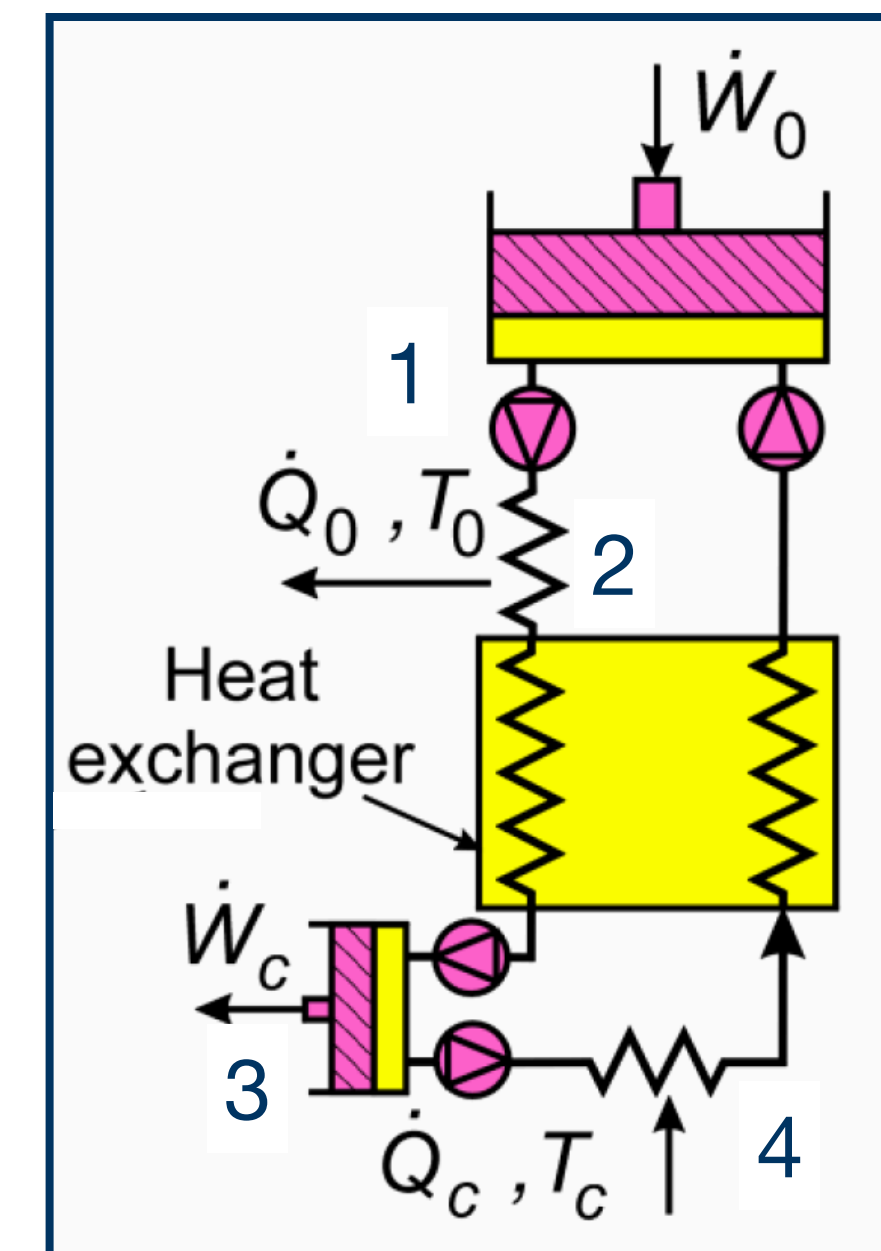
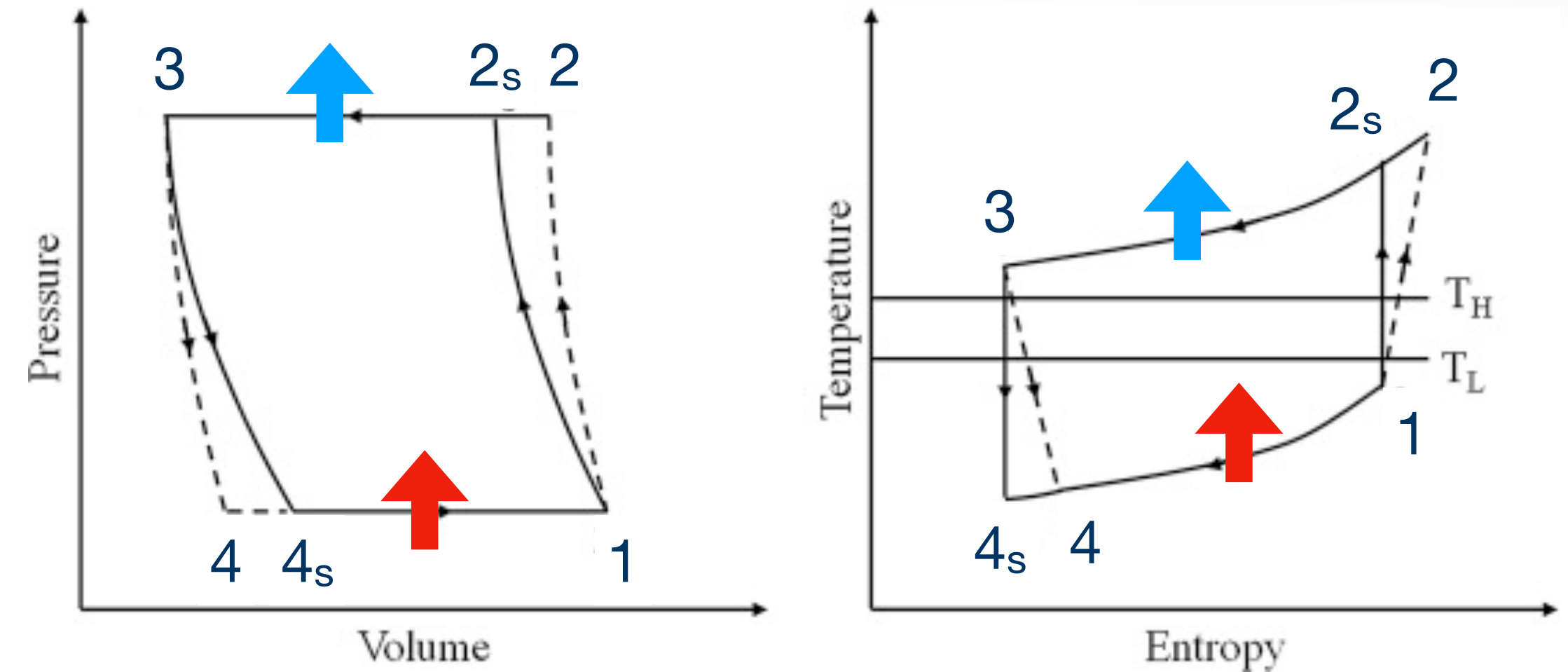


Compressore a vite



Ciclo reversed Brayton

- Nei refrigeratori Brayton il raffreddamento avviene perché il gas si espande e fa lavoro contro un pistone
- Se al posto del pistone abbiamo una turbina, parliamo di turbo-Brayton (affidabilità e costo più alti)
- Più efficiente del JT, non ha bisogno di un'alta differenza di pressione
- Basati sul ciclo reversed-Brayton:
 - 1-2 compressione adiabatica, idealmente isoentropica: il gas viene compresso dal compressore, aumenta la pressione e la temperatura
 - 2-3 raffreddamento isobaro: il gas cede calore all'ambiente (o ad un aftercooler) tramite uno scambiatore
 - 3-4 espansione adiabatica, idealmente isoentropica: espansione procurata dal pistone o dalla turbina, il gas si raffredda
 - 4-1 riscaldamento isobaro: il gas assorbe calore dal sample e si riscalda



Ciclo reversed Brayton: pro e cons

- Un vantaggio del criorefrigeratore Brayton è la **bassissima vibrazione** associata alle parti rotanti in un sistema con turboespansori e compressori centrifughi.
- Il motore di espansione conferisce al ciclo Brayton un'**elevata efficienza** in un ampio intervallo di temperature, sebbene l'efficienza non sia così elevata come quella di alcuni criorefrigeratori Stirling e a Pulse Tube a temperature superiori a circa 50 K.
- I criorefrigeratori Brayton si possono **miniaturizzare**, la sfida è la fabbricazione di mini turbo-espansori miniaturizzati che mantengano un'elevata efficienza di espansione
- Il funzionamento a bassa pressione dei sistemi Brayton in miniatura richiede scambiatori di calore relativamente grandi e costosi. Anche le turbine di espansione sono costose da fabbricare (soprattutto nelle dimensioni molto piccole o molto grandi).
- La presenza di una fase liquida in un motore ad espansione può danneggiare il motore, quindi il ciclo Brayton veniva utilizzato per la liquefazione dei gas solo con particolari accorgimenti

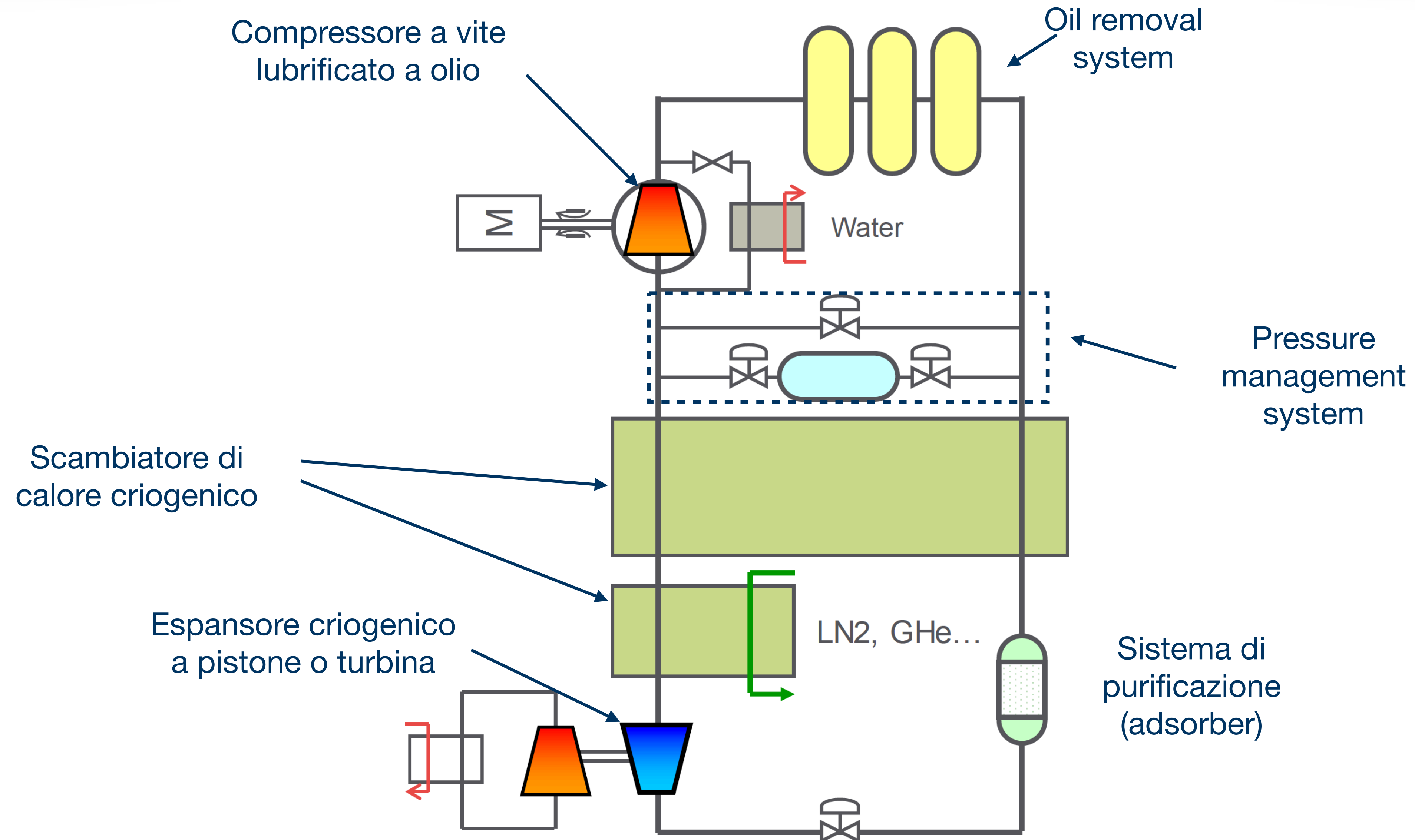
PRO

- Basso livello vibrazioni
- Alta efficienza
- Bassa pressione di operazione
- Basso livello di manutenzione
- Miniaturizzabili

CONTRO

- Alto costo per scambiatori di calore e turbine di espansione
- E' una sfida miniaturizzarli, altrimenti hanno grosse dimensione e massa

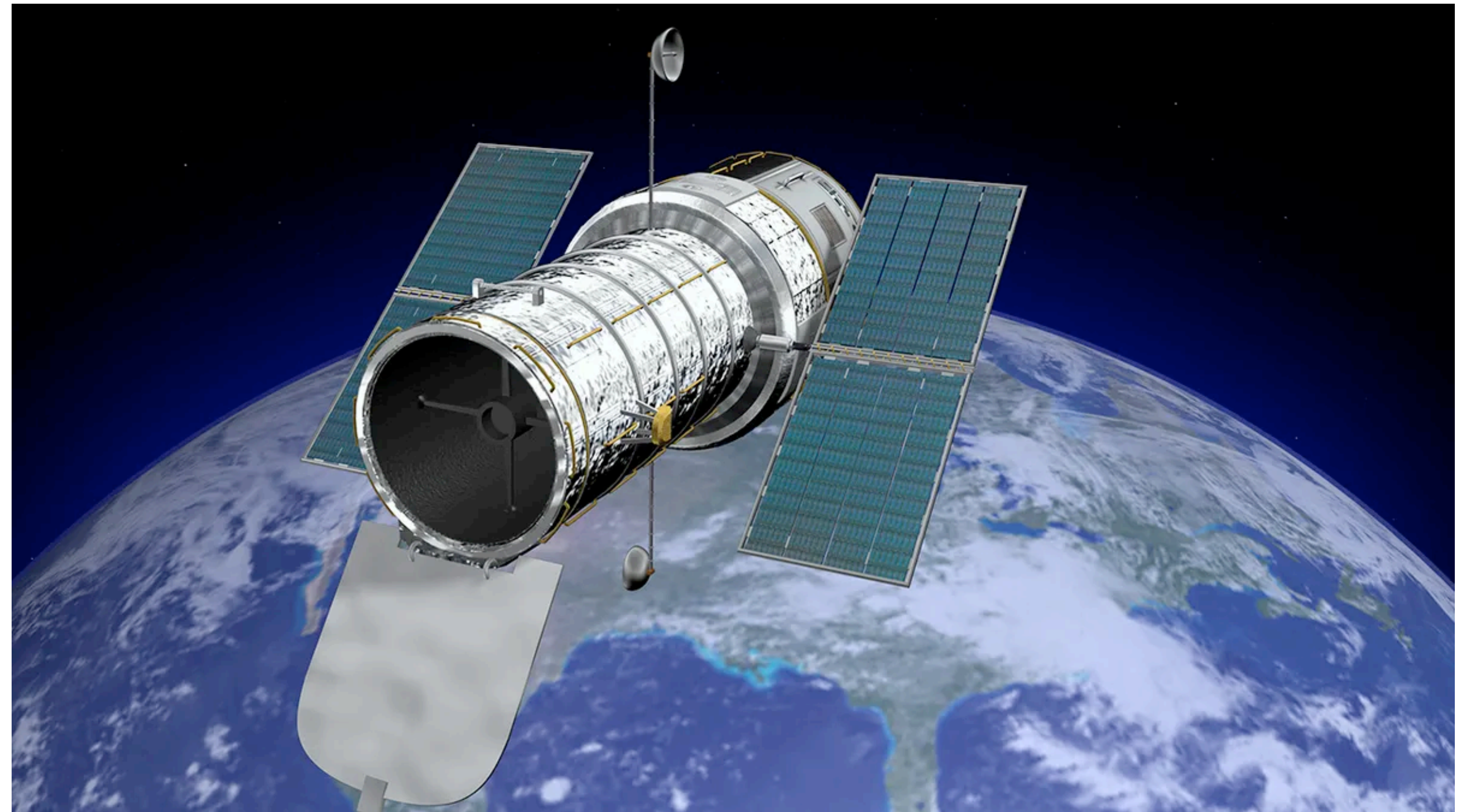
Refrigeratore Brayton classico



Es: piccoli refrigeratori Brayton

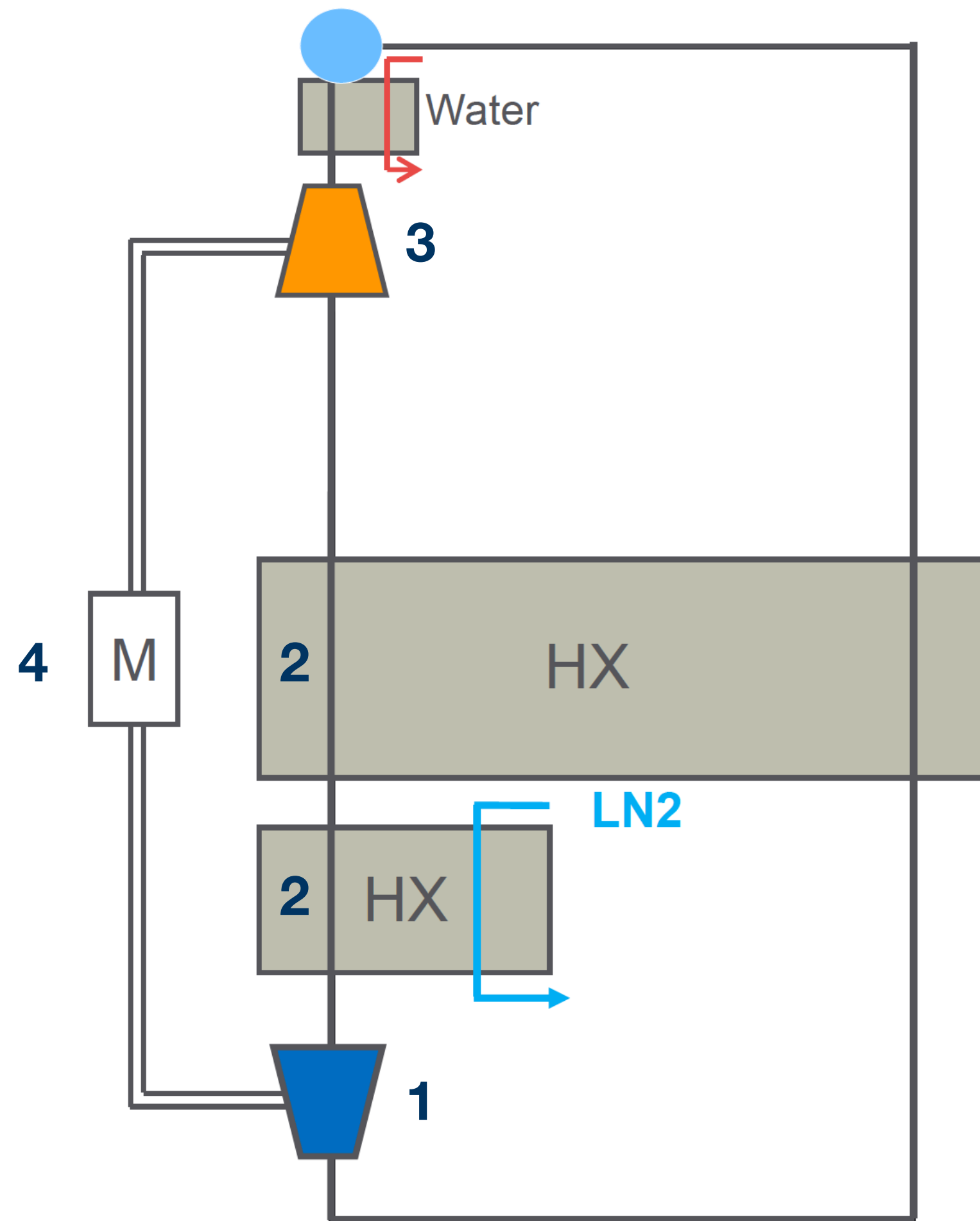
- Turbine con diametri di pochi 6 mm su alberi motore di diametro ancora inferiore che girano da 2000 a 5000 giri/s sono tipici i sistemi per l'uso in liquefattori e in applicazioni spaziali (es. raffreddamento di sensori a infrarossi). Con questi sistemi vengono utilizzati compressori centrifughi o rotativi che forniscono un rapporto di compressione di circa 1,6 con bassa pressione di 1 bar
- Un sistema simile utilizzato sul telescopio spaziale Hubble fornisce 8 W di raffreddamento a 70 K con un'efficienza dell'8% di Carnot

Telescopio spaziale Hubble



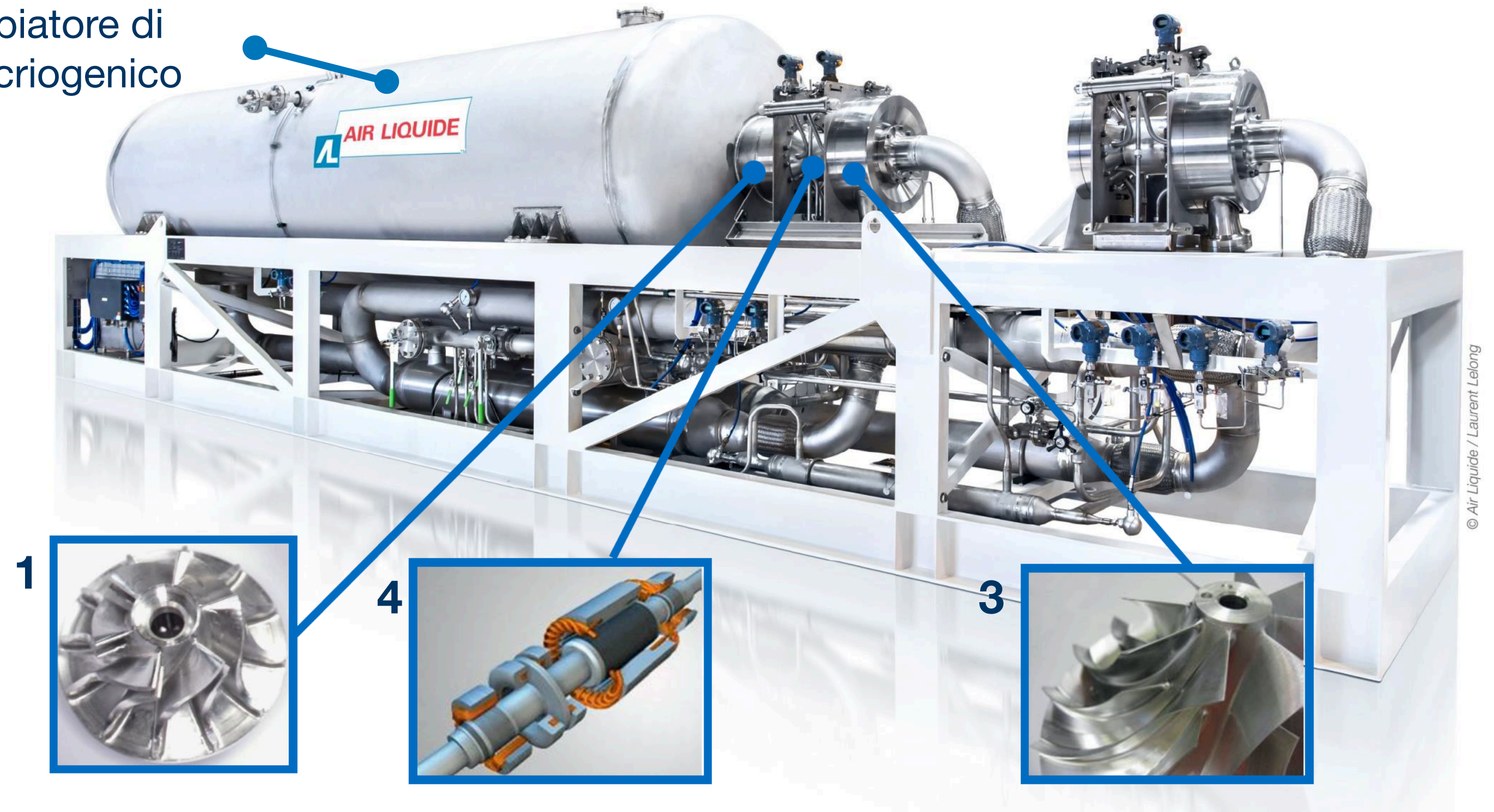
Es: turbo-Brayton by AirLiquide

- 40 kW @ 68 K
- Modulare tra 35 K e 150 K
- High efficiency COP > 40% Carnot



Riliquefattore (LN2, LNG): modello TBF-350 (350 kg/h N2)

2 Scambiatore di calore criogenico



Espansore criogenico con turbina a levitazione magnetica

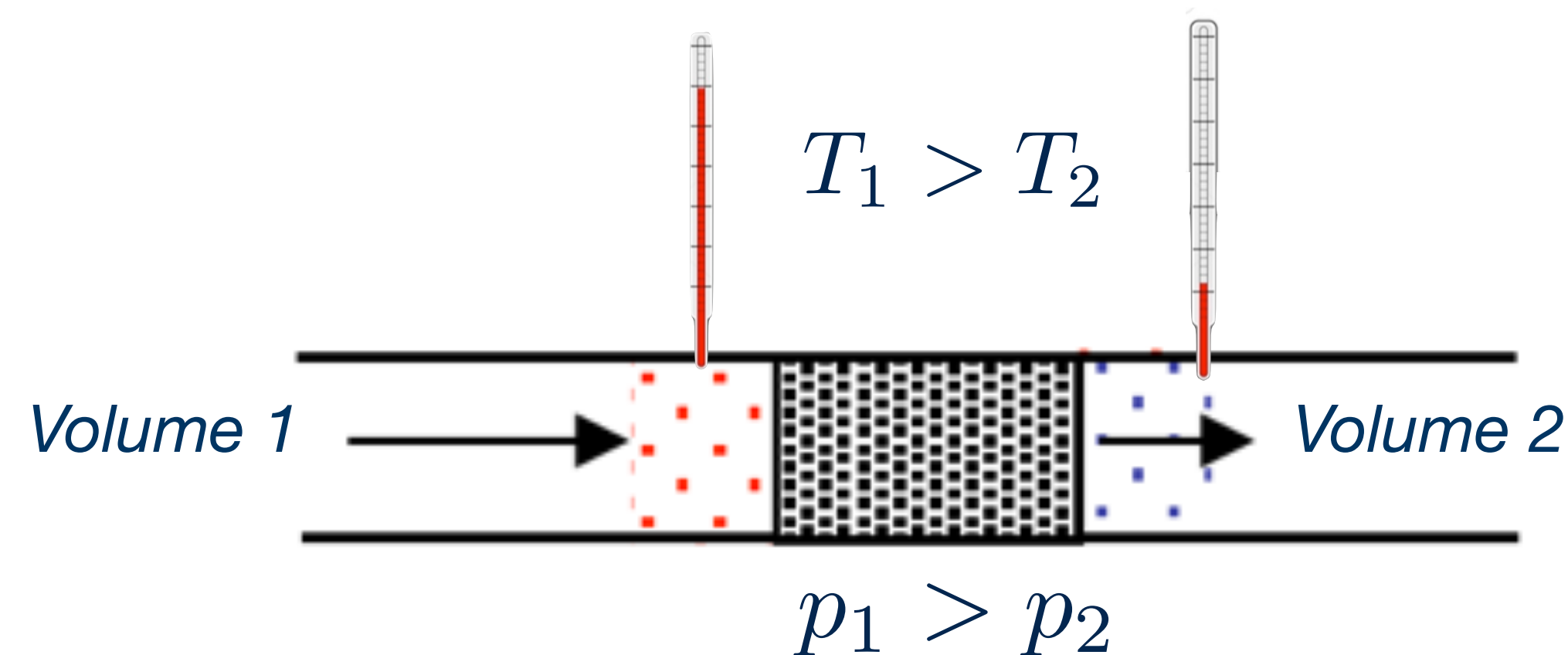
Albero motore condiviso tra turbina e compressore con contactless oil-free technology

Dry centrifugal compressor a levitazione magnetica

~ 10 metri!

Effetto Joule-Thomson (JT)

- Il JT è un processo passivo che si ottiene lasciando espandere il fluido di lavoro attraverso un orifizio, un valvola semi chiusa o un setto poroso (**valvola JT**), termicamente isolati dal mondo esterno (trasformazione adiabatica)
- Osservato per la prima volta nel 1885 da Joule e Thomson (Lord Kelvin), **un gas che passa attraverso una valvola semichiusa subisce una diminuzione della pressione e della temperatura**

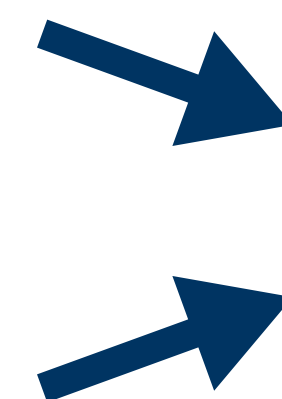


- Trasformazione adiabatica ($Q = 0$)

$$Q = 0 \rightarrow \Delta U = W$$

- Il lavoro totale W è invece:

$$W = W_1 - W_2 = p_1 V_1 - p_2 V_2$$



$$\Delta U = p_1 V_1 - p_2 V_2$$

$$\Delta U = U_2 - U_1$$



$$\underbrace{U_2 + p_2 V_2}_{H_2} = \underbrace{U_1 + p_1 V_1}_{H_1}$$

***L'espansione Joule-Thomson
è un processo isentalpico***

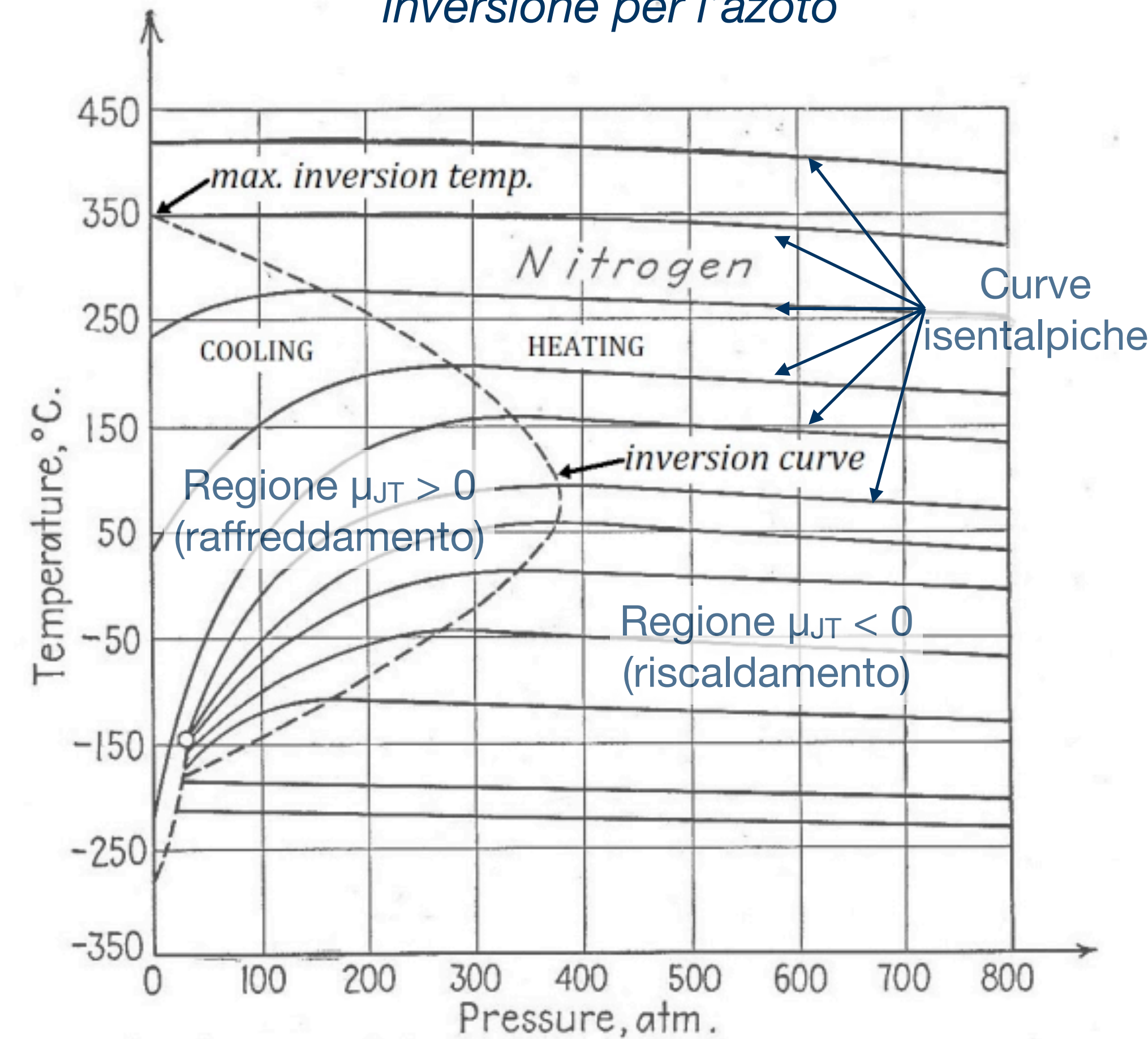
Effetto Joule-Thomson (JT)

- **L'espansione JT è una trasformazione isentalpica**, ovvero nella quale l'entalpia prima e dopo il processo resta costante
- Il processo si descrive con il **coefficiente JT: μ_{JT}** (derivata della temperatura rispetto alla pressione lungo una curva isoentalpica)

$$\mu_{JT} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} = \left(\frac{\delta T}{\delta p} \right)_H$$

- Se $\mu_{JT} < 0$, l'effetto di un'espansione isoentalpica è il riscaldamento del gas
 - sopra la temperatura di inversione T_i , $T > T_i \rightarrow \mu_{JT} < 0$
tutte le espansioni isoentalpiche portano ad un riscaldamento
 - T_i dipende dalla pressione e dal tipo di gas (H: $T_i \sim 200$ K, ^4He : $T_i \sim 40$ K)
- Se $\mu_{JT} > 0$, l'effetto di un'espansione isoentalpica è il raffreddamento del gas

Curve isentalpiche e curva di inversione per l'azoto



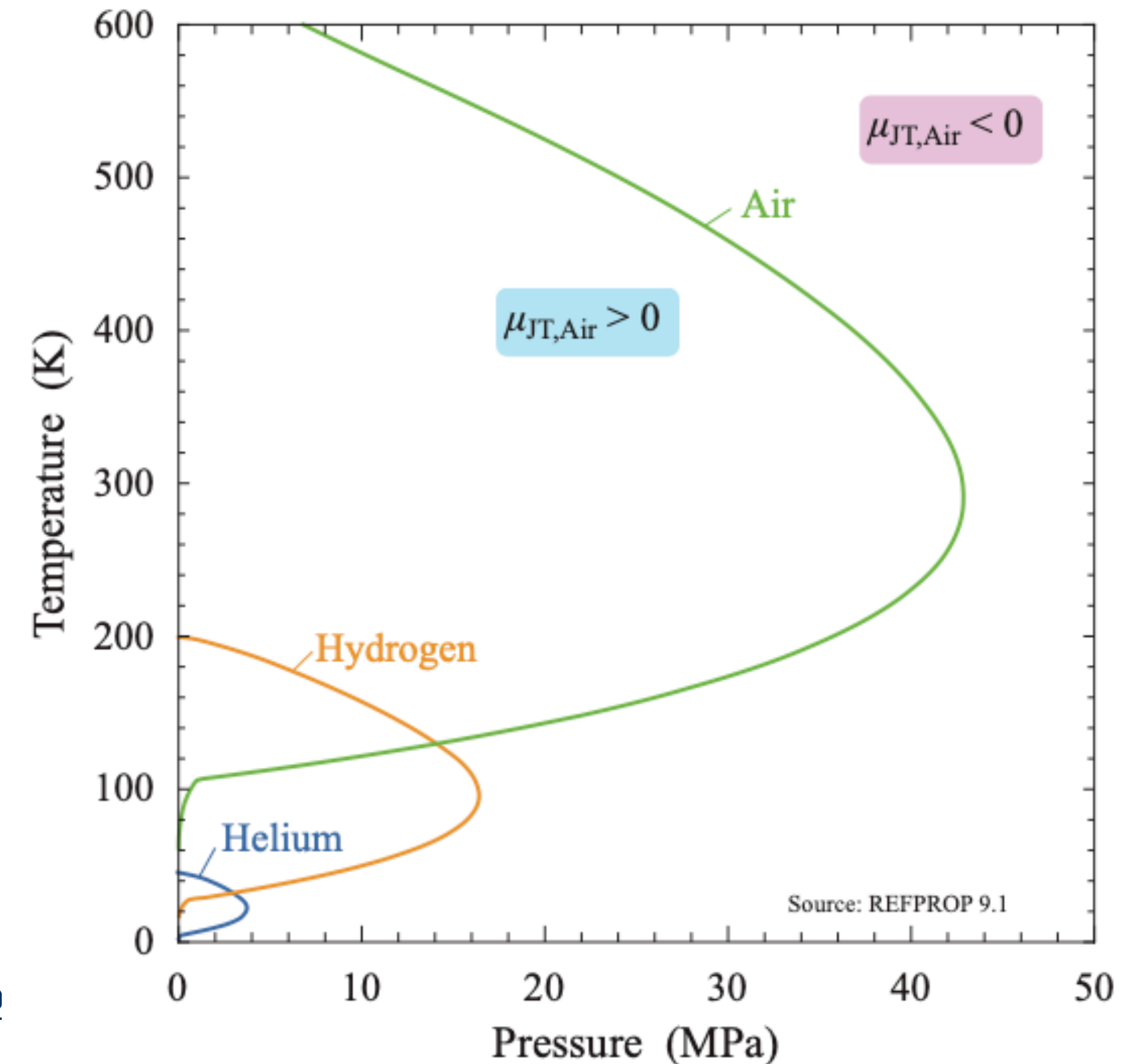
Effetto Joule-Thomson (JT)

- **L'espansione JT è una trasformazione isentalpica**, ovvero nella quale l'entalpia prima e dopo il processo resta costante
- Il processo si descrive con il **coefficiente JT: μ_{JT}** (derivata della temperatura rispetto alla pressione lungo una curva isoentalpica)

$$\mu_{JT} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} = \left(\frac{\delta T}{\delta p} \right)_H$$

- Se $\mu_{JT} < 0$, l'effetto di un'espansione isoentalpica è il riscaldamento del gas
 - sopra la temperatura di inversione T_i , $T > T_i \rightarrow \mu_{JT} < 0$
tutte le espansioni isoentalpiche portano ad un riscaldamento
 - T_i dipende dalla pressione e dal tipo di gas (H: $T_i \sim 200$ K, ^4He : $T_i \sim 40$ K)
- Se $\mu_{JT} > 0$, l'effetto di un'espansione isoentalpica è il raffreddamento del gas

Curve di inversione per aria, idrogeno e elio



Interpretazione dell'effetto JT

- Rimaneggiando il coefficiente JT a entalpia costante si ottiene:

$$\mu_{JT} = \frac{T(\delta V / \delta T)_p - V}{C_p}$$

Per gas ideali

$$pV = nRT \quad \rightarrow \quad \mu_{JT} = 0$$

**Per i gas reali l'effetto JT non è possibile
(non si produce alcun riscaldamento/raffreddamento)**

Per gas reali

$$V = nRT/p + (b - a/RT) \quad \rightarrow \quad \mu_{JT} \neq 0$$

L'effetto di riscaldamento o raffreddamento è possibile solo grazie alle forze di Van der Waals:

- quando il gas è freddo, le forze attrattive (a) dominano, quindi un'espansione lavora contro di esse e il gas si raffredda
- quando il gas è caldo, le forze repulsive (b) dominano, quindi un'espansione lavora a loro favore e il gas si scalda

- Tutti i gas**, anche quelli ideali, **si comportano come gas reali a temperature sufficientemente basse**, ovvero al di sotto della propria temperatura di inversione

Utilizzo JT: pro e cons

- Per refrigeratori JT a 80 K si usano di solito azoto e argon, ma sono necessarie alte pressioni (>200 bar) per ottenere raffreddamento ragionevole. Necessità di compressori speciali con basso tempo di vita medio
- Si usa spesso nei liquefattori come ultima trasformazione per ottenere il liquido (la liquefazione non avviene in macchine ad espansione per non avere liquido a contatto con parti in movimento)
- I refrigeratori JT spesso usano miscele per aumentare la temperatura di inversione del gas e l'efficienza del processo

PRO

- Nessuna parte mobile a freddo
- Facilmente miniaturizzabili
- Forniscono un raffreddamento estremamente rapido (pochi secondi per arrivare a 77 K)
- Nessuna controindicazione dalla liquefazione del fluido di lavoro

CONTRO

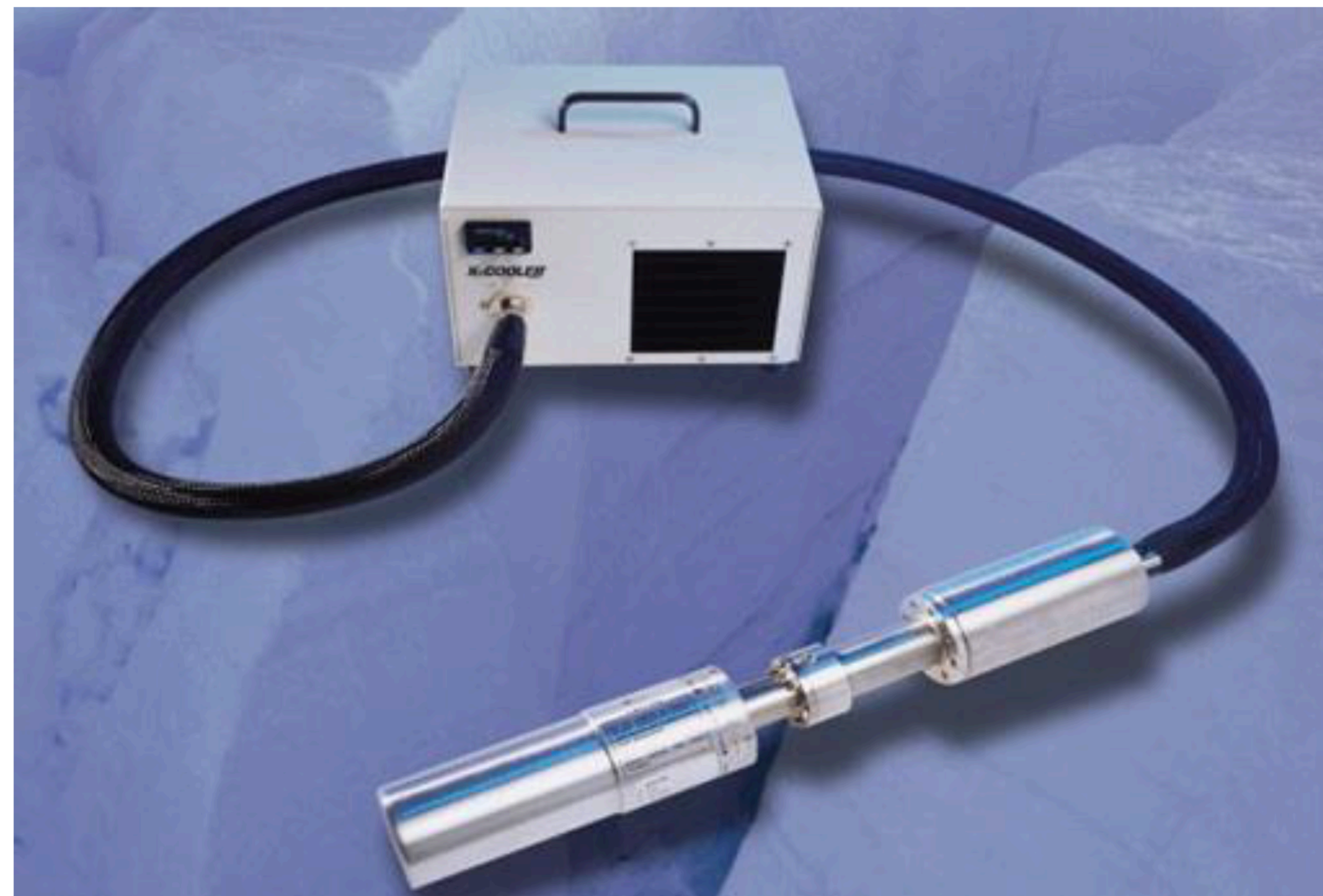
- soggetti otturazione dell'orifizio (valvola JT)
- bassa efficienza se utilizzati in cicli chiusi
- efficienze dei compressori basse se JT richiede alta pressione di partenza
- Per temperature sotto i 70 K c'è bisogno di utilizzare un secondo stadio/compressore e un fluido di lavoro di neon o idrogeno per il suo preraffreddamento

Esempio di JT commerciali/militari

*Esempio di criorefrigeratore JT utilizzato per la **guida missilistica a infrarossi**. Un tubo alettato in miniatura funge da scambiatore di calore. Una valvola esplosiva viene utilizzata per avviare il flusso di gas dalla bombola ad alta pressione. Dopo essere passato attraverso il refrigeratore, il gas viene scaricato nell'atmosfera*



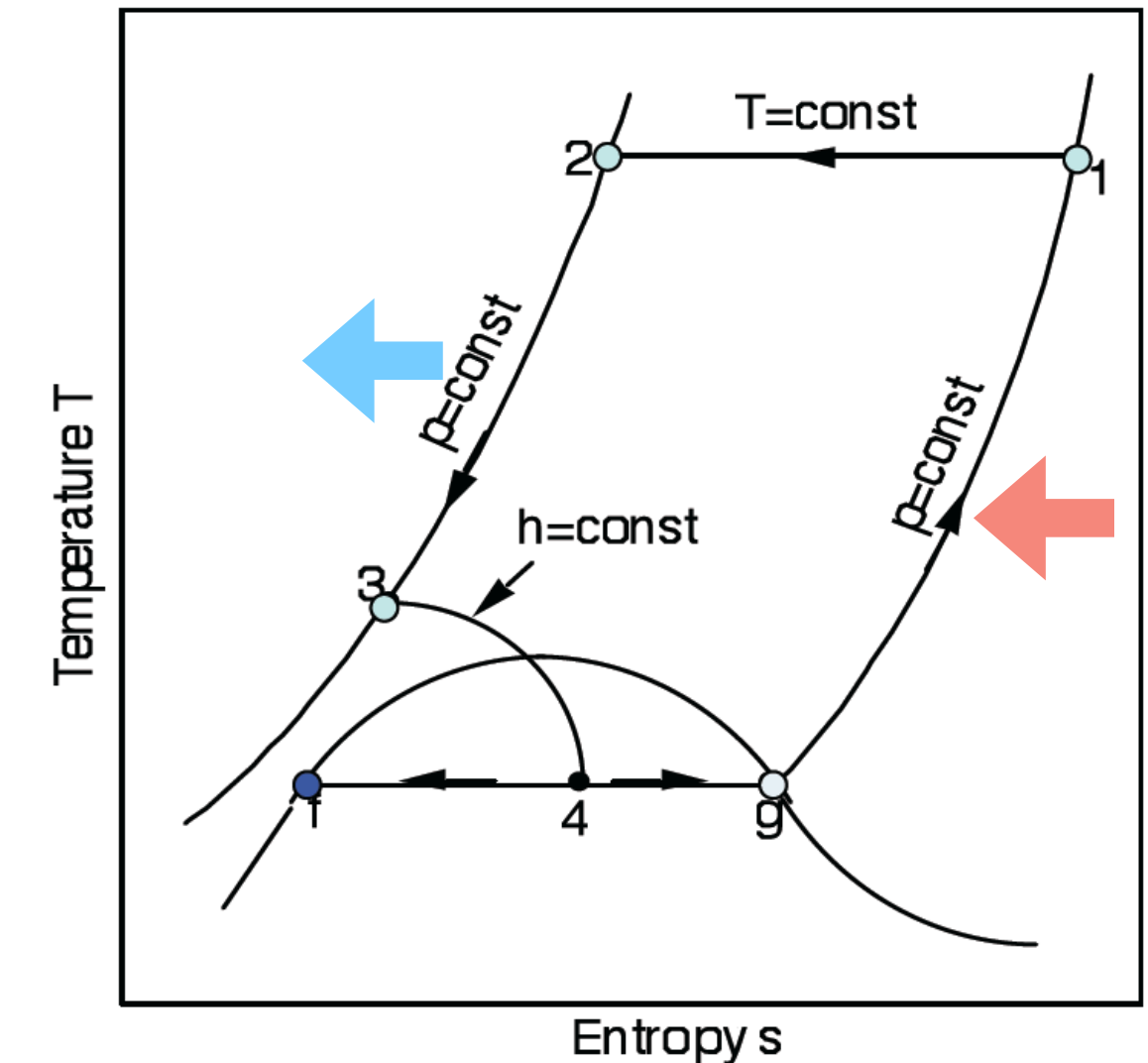
*Esempio di criorefrigeratore commerciale JT a refrigerante misto utilizzato per il **raffreddamento di rilevatori di nuclidi** di germanio ad elevata purezza (5 W @ 80 K, durata superiore a 10 anni in funzionamento continuo)*



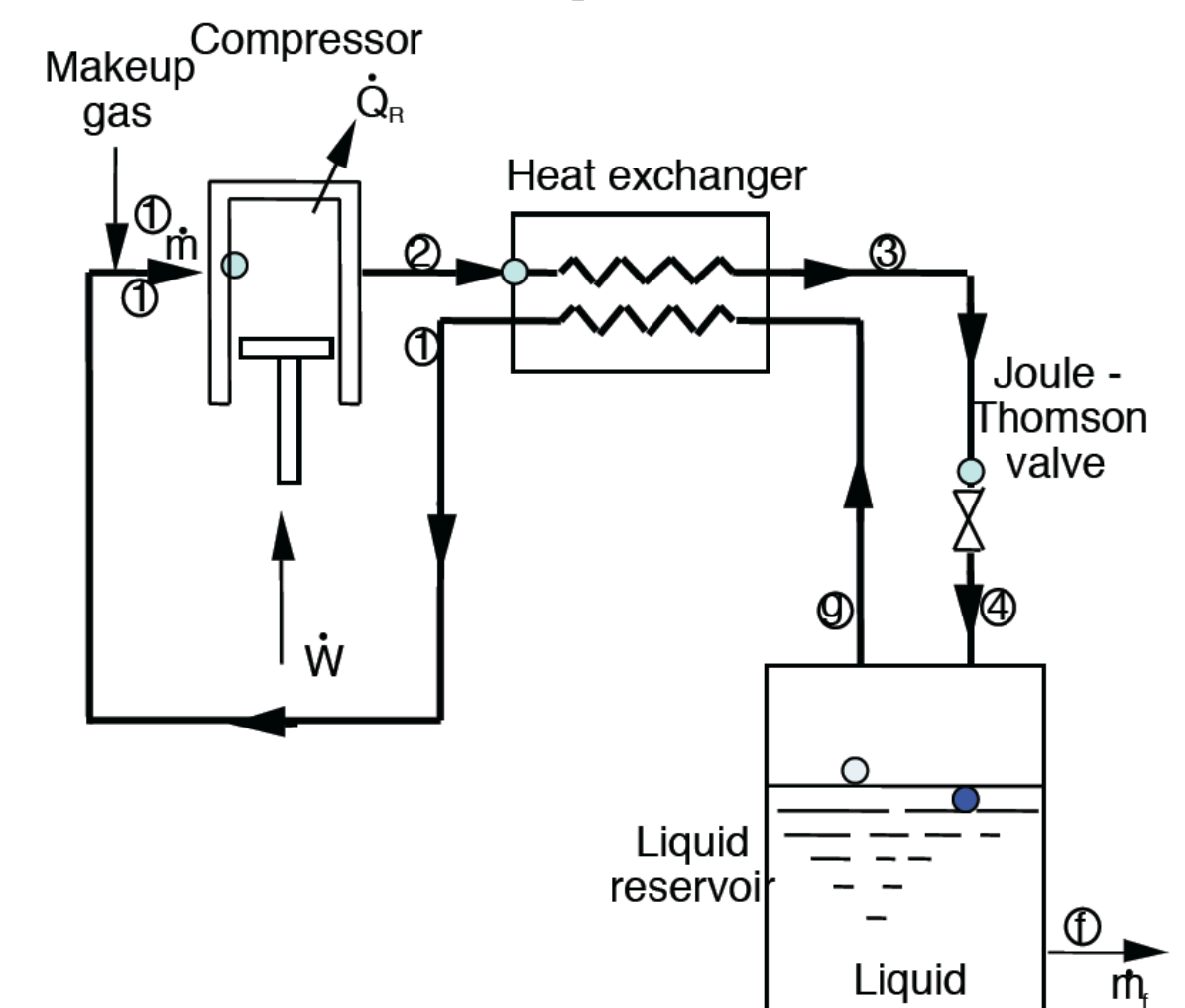
Liquefazione: il ciclo di Linde-Hampson

- Il ciclo Linde-Hampson è il ciclo basilare per la liquefazione:**
 - 1-2 compressione isoterma (compressore a vite o simili)
 - 2-3 raffreddamento isobaro (il gas in inlet viene raffreddato in controflusso dal gas in outlet)
 - 3-4 espansione isoentalpica (espansione JT che porta a liquefazione)
 - 4-g evaporazione (l'evaporato del liquido è vapor saturo)
 - g-5 riscaldamento isobaro (il gas in outlet riscalda in controflusso l'inlet)
- La temperatura di inversione deve essere sopra la temperatura di compressione, altrimenti alcuni gas devono essere pre-raffreddati prima di essere laminati (espansi).
- Una volta al di sotto della temperatura di inversione, l'espansione JT facilita ulteriore abbassamento della temperatura.
- Scambiatori di calore recuperativi preraffreddano il flusso ad alta pressione (sfruttando efficacemente lo scambio termico tra flussi a differente temperatura)
- Il refrigeratore assorbe il calore convertendo il liquido in vapore alla temperatura di saturazione a bassa pressione.
- Il liquefattore necessita di una sorgente di gas puro (make-up gas)

Diagramma T-S per il ciclo Linde-Hampson



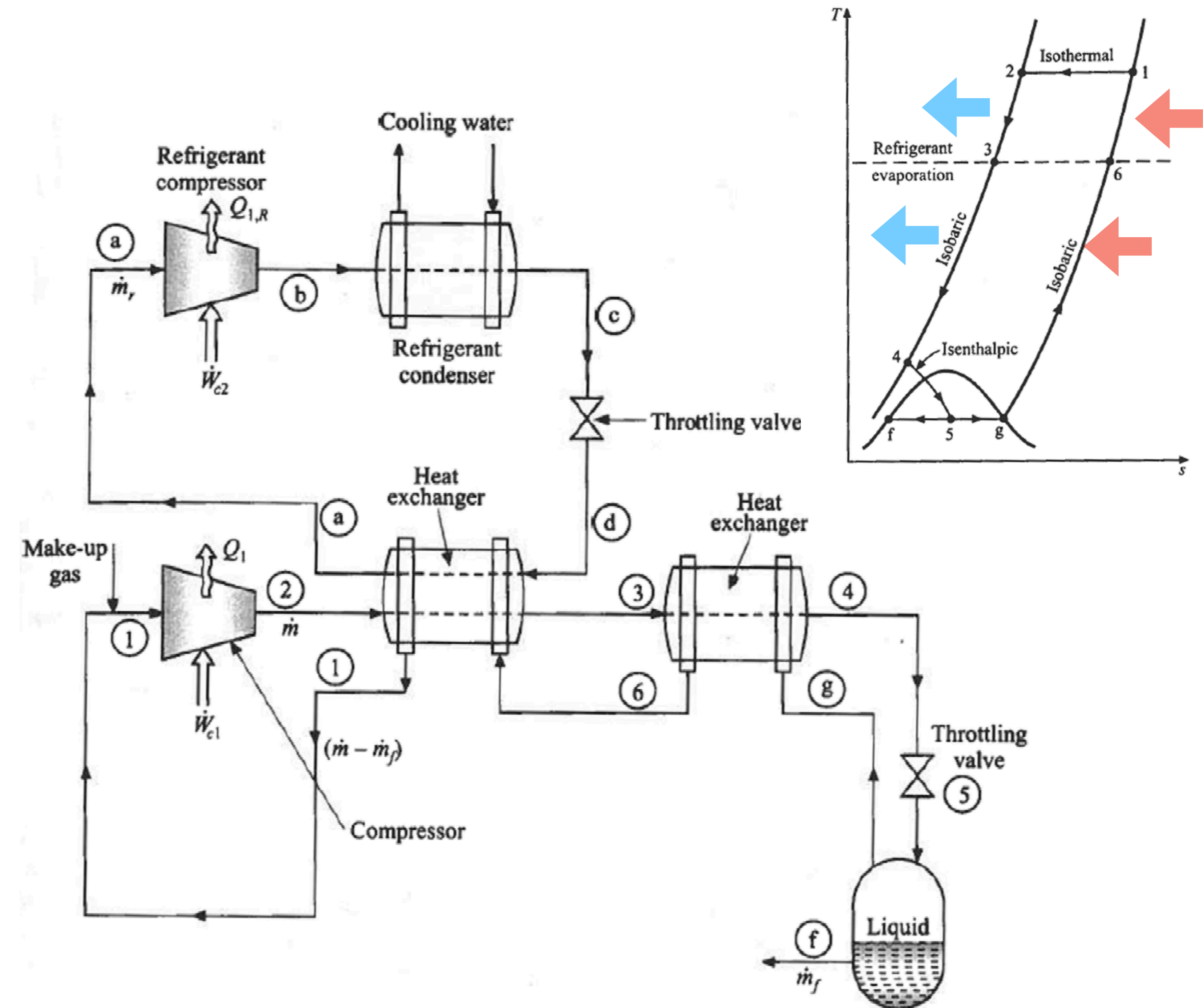
Schematico del ciclo Linde-Hampson



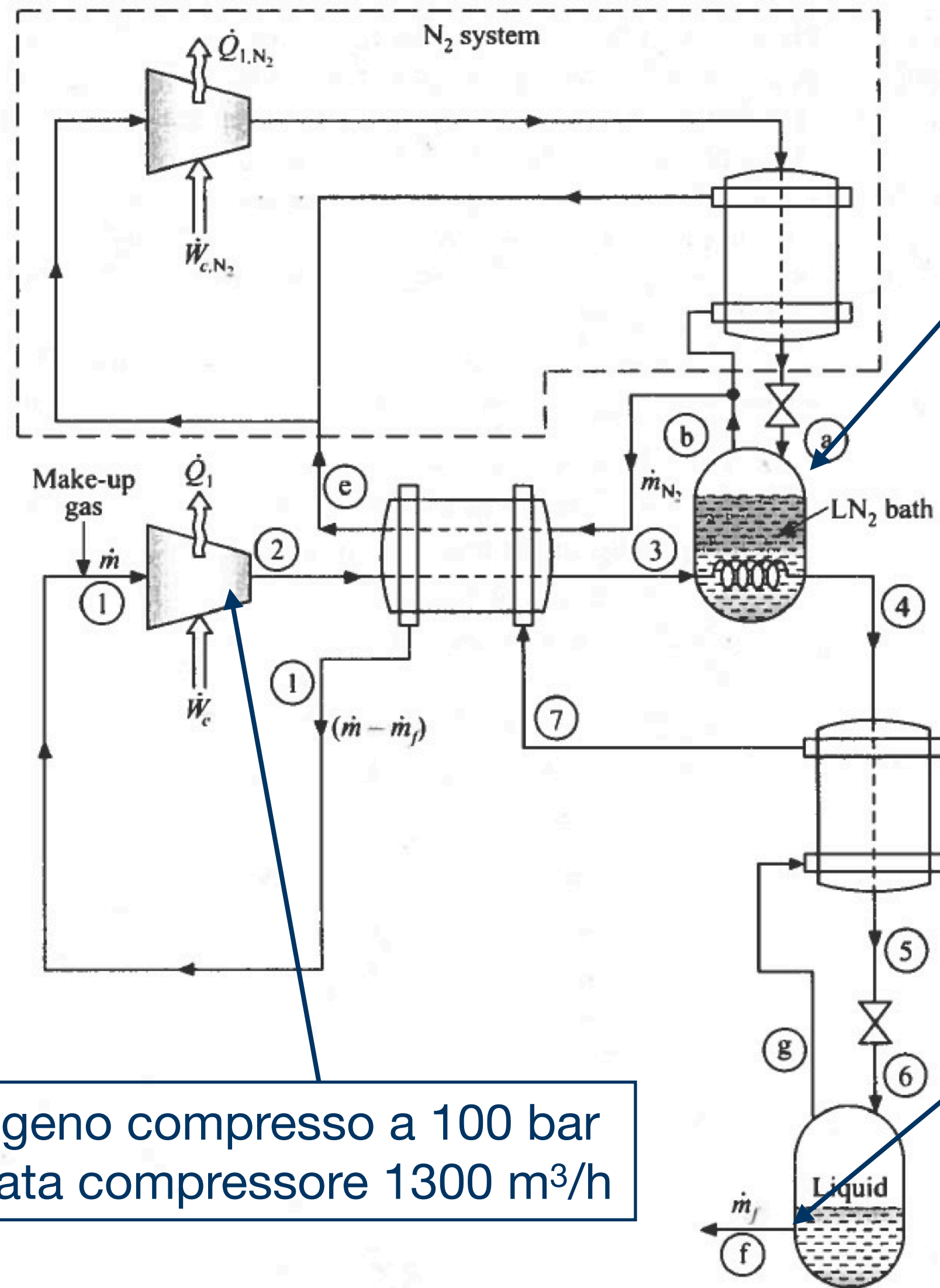
Linde-Hampson pre-raffreddato

- Il ciclo del preraffreddante:
 - a-b: Compressione del vapore saturo del refrigerante;
 - b-c: Raffreddamento e condensazione ad alta pressione con utilizzo di acqua di raffreddamento;
 - c-d: Laminazione isoentalpica JT;
 - d-a: Evaporazione del refrigerante per preraffreddare il gas da 2 a 3;

- 1-2 compressione isoterma (screw compressor o similari)
- 2-3 raffreddamento isobaro (il gas in inlet preraffreddato da refrigerante e in controflusso dal gas in outlet)
- 3-4 raffreddamento mediante vapore saturo di ritorno
- 4-5 espansione isoentalpica (laminazione)
- 5-g evaporazione (vapore saturo)
- g-6 vapore saturo raffredda flusso di gas da 3-4;
- 6-1 riscaldamento isobaro (vapore di uscita raffredda flusso di gas da 2-3)



Es: Liquefattore di idrogeno Linde-Hampson (preraffreddato LN2)



Preraffreddamento LN2
($T=66K$, $p=0,2$ bar)
Consumo LN2 ~340 litri/h

Idrogeno liquido prodotto
(95% para) 230 litri/h

1. Temperatura di inversione dell'idrogeno di 204 K:
 - Necessario raffreddamento da sorgente esterna prima di laminare il flusso di gas;
2. Contiene impurità volatili che devono essere estratte:
 - Contiene, per esempio, metano, ossigeno e azoto;
 - Utilizzo di gel di silice o carboni attivi per rimuoverle a temperatura dell'azoto liquido;
3. **Conversione da orto-idrogeno a para-idrogeno:**
 - **Lenta**, sarà necessario l'utilizzo di catalizzatori metallici (ossido di cromo in supporto di alluminio o gel di idrossido di ferro granulare);
 - **Esotermica**, sarà necessario estrarre calore a bassa temperatura;

Idrogeno compresso a 100 bar
Portata compressore 1300 m³/h

Es: impianto liquefazione H della LINDE



LEUNA (Germania)



Produzione = 5 ton_{LH2}/gg

Costo di investimento = 25 milioni €

Consumo = 11,9 kWh/kg_{LH2}

Varianti: il ciclo Claude

- Claude cycle è una combinazione di un ciclo **Linde-Hampson** + un ciclo parallelo (1-2-3-e-1) in cui una turbina performa un'**espansione isoentropica** (3-e)
- L'espansione isoentropica, caratterizzata da $\mu_s = (dT/dP)_s$ (sempre >0) produce raffreddamenti più grandi a parità di salto di pressione rispetto all'espansione JT (isoentalpica)
- Comunemente usato in grandi impianti di liquefazione di elio per il raffreddamento di magneti superconduttori e cavità RF negli acceleratori di particelle
- L'**espansione JT** è utilizzata per il **raffreddamento finale** che porta alla liquefazione (l'efficienza dell'espansione JT nella regione bifasica è piuttosto elevata)
- La maggior parte della liquefazione su larga scala di aria, idrogeno ed elio viene effettuata utilizzando il ciclo Claude, ma con molti più turbine di espansione in serie (ciclo Collins)

Schematico del ciclo Claude

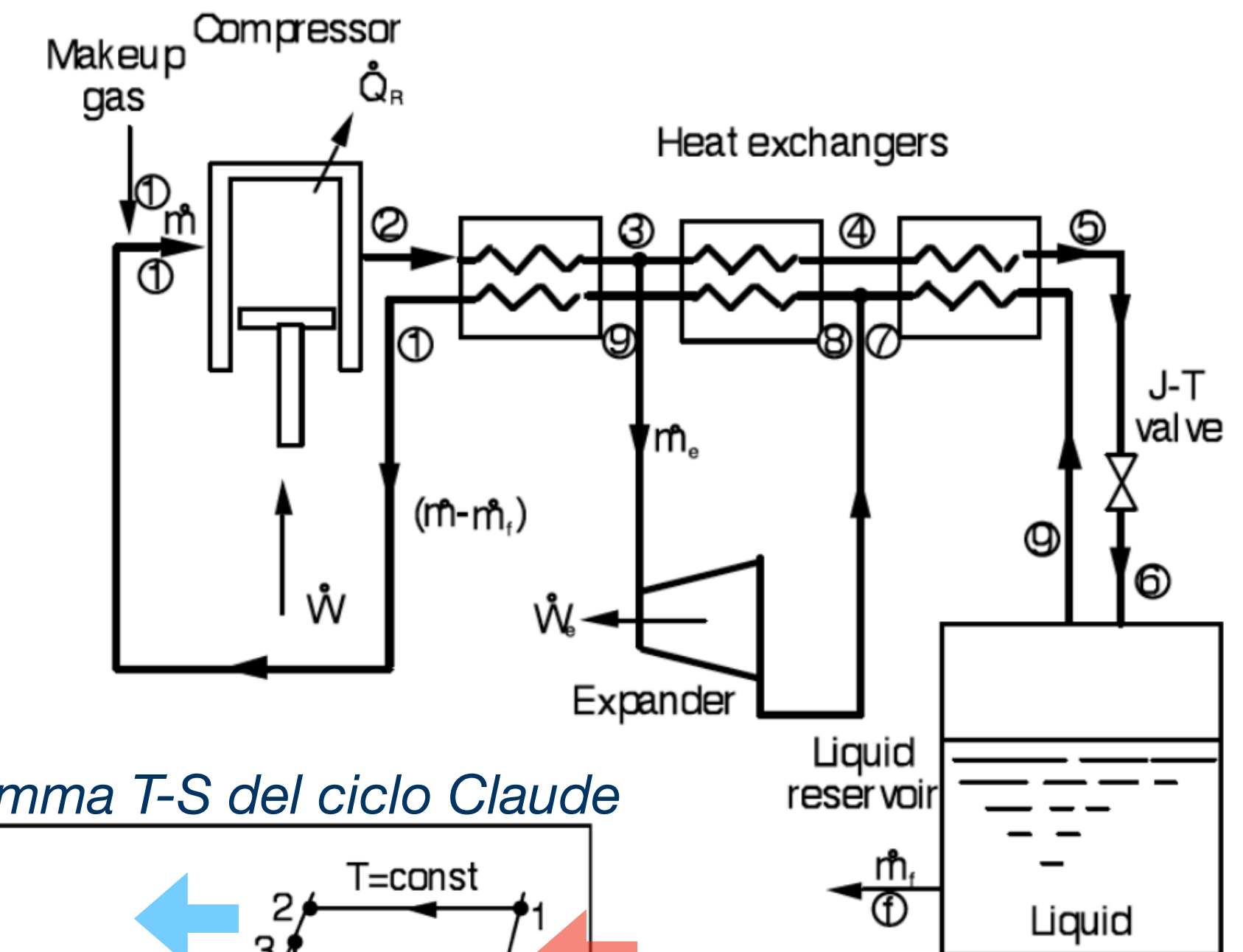
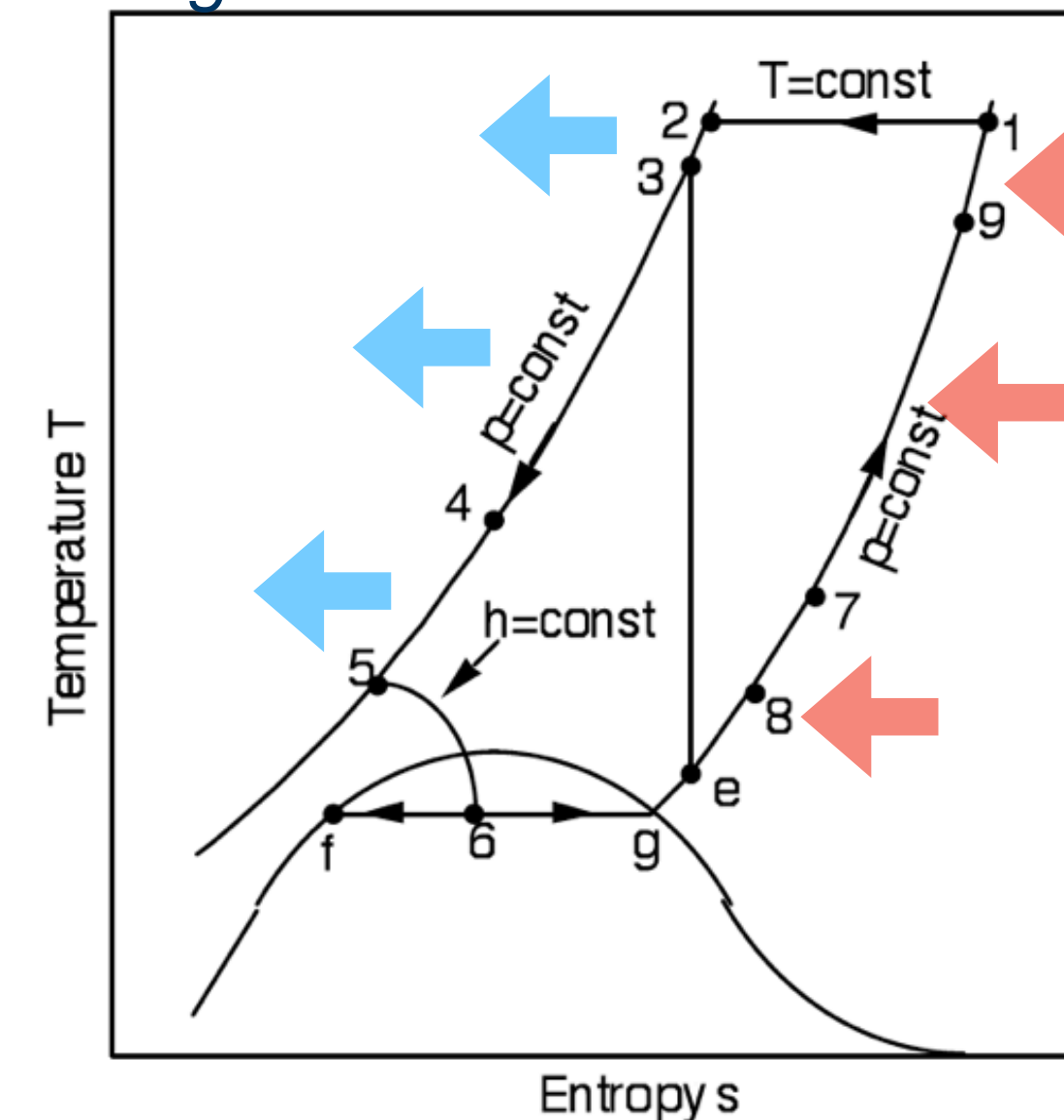


Diagramma T-S del ciclo Claude

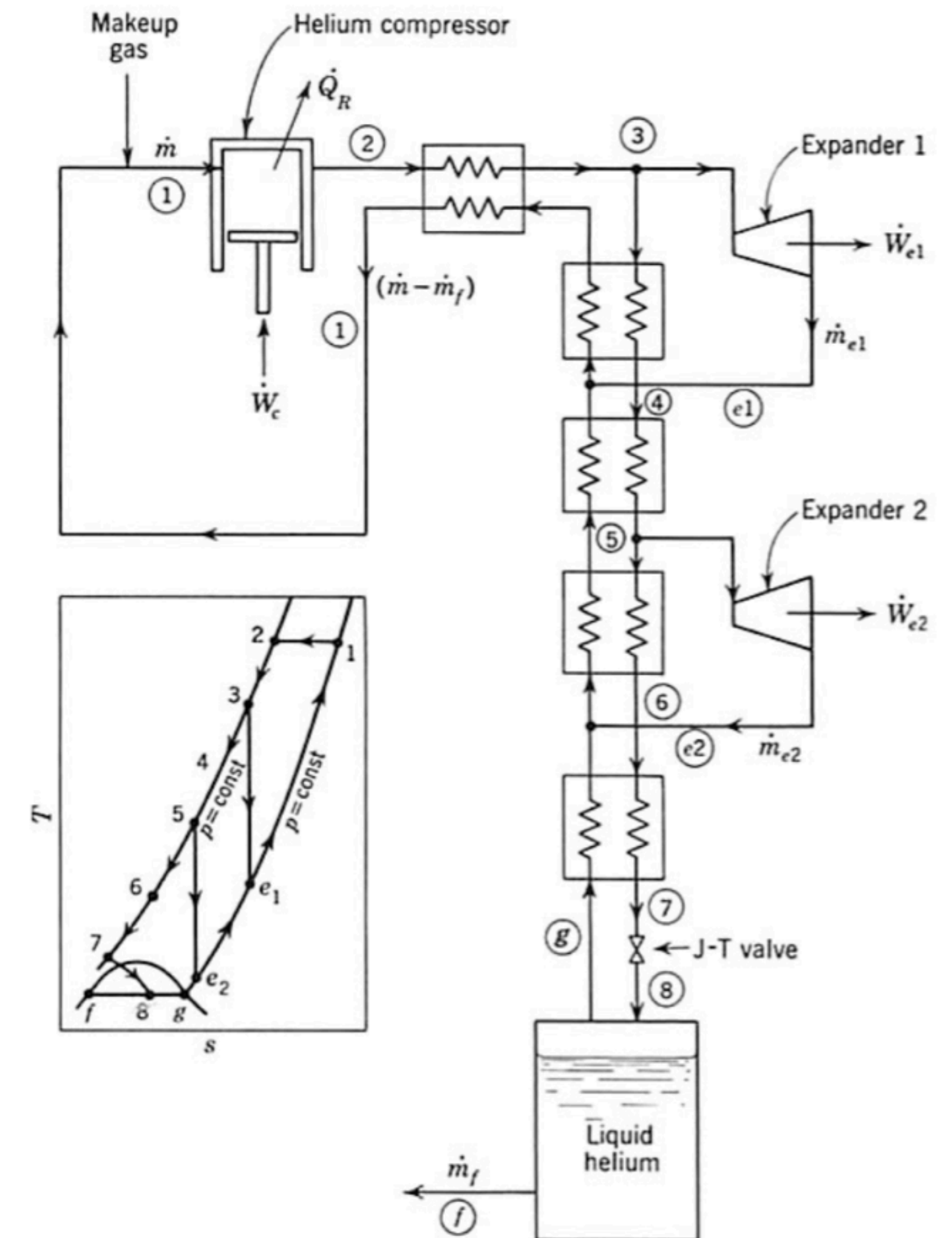


Ciclo principale Linde-Hampson
(1-2-3-e-8-7-9-1)

+
Ciclo parallelo turbo-expander
(1-2-3-e-1):
è un reversed Brayton
modificato con una
compressione isoterma (1-2)
anziché isoentropica

Varianti: il ciclo Collins e i liquefattori di elio

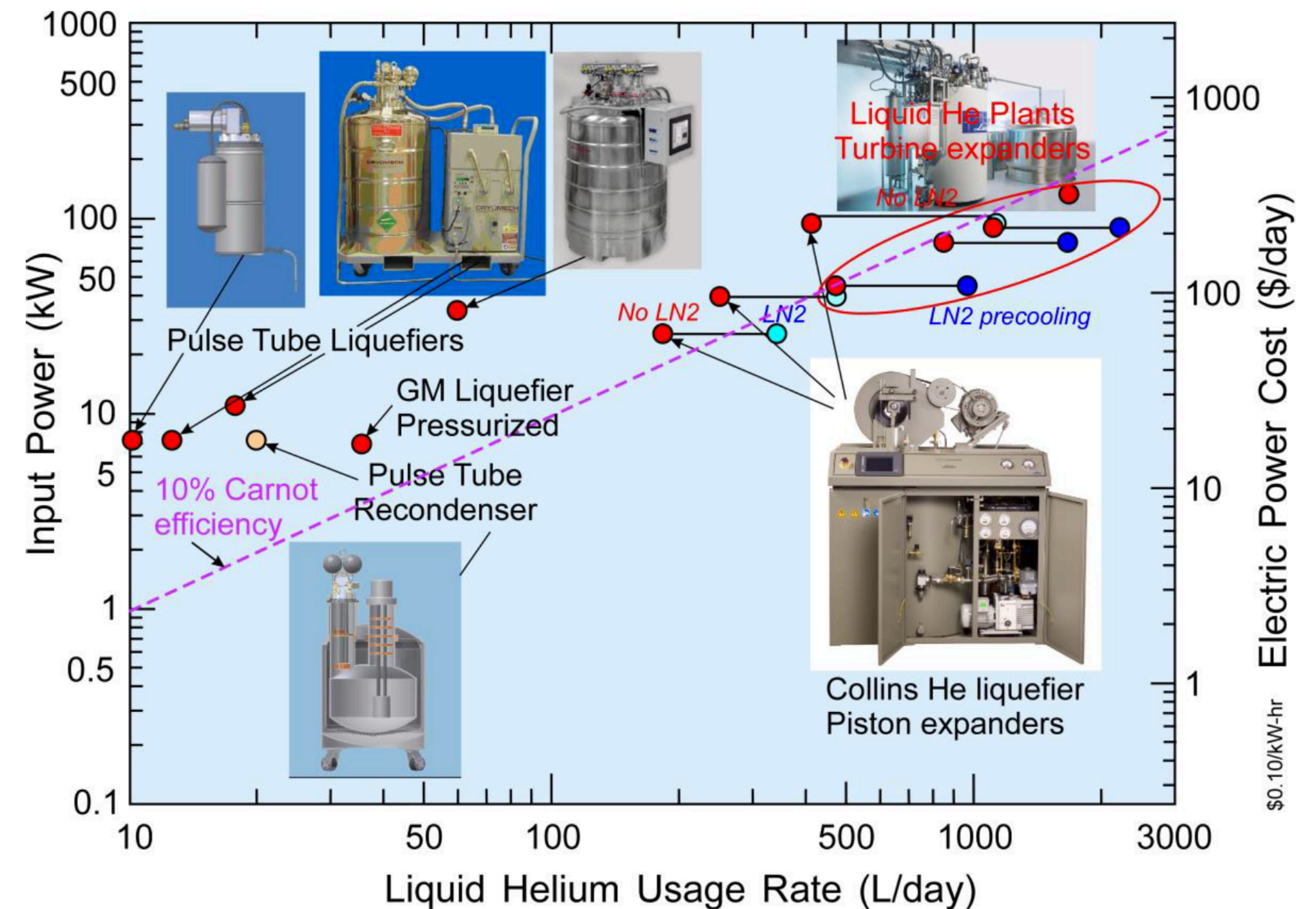
- **Ciclo di Collins: variante del ciclo Claude con $N > 1$ espansori in serie** (tipicamente turbine) e possibilità di LN_2 pre-cooling
- Performance ottimizzate tramite temperature e flussi dei motori delle turbine di espansione
- Il primo liquefattore di elio Collins, sviluppato nel 1947, è diventato il primo liquefattore di elio commerciale. Usa due espansori a pistone per il pre-raffreddamento dell'elio prima dell'espansione JT.
- Rate di liquefazione può variare da 190 L/d a 400 L/d a seconda della dimensione del compressore (con pre-raffreddamento LN_2 resa x2)
- COP Claude helium liquefiers (no LN_2 precooling): 5-8 % di Carnot
COP Collins helium liquefiers (larger systems): 12 % di Carnot



Liquefattori di elio

- I liquefattori che utilizzano turbo-expander a gas sono spesso progettati per fornire elio liquido che può essere utilizzato per il raffreddamento in apparati in siti diversi
- Per preservare la molecola (l'elio costa attualmente ~23€/smc + IVA), sono combinati con **sistemi di recupero e purificazione** per recuperare l'elio di ebollizione gas dagli esperimenti, conservarlo in bombola ad alta pressione e restituirlo purificato al liquefattore
- **Per i sistemi più grandi**, il ciclo Claude/Collins è solitamente integrato con l'apparato sperimentale: l'**entalpia del boil-off dell'elio di ritorno viene recuperata attraverso scambiatori di calore** per aumentare l'efficienza (1,38 L/ora di elio liquido a 1 bar può fornire 1 W di raffreddamento a 4,2 K).
- Es: impianti di refrigerazione ad elio per acceleratori con magneti superconduttori, Large Hadron Collider (LHC, dati del 2014):
 - 8 impianti di refrigerazione con una capacità combinata di 144 kW di refrigerazione a 4,5 K e 19,2 kW a 1,8 K
 - potenza elettrica totale in ingresso ~40 MW
 - efficienza 31% di Carnot
 - impiegano da 8 a 10 stadi di turbine di espansione

Potenza elettrica di alimentazione e costi operativi rispetto alla capacità di liquefazione per vari tipi di liquefattori di elio



Es: liquefattore elio L5 by LINDE



Pallone di
recupero ~15 m³

Compressore
di processo
a vite

Bilancia di
precisione

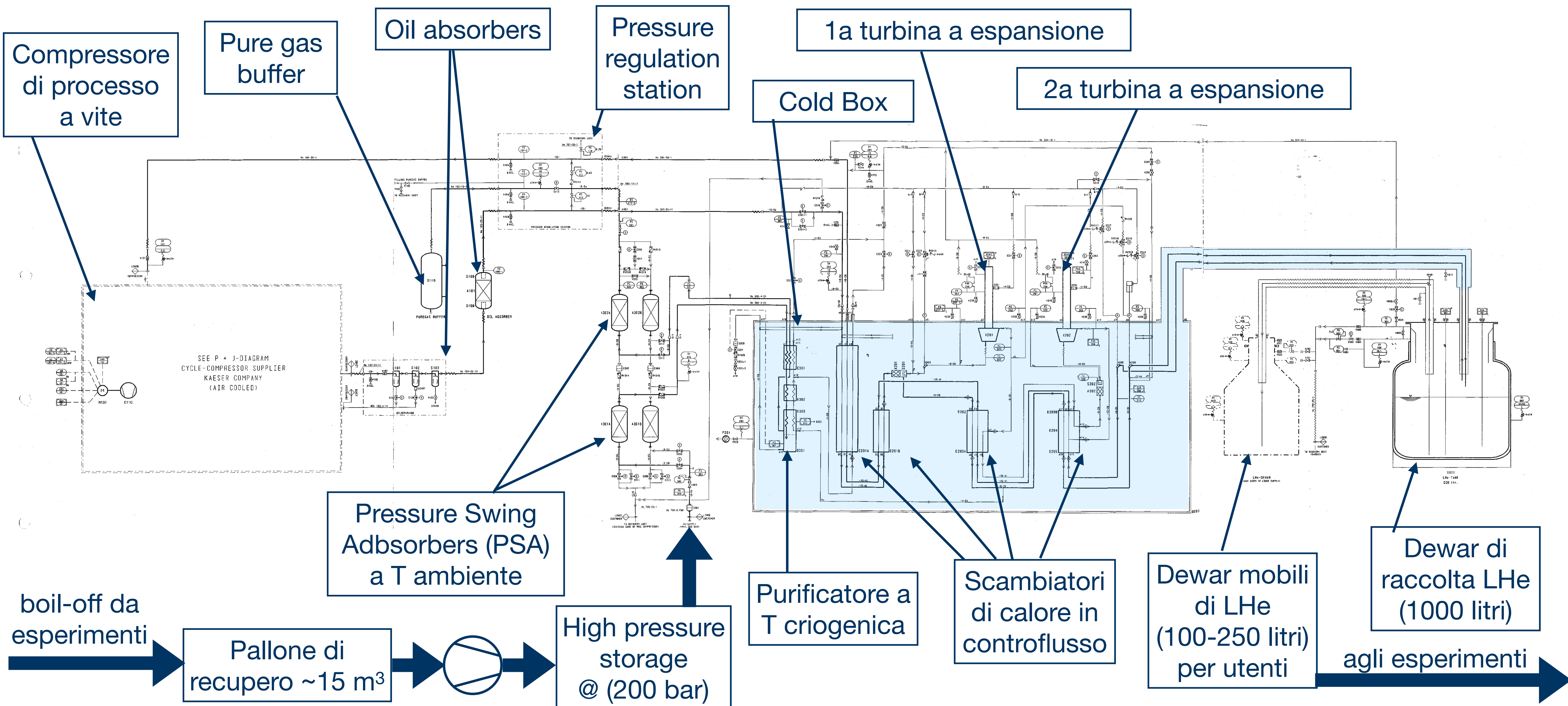
High pressure
storage
@ (200 bar)

Cold box

Dewar di
raccolta LHe
(1000 litri)

Dewar mobili
di LHe
(100-250 litri)
per utenti

Es: liquefattore elio L5 by LINDE



Es: liquefattore elio L5 by LINDE - Turbines

- Compressore di processo (C101): il **compressore a vite** monostadio fornisce al processo di liquefazione circa 10 g/s di elio ad una pressione compresa tra 10 e 12 bara e una temperatura di circa 300 K (1).

- Coldbox:

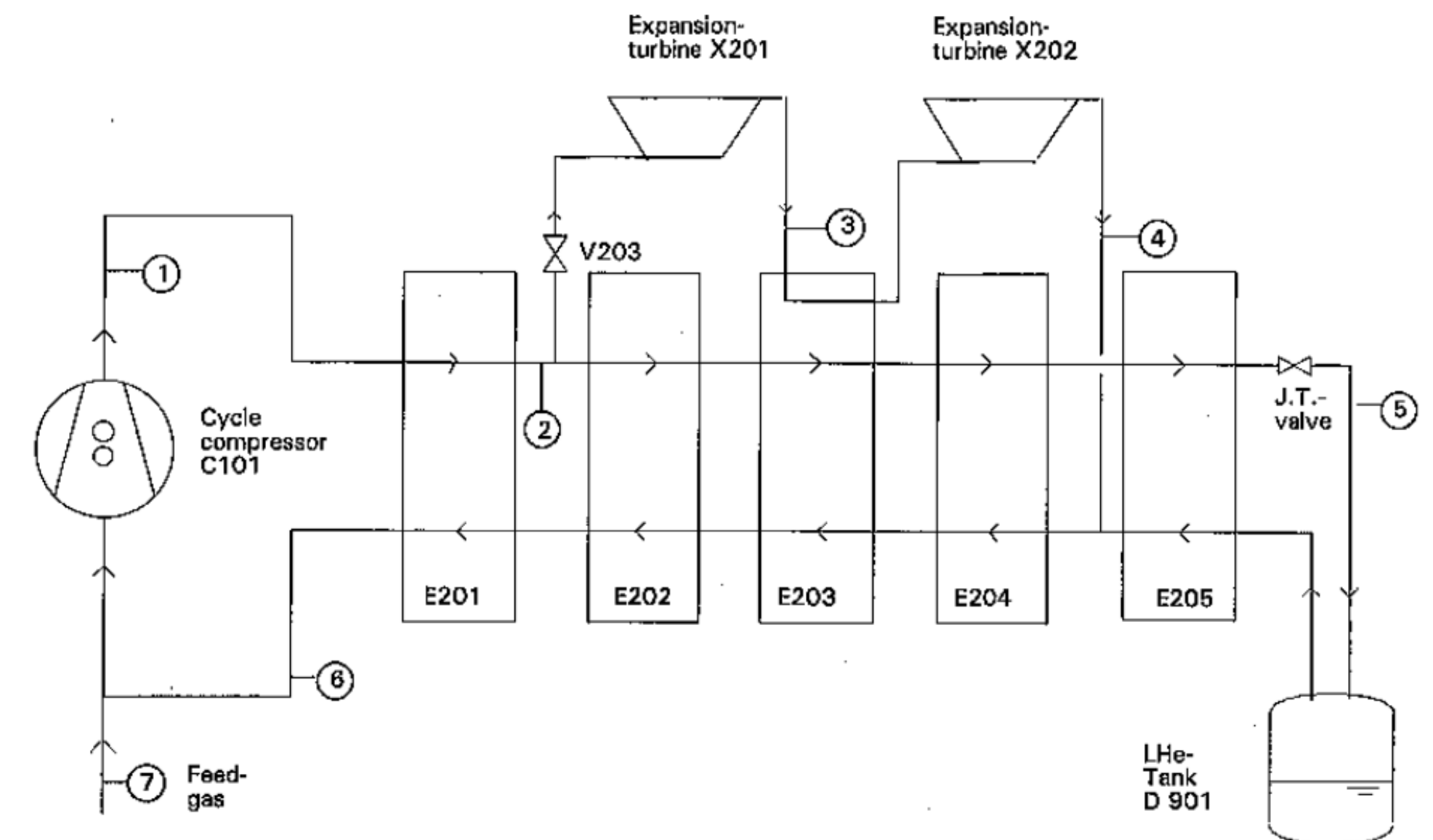
- nel primo scambiatore (E201) il gas viene raffreddato fino a ca. 70K
- il flusso di elio gas ad alta pressione viene diviso (2):
 - Ciclo turbo-expander: Attraverso la valvola di ingresso V203 vengono forniti 7 g/s alla **prima turbina** (X201), espansi a ca. 4,6 bar (3). Il gas si raffredda fino a ca. 64K. Dopo un ulteriore raffreddamento nello scambiatore di calore E203 a circa 16 K, nella **seconda turbina** (X202) avviene un'ulteriore espansione fino a 1,2 bara. Il raffreddamento del gas porta ad una temperatura di 12 K all'uscita della turbina X202 (4). Questo gas viene quindi immesso nel lato a bassa pressione dello scambiatore di calore E204 dove si unisce al boil-off.
 - Ciclo principale: i rimanenti 3 g/s si raffreddano negli scambiatori fino a una temperatura di circa 6.4 K prima di essere liquefatti dall'espansione JT

- Controflusso:

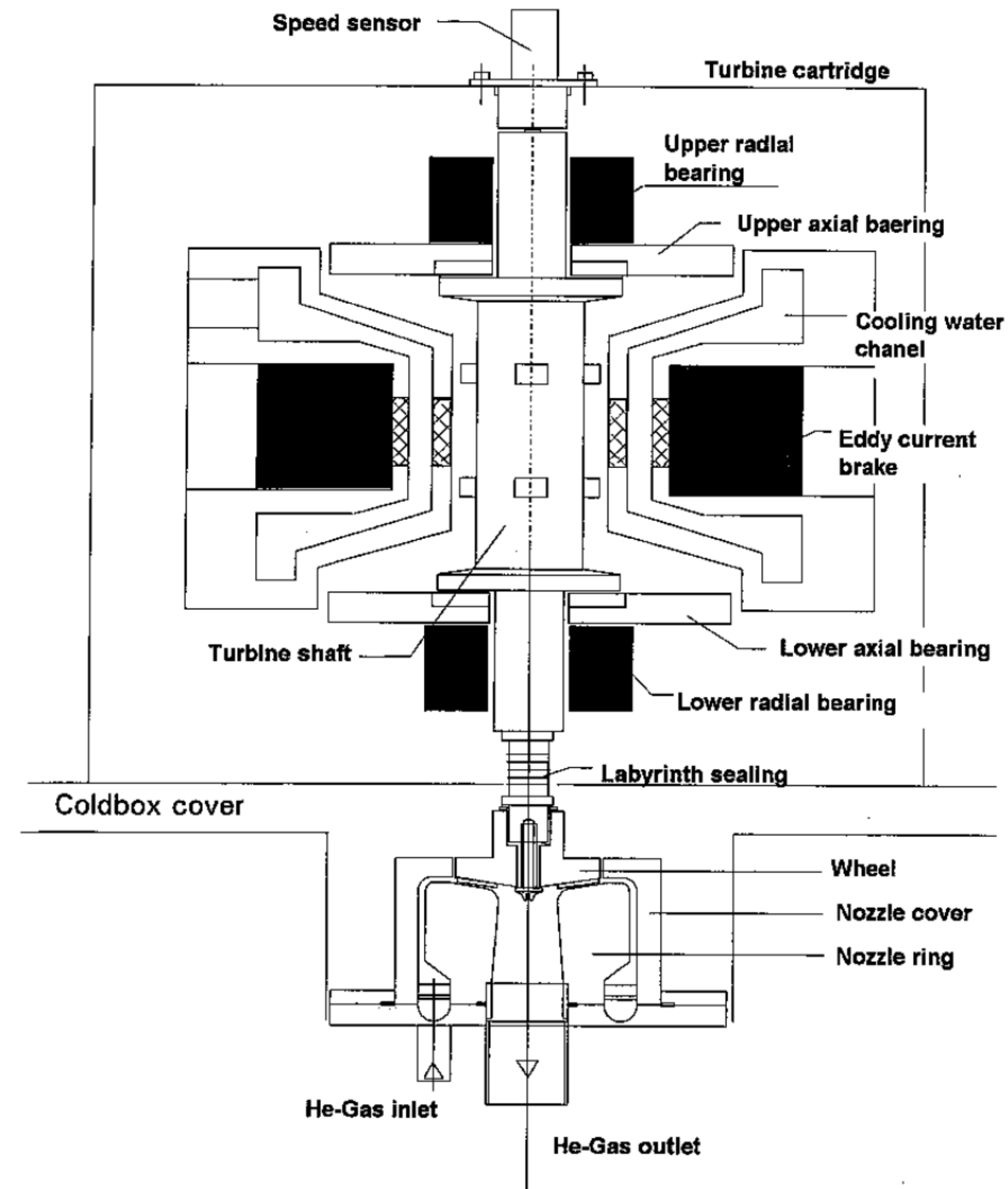
- l'elio gas freddo (boil-off del dewar di LHe D901) viene trasferito al lato a bassa pressione dello scambiatore di calore E205
- In controflusso rispetto al flusso di gas ad alta pressione, il gas viene riscaldato negli scambiatori di calore E206 - E201 a temperatura ambiente
- Il gas che esce dalla coldbox ad una pressione di ca. 1,07 bar. alimenta il lato a bassa pressione del compressore di processo (6)

- Bilancio del gas: l'elio liquido raccolto nel dewar di LHe (1000 litri) deve essere rimpiazzato da nuovo gas sul lato di aspirazione del compressore di ciclo (7). Ci sono due possibilità per far funzionare il liquefattore:
 - Alimentare il sistema con elio gas puro (>99.996 Vol%, ovvero He >5.5).
 - Lavorare con elio gas recuperato (impurità d'aria fino al 10%) e deve essere purificato fino alla qualità dato sopra (purifier).

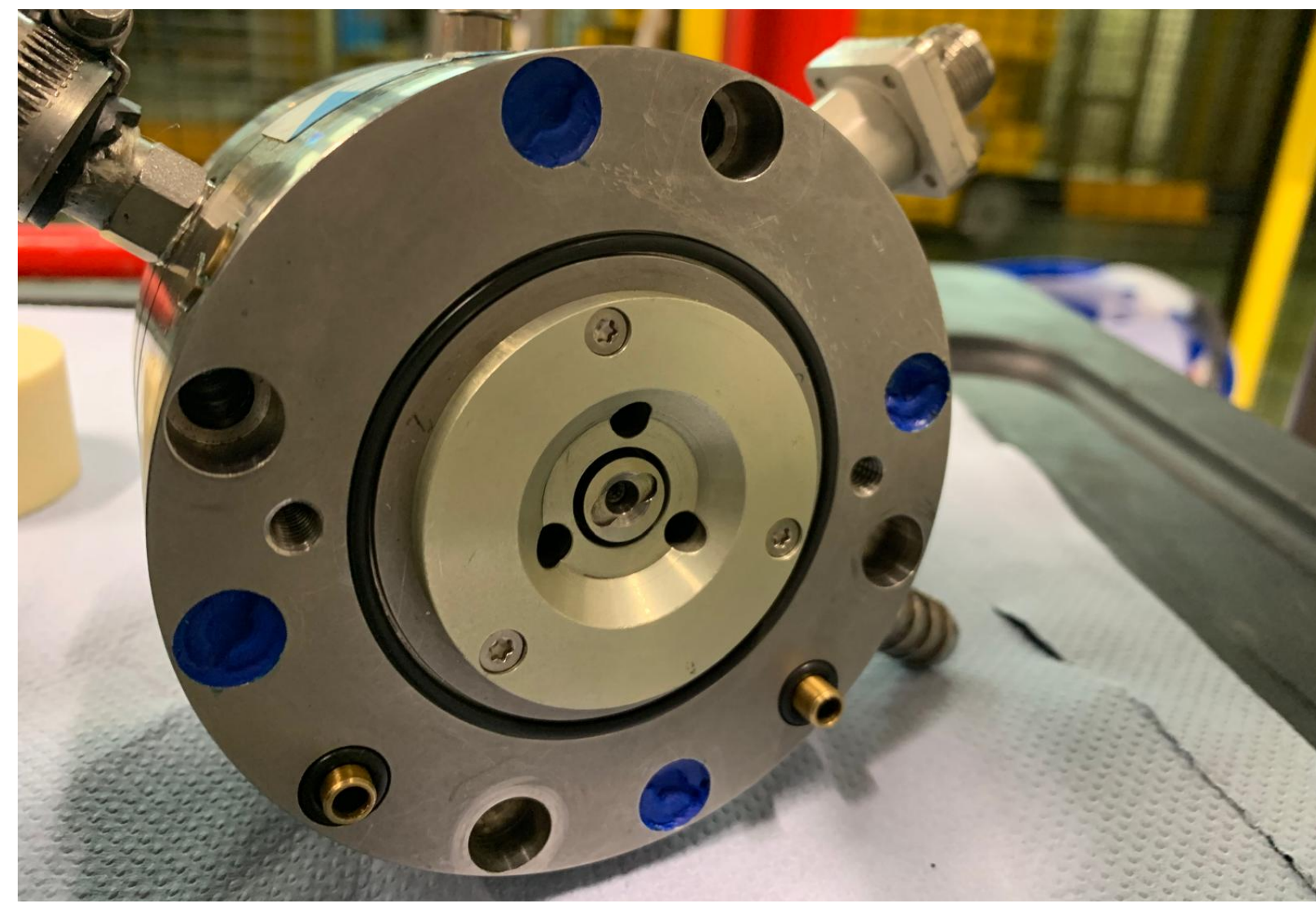
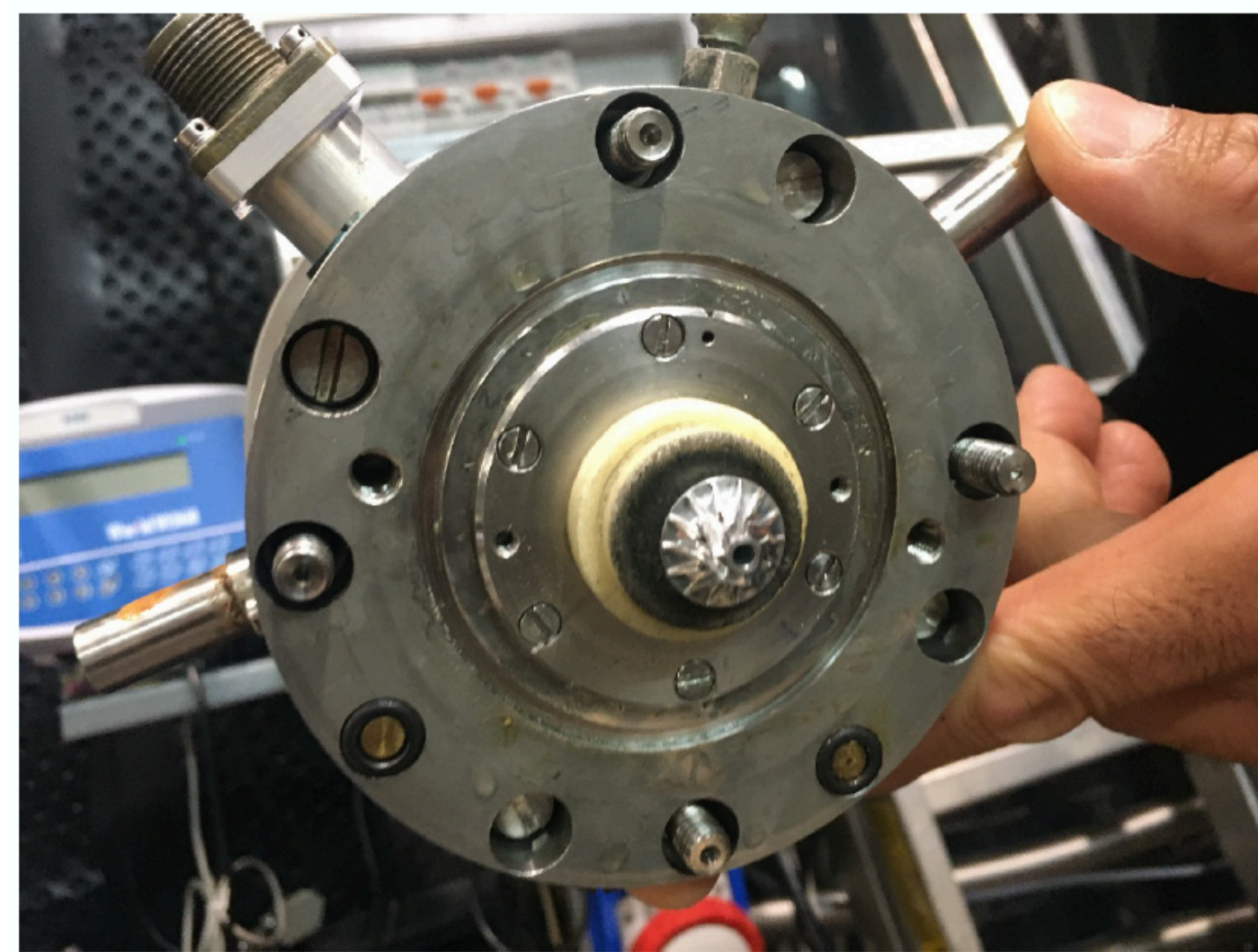
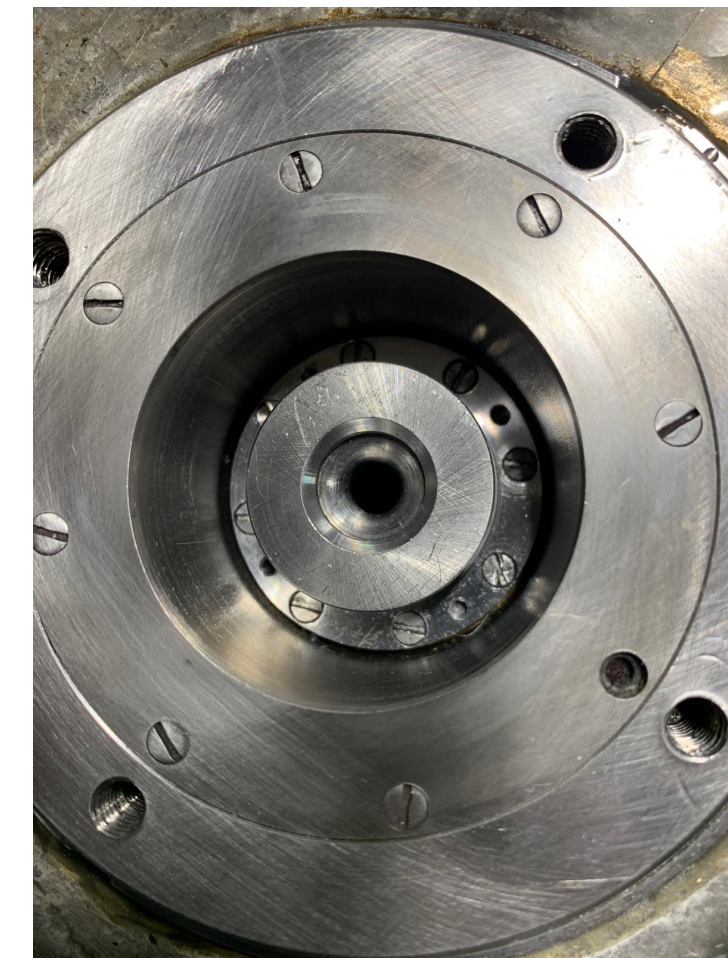
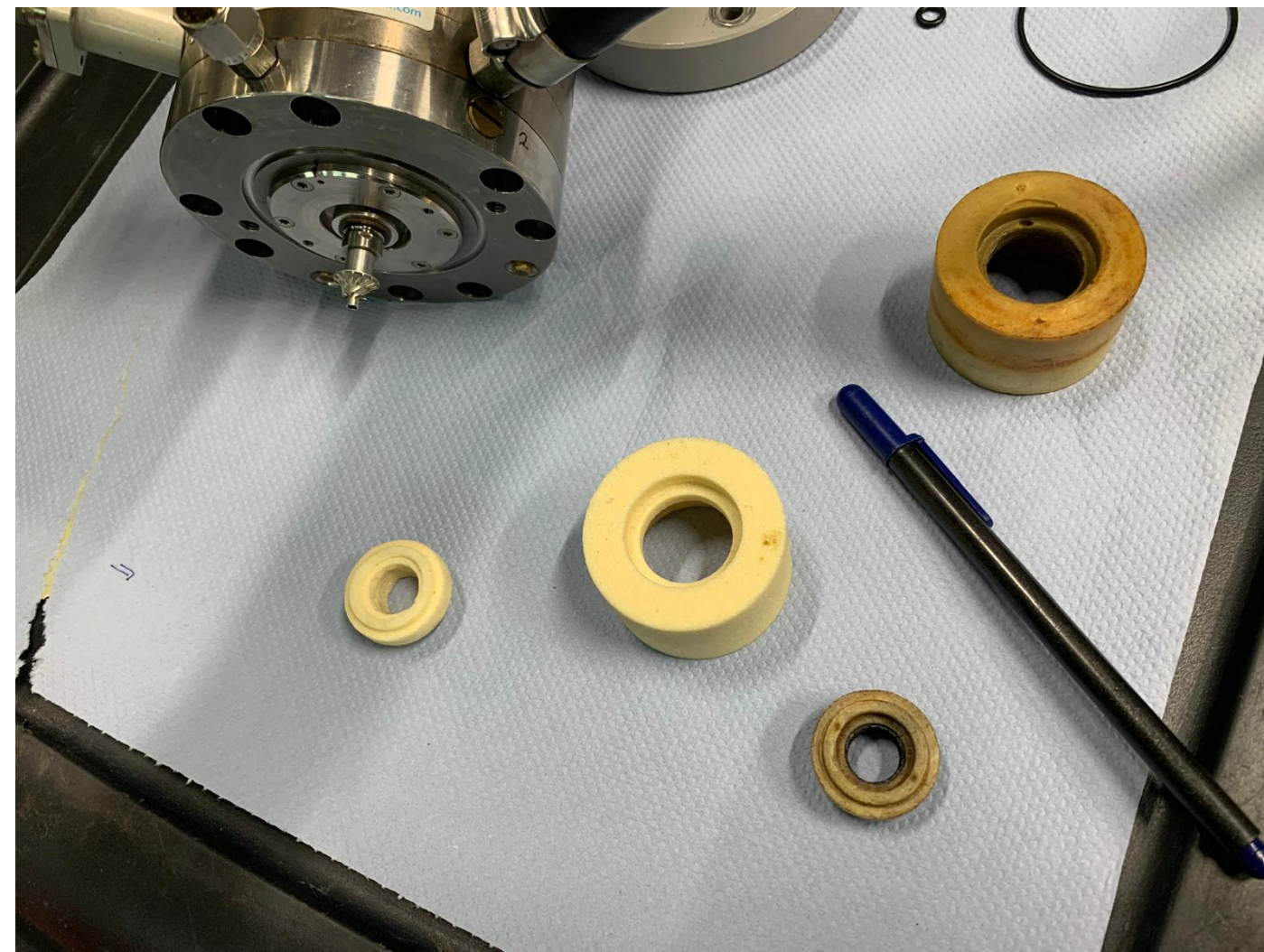
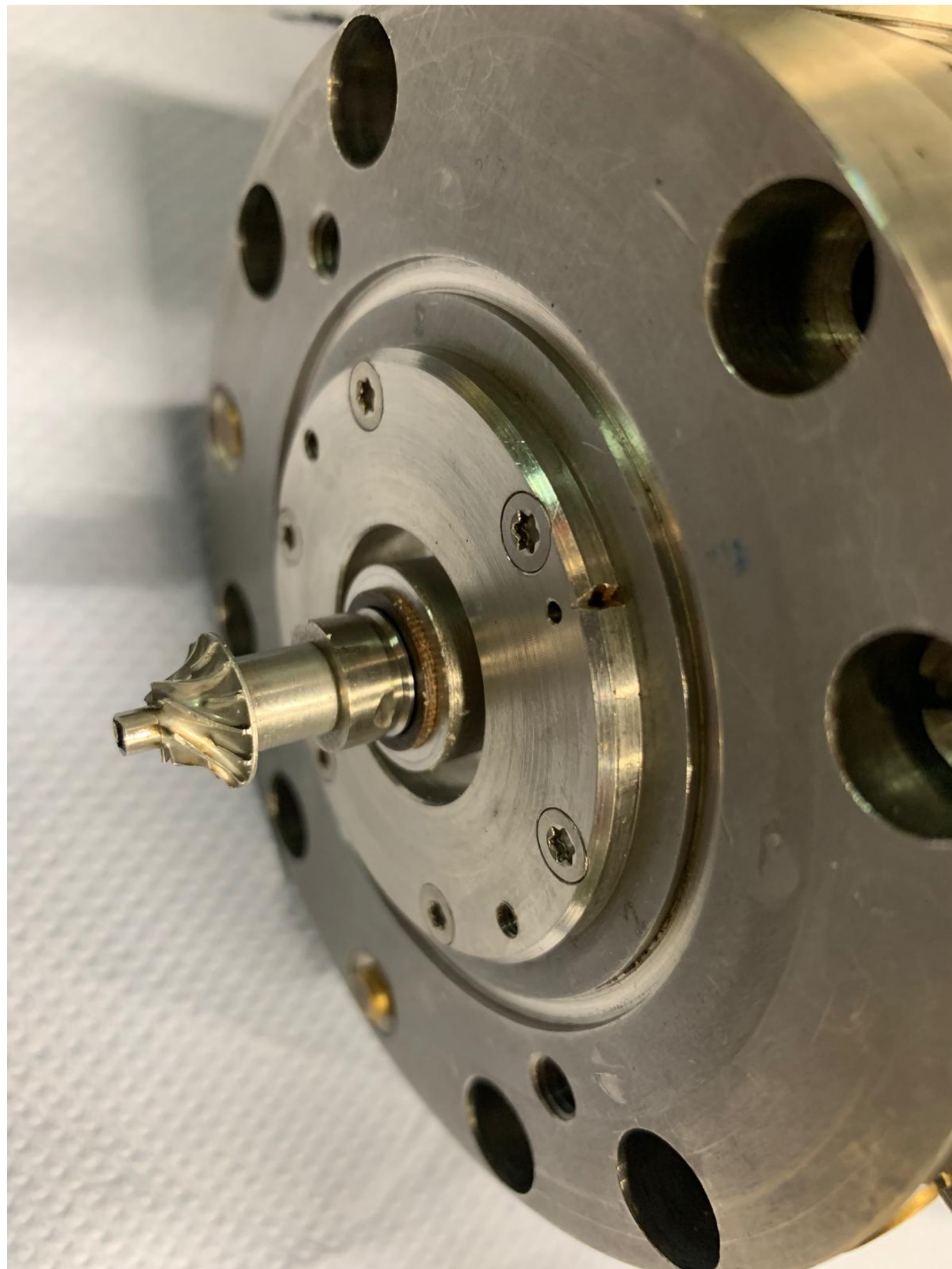
P&ID del liquefattore Linde L5 e del processo Collins (anche chiamato Linde-Claude)



Es: liquefattore elio L5 by LINDE - turbines

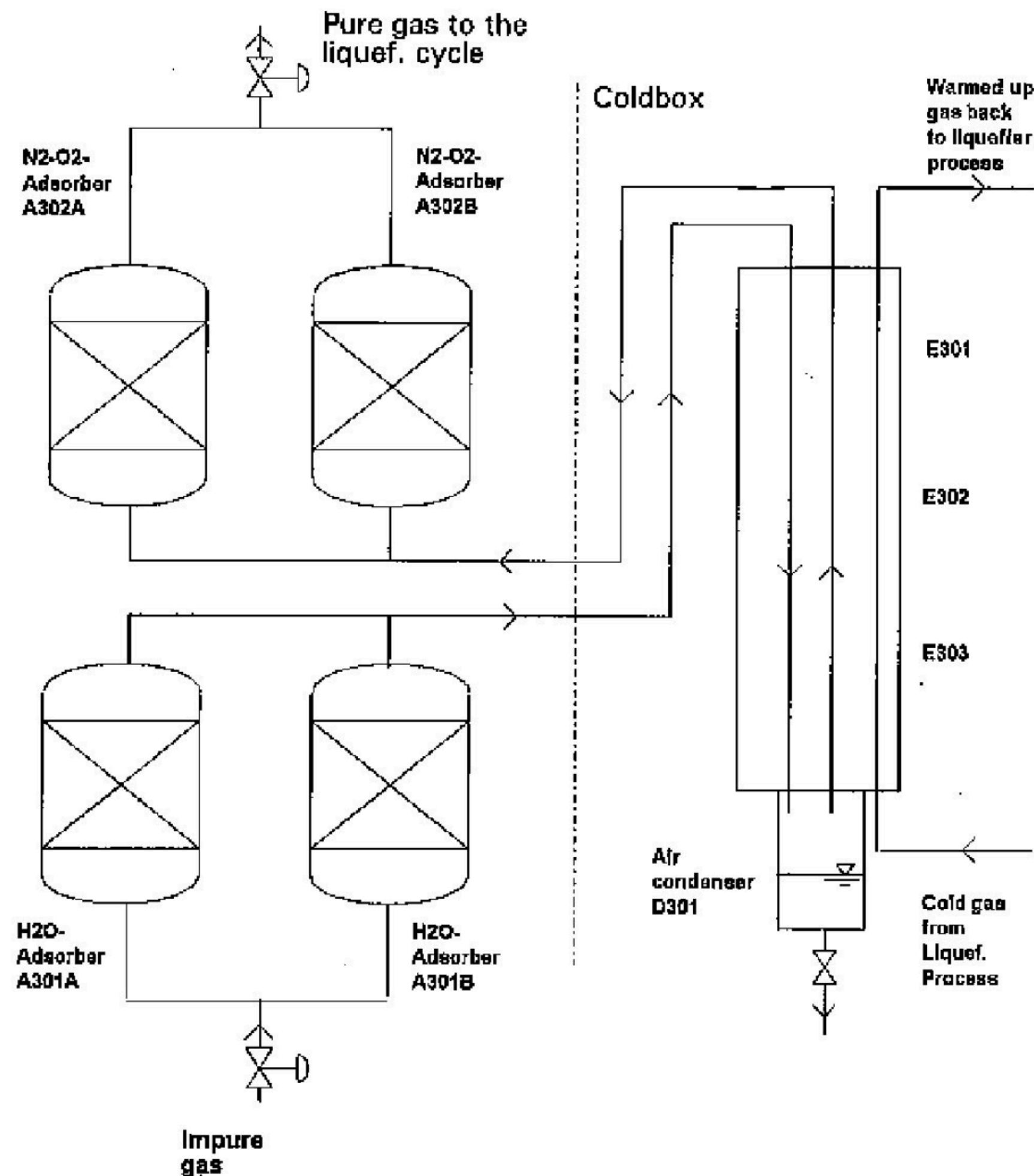


Es: liquefattore elio L5 by LINDE - turbines



Es: liquefattore elio L5 by LINDE - Purifier

Ciclo di purificazione dell'elio recuperato



- L'elio impuro con una pressione in ingresso fino a 200 bar viene ridotto ad una pressione di esercizio del purificatore di 20-25 bar.
- Nella prima fase l'elio impuro viene “asciugato” in un adsorber di H₂O, chiamato Pressure Swing Adsorber (PSA: mentre l'adsorber A301A è in funzione, l'altro A301B viene rigenerato)
- Nella seconda fase il gas entra nella cold box e viene raffreddato negli scambiatori di calore da E301 a E303 a ca. 65K (grazie a flusso di 0,17 g/s dal JT). Le impurità dell'aria fino al 10% vengono condensate ed espulse nell'atmosfera.
- L'elio con un'impurità residua dell'1% passa negli scambiatori da E303 a E301 dove viene riscaldato in controcorrente fino alla temperatura ambiente.
- Nell'ultima fase le impurità residue vengono trattenute nei PSA N₂/O₂ A302A e A302B. Le impurità sono ridotte a 1 ppm ed il gas può essere utilizzato per la liquefazione.
- La rigenerazione viene effettuata mediante rilascio della pressione nel sacco di recupero ed evacuazione gas elio puro.

Es: nuovo liquefattore elio @LNGS by Vorbuchner

Vecchio impianto
(~4 litri/h LHe)

Pallone di
recupero ~15 m³

Compressore
di recupero

High pressure
storage @200 bar
(960 m³ vs 2400 m³)



Nuovo impianto
(~18 litri/h LHe)
(~36 litri/h LHe con
LN2 precooling)

Es: nuovo liquefattore elio @LNGS by Vorbuchner

Vecchio impianto
(~4 litri/h LHe)



Compressore
di processo
a vite

Cold box

Dewar di raccolta LHe
(1000 litri vs 3000 litri)

Nuovo impianto
(~18 litri/h LHe)
(~36 litri/h LHe con
LN2 precooling)





Cicli rigenerativi



Crio refrigeratori rigenerativi

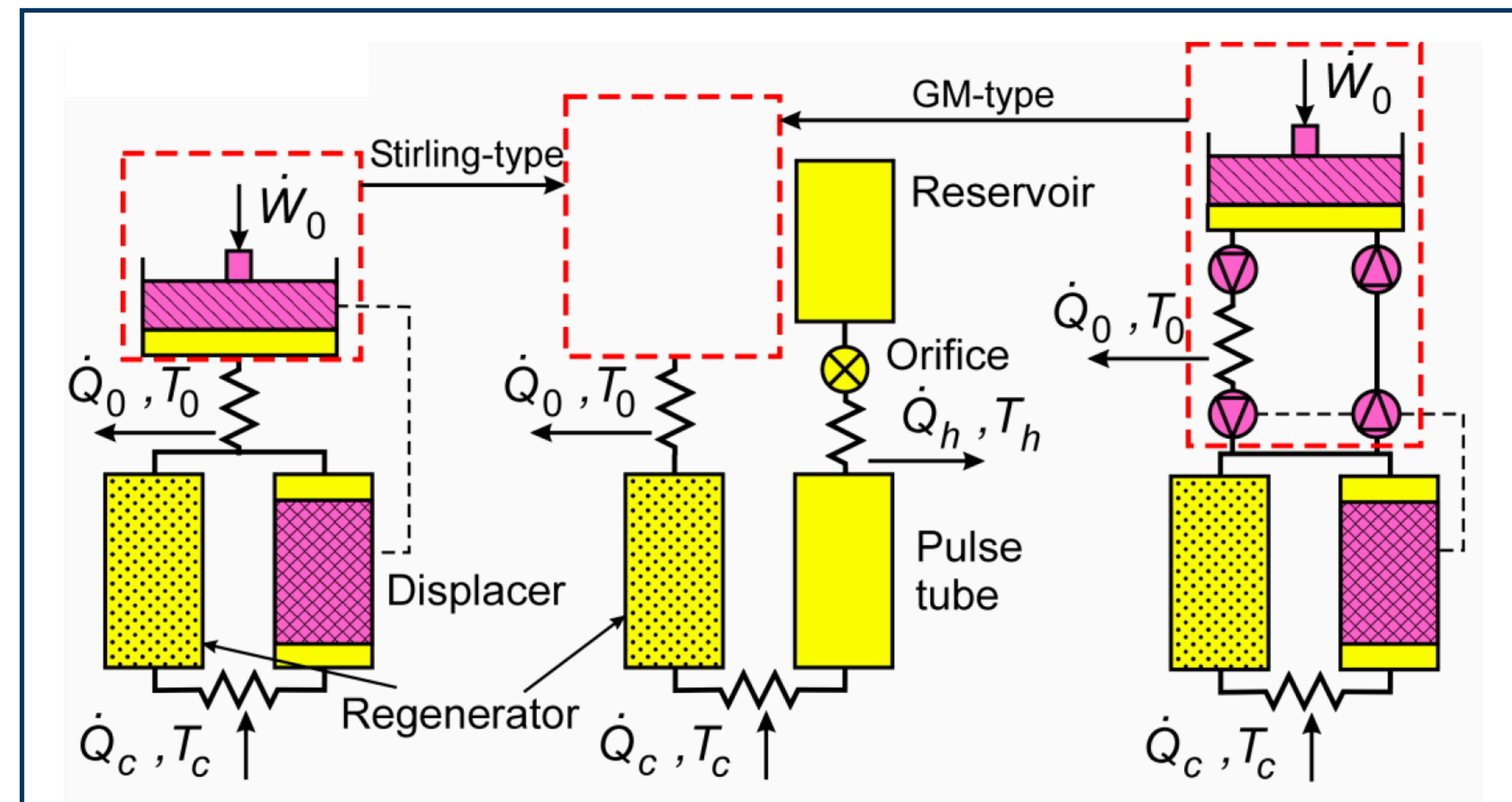
- Flusso di massa (e pressione) del fluido di lavoro (quasi sempre He) oscillante (analogo a sistemi elettrici AC)
- la stessa linea è usata alternatamente per alta e bassa pressione
- Basati sulla rigenerazione di uno **scambiatore di calore ad alta capacità termica ed alta conduttanza termica**, chiamato **rigeneratore**
 - 1a metà del ciclo: il calore è trasferito dal fluido di lavoro in ingresso al rigeneratore che lo accumula
 - 2a metà ciclo: il fluido in uscita di lavoro fluisce in direzione opposta, più freddo, assorbe il calore dal rigeneratore e lo porta fuori dal sistema
 - Alte efficienze con grandi aree di scambio, che si possono ottenere con stacked fine-mesh screen o packed spheres
- Generalmente usati per raffreddamento/pre-raffreddamento di altri sistemi

Principali cicli rigenerativi

Stirling

Pulse Tube

Gifford-McMahon



Crio-refrigeratori rigenerativi: compressori

Compressori ad alte performance per elio

- flusso e pressioni variabili possono essere generati da compressori:
 - a pistone senza valvole (**Stirling-type**)
 - convenzionali rotativi con valvole tra alta e bassa pressione del compressore (**GM-type**).
 - L'uso di valvole riduce l'efficienza del sistema ma aumenta l'affidabilità
- si usano **compressori per refrigerazione lubrificati ad olio e modificati per uso con elio** (riduzione dei costi)
- filtri per la rimozione dell'olio (**oil remover**) si possono mettere sulle linee di alta pressione dove l'oscillazione di pressione è minima (rimozione totale dell'olio, in modo da evitare che si ghiacci negli scambiatori e tappi il sistema)

*CTI-9600
per Gifford-McMahon*

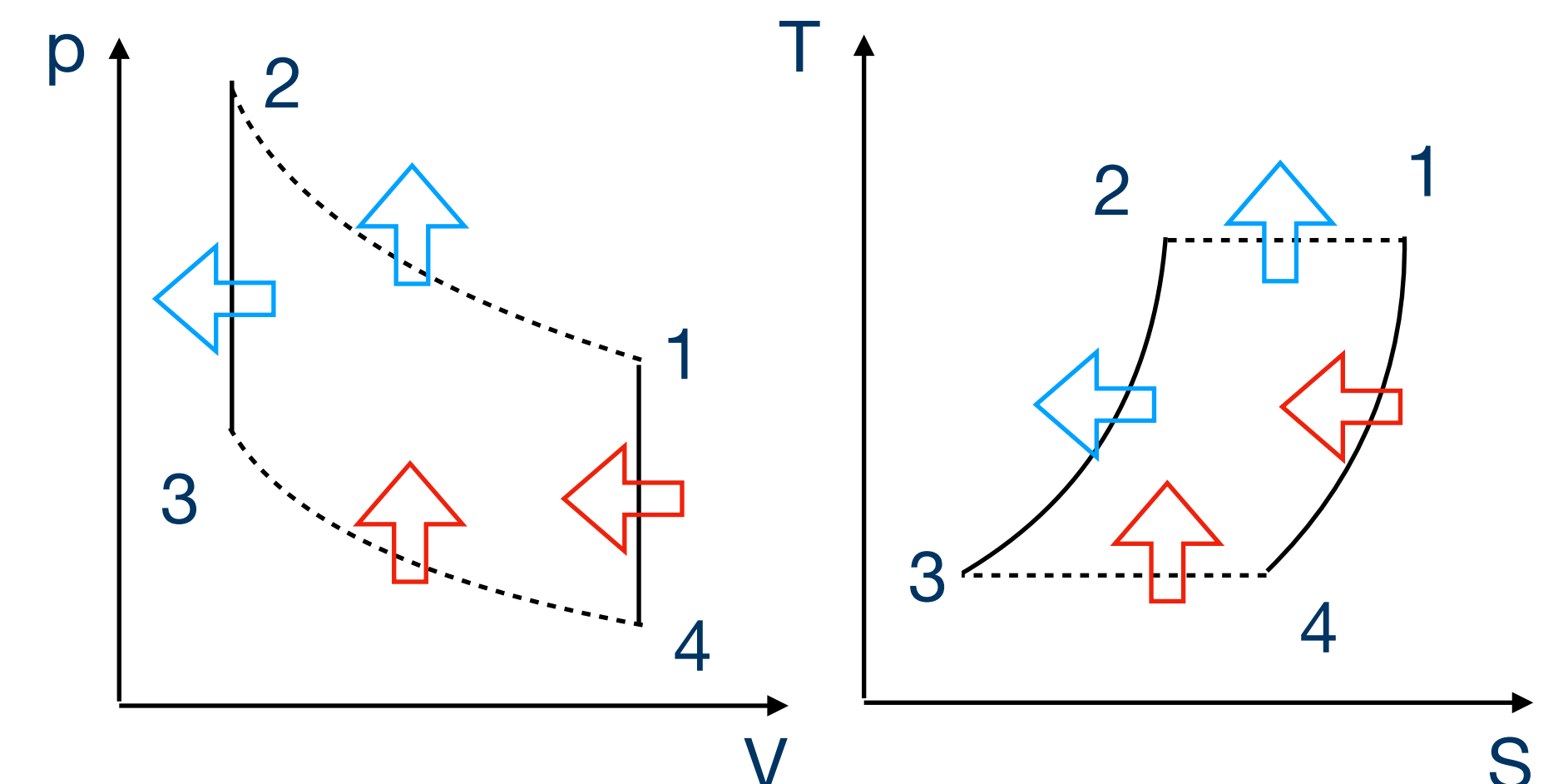
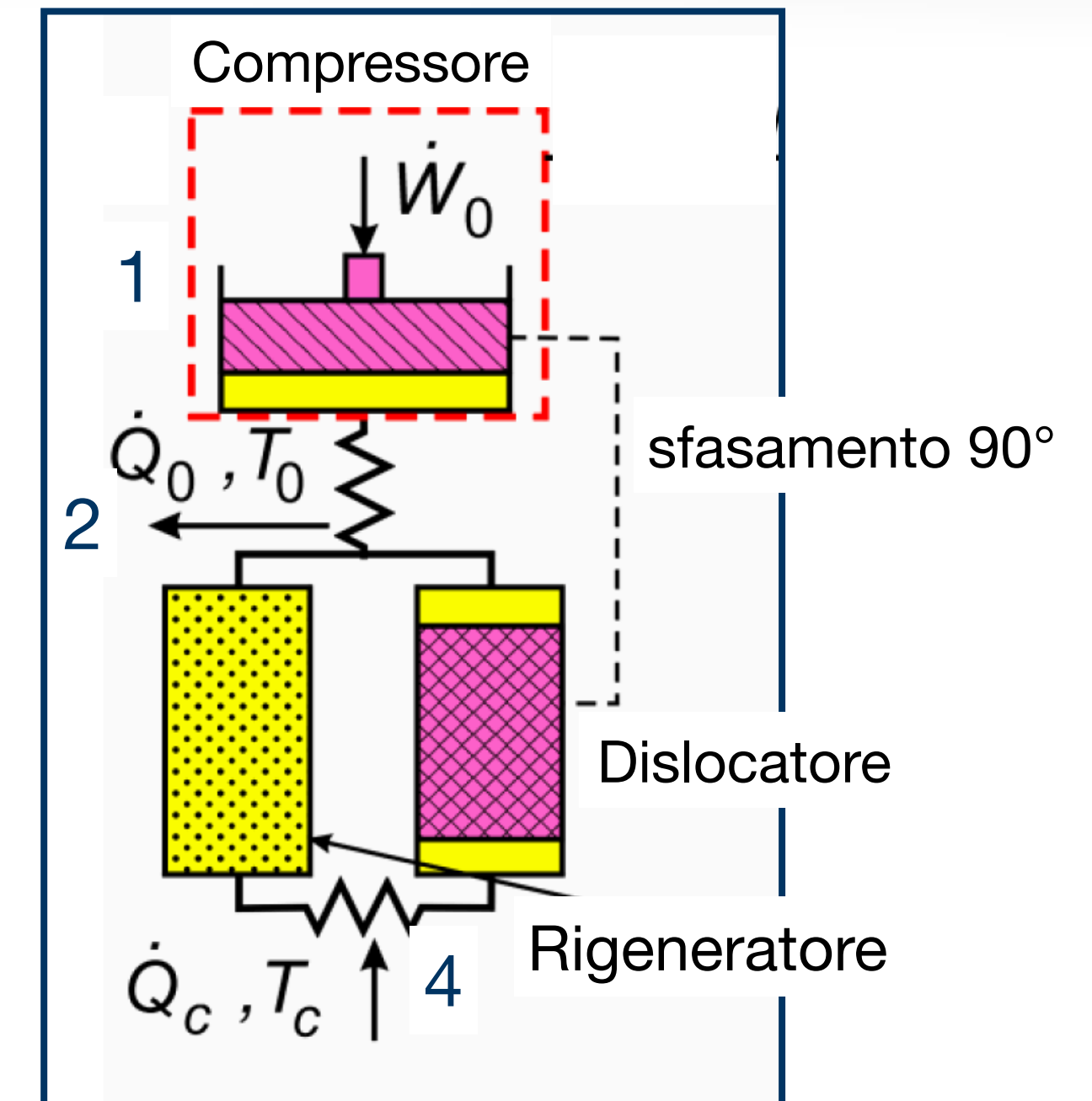


*CPA1114
per Pulse Tube*



Il ciclo Stirling inverso

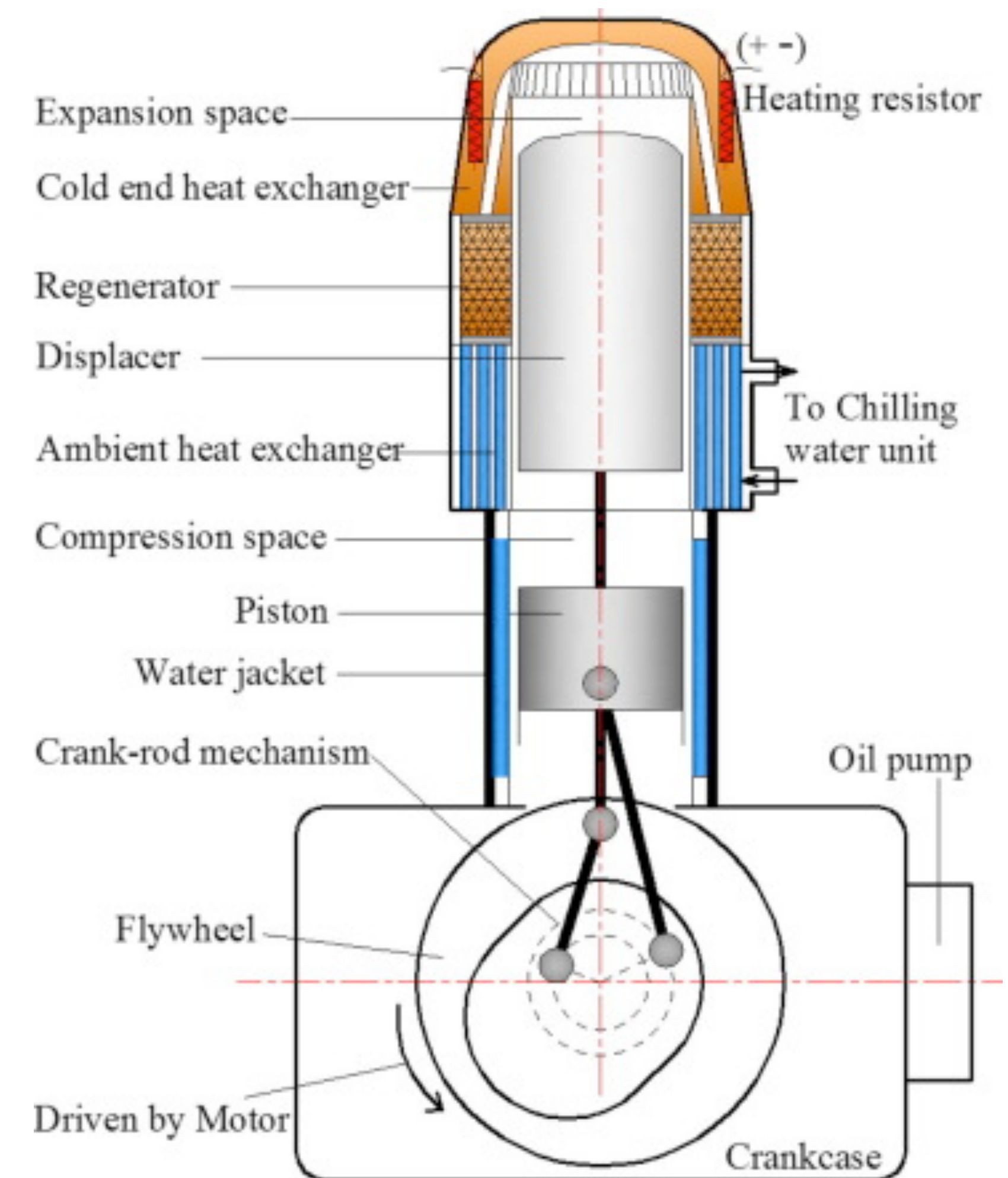
- Il ciclo Stirling fu inventato nel 1815 da Robert Stirling. Utilizzato solo verso la metà del XX secolo per liquefare l'aria e subito dopo per raffreddare i sensori a infrarossi per applicazioni militari tattiche.
- L'oscillazione di pressione è comandata dalla prima componente mobile, il **pistone del compressore**. Il ciclo di lavoro opera alla stessa frequenza del compressore (~20-100 Hz)
- Un'oscillazione di pressione in un sistema causerebbe di per sé semplicemente l'oscillazione della temperatura e non produrrebbe alcuna refrigerazione. Nel criorefrigeratore Stirling il secondo componente mobile, il **dislocatore**, è fondamentale per separare gli effetti di riscaldamento e raffreddamento provocando il movimento del gas nella corretta relazione di fase con l'oscillazione della pressione (90°).
- Ciclo Stirling MOLTO semplificato:
 - 1-2 compressione (idealmente isoterma): il pistone comprime il gas. L'energia della compressione è rimossa dallo scambio con l'ambiente (aftercooler). Il dislocatore è in basso.
 - 2-3 raffreddamento isocoro: il dislocatore si muove in alto e sposta il gas attraverso il rigeneratore (a cui cede il suo calore) verso la parte fredda del sistema
 - 3-4 espansione (idealmente isoterma): il pistone espande il gas e ne riduce ulteriormente l'energia. Il gas "raffreddato" assorbe calore dalla parte fredda del sistema (sample). Il dislocatore è in alto.
 - 4-1 riscaldamento isocoro: il dislocatore si muove verso il basso e forza il gas a spostarsi nella parte calda passando per il rigeneratore



Il refrigeratore Stirling

- Il volume del gas nel rigeneratore è sufficientemente grande da consentire a qualsiasi elemento gassoso di attraversare solo parzialmente il rigeneratore prima di invertire la direzione. Ciascun elemento gassoso assorbe calore vicino all'estremità fredda e lo restituisce più vicino all'estremità calda.
- I criorefrigeratori Stirling **solitamente hanno il rigeneratore interno al dislocatore** anziché esterno come mostrato in figura. Il cilindro singolo risultante fornisce un comodo dito freddo.
- Il movimento del pistone e del dislocatore è quasi sinusoidale e devono essere privi di olio per evitarne il congelamento nella parte fredda
- Fasatura corretta quando la variazione di volume nello spazio di espansione fredda anticipa la variazione di volume nello spazio di compressione caldo di circa 90° . **Il flusso attraverso il rigeneratore è (circa) in fase con la pressione** (in analogia con i sistemi elettrici AC, la potenza reale fluisce solo quando corrente e tensione sono in fase tra loro)
- Il dislocatore mobile estrae in modo reversibile il lavoro netto dal gas all'estremità fredda e lo trasmette all'estremità calda dove contribuisce in parte al lavoro di compressione. In un sistema ideale, con compressione ed espansione isotermica è un rigeneratore perfetto (il processo è reversibile). Pertanto, il **coefficiente di prestazione COP per il refrigeratore Stirling ideale è lo stesso del COP di Carnot**

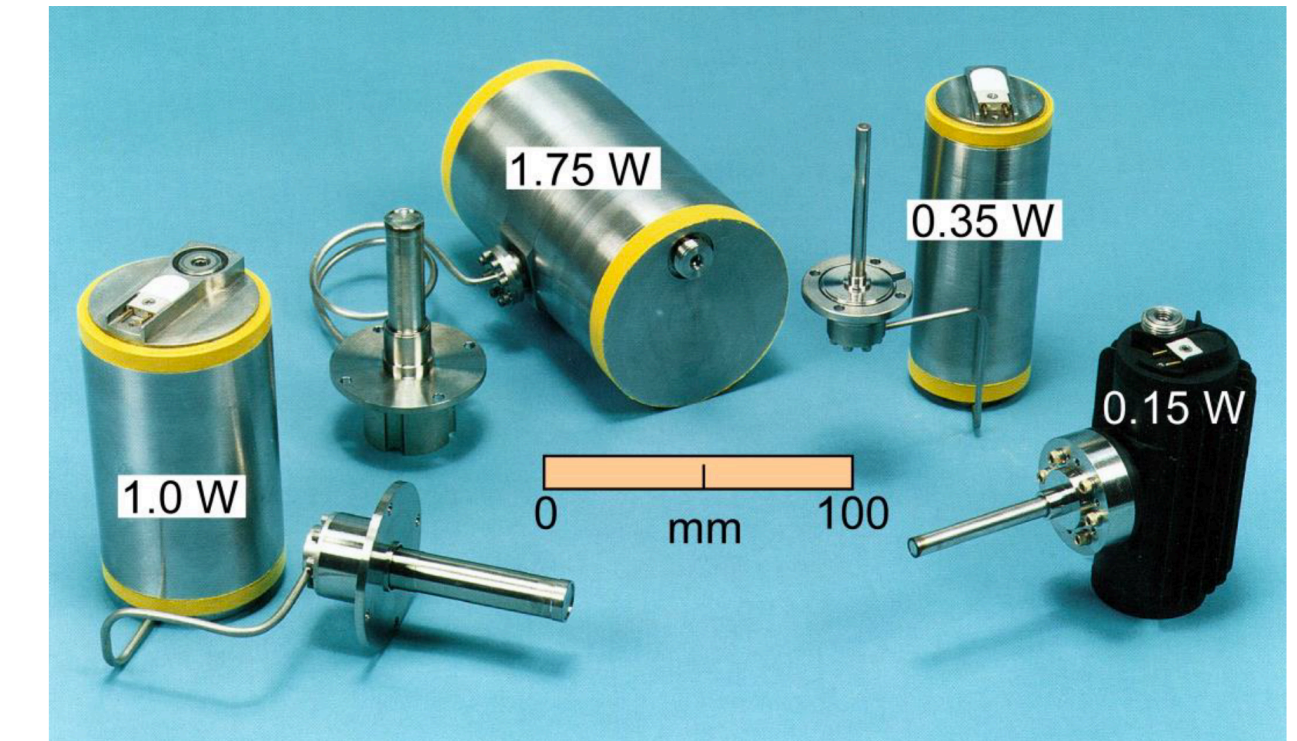
Schema di criorefrigeratore Stirling assiale a singola stadio da 700 W @ 77K



Il refrigeratore Stirling

- Non possono produrre raffreddamenti molto veloci come i JT, ma possono produrre grandi poteri frigoriferi, tra **50 e 6,000 Watt** nell'intervallo di temperatura 18-180 K
- Efficienza fino a **~30 % of Carnot @ 77 K**
- Possono avere anche più cilindri (tipicamente fino a 4) e più stadi (tipicamente fino a 2)
- Frequenza di lavoro tipica tra 20 e >100 Hz
- Dito freddo si può separare e posizionare non troppo lontano dal compressore
- Il displacer è comandato pneumaticamente dalla pressione oscillante del sistema ed è l'origine principale delle vibrazioni
- Uso di motori passo-passo (linear drive motors) per riduzione di forza laterale del pistone sul cilindro e “dual-opposed pistons”
- Riduzione delle vibrazioni e aumento del tempo di vita medio $\geq 10,000$ h
- Affidabilità media e rumore elettromagnetico importante
- I criorefrigeratori Stirling possono essere integrati in qualsiasi tipo di sistema criogenico, essere utilizzati come liquefatori di azoto, ossigeno, metano, argon, neon, ecc., o come raffreddamento per un flusso di gas elio o idrogeno o un flusso di liquido criogenico.

4 esempio di refrigeratori Stirling. I poteri frigoriferi sono @ 77-80 K (il sistema 1.75 W @ 67 K)

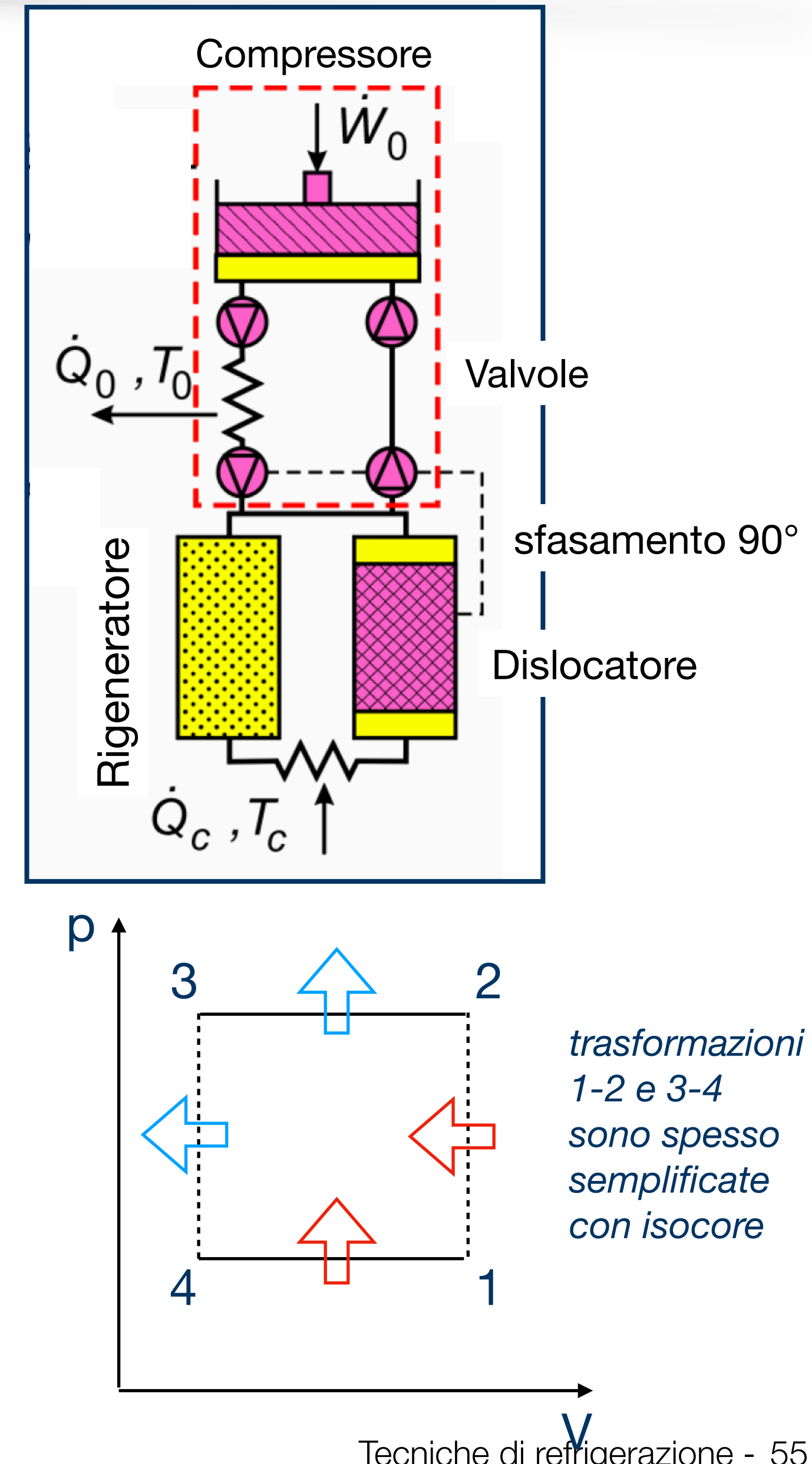


Criorefrigeratore Stirling SPC-4 a 4 cilindri da 0,8-11kW @ 40-160K



Il ciclo Gifford-McMahon

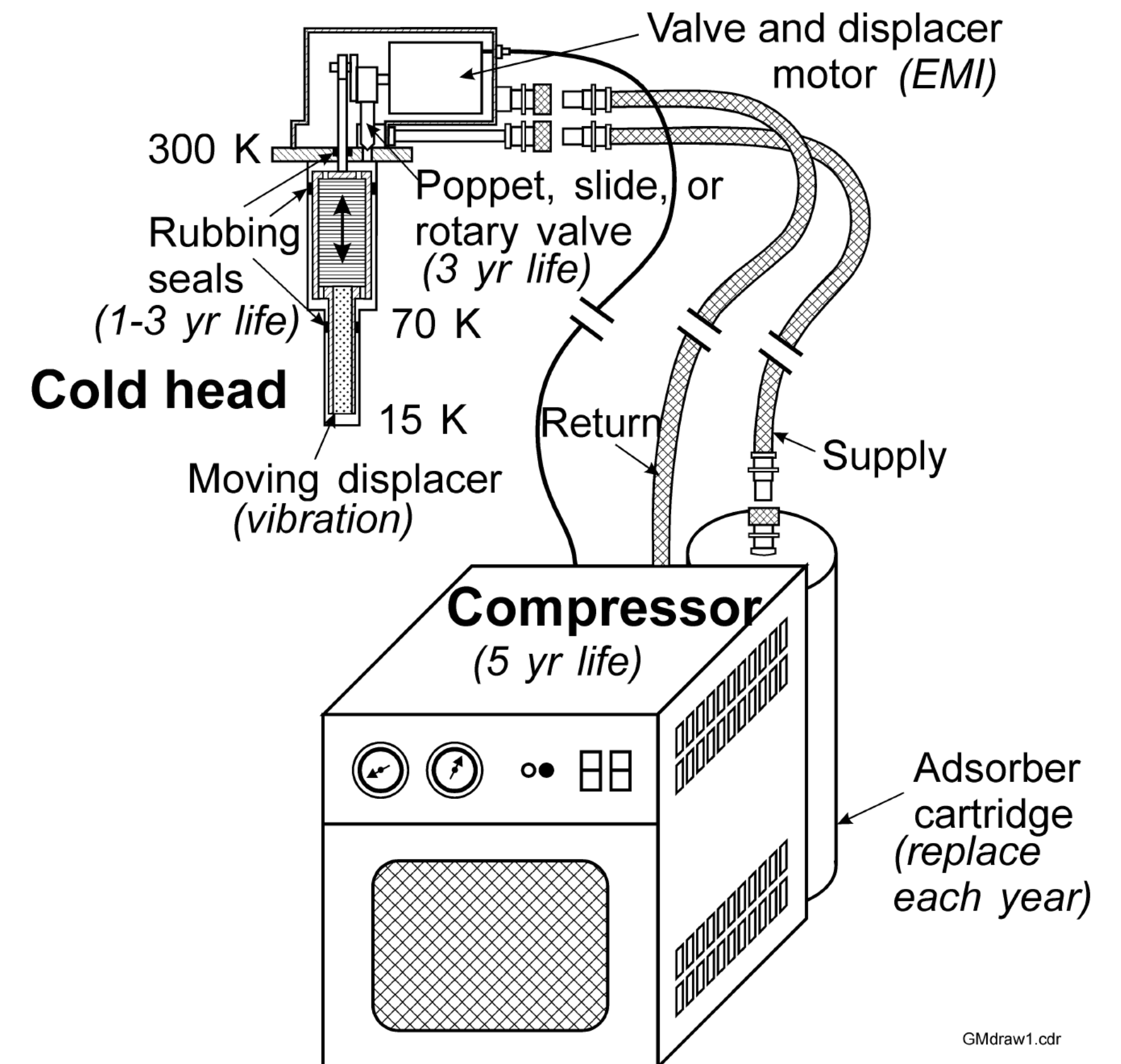
- Il ciclo Gifford-McMahon (GM) è stato sviluppato per la prima volta alla fine degli anni 50 (Gifford and McMahon, 1959) and (McMahon and Gifford, 1960)
- I criorefrigeratori GM utilizzano uno scambiatore di calore ad alta capacità per raggiungere temperature fino a 4 K senza aiuto di espansione JT
- L'oscillazione di pressione è comandata dalla valvola rotante, la cui presenza permette di disaccoppiare la frequenza di lavoro del ciclo (1-5 Hz) da quella del compressore, al costo di rendere il ciclo irreversibile (quindi meno efficiente)
- Il ciclo Gifford-McMahon, in maniera MOLTO semplificata:
 - 1-2 compressione (diverse trasformazioni in serie): le valvole si aprono sulla parte ad alta pressione del compressore, il gas entra nel cilindro, il compressore comprime il gas, temperatura e pressione aumentano. Il dislocatore è in basso
 - 2-3 raffreddamento isobaro: il dislocatore si muove verso l'alto, il gas passa attraverso il rigeneratore e si raffredda cedendo calore prima all'aftercololer e poi al rigeneratore e riempiendo lo spazio sotto il dislocatore a contatto con la parte fredda
 - 3-4 espansione adiabatica (al limite isentropica): la valvola del compressore si apre sulla parte a bassa pressione, quindi il gas si raffredda ulteriormente mentre si trova nella parte fredda del sistema. Il dislocatore è in alto.
 - 4-1 riscaldamento isobaro: il gas più freddo assorbe calore dal sample, e poi il dislocatore si muove verso il basso e spinge il gas indietro attraverso rigeneratore dove assorbe il calore dal rigeneratore, prima di arrivare all'estremità calda



Il ciclo Gifford-McMahon

- I criorefrigeratori GM utilizzano uno scambiatore di calore ad alta capacità, il costo dei cui materiali incide molto sul prezzo finale di una macchina GM
- I GM usano compressori lubrificati ad olio, la cui rimozione è a carico di adsorbers sulla linea di alta pressione.
- Il compressore può essere posizionato diversi metri lontano dalle valvole, poichè la pressione non oscilla molto in queste linee
- Sono comunemente usati in versioni a due stadi con temperature di base di ~15 K per impiego in criopompe (es: industria fabbricazione semiconduttori).
- Il costo può variare dai 10 k€ ai 50 k€. Macchine a singolo stadio possono raggiungere temperature non più basse di 30 K e sono più economiche.
- Il potere frigorifero a 80 K varia in genere tra i 10 W ed i 600 W, con potenze elettriche in ingresso tra gli 800 W e i 14 kW. Oggi si trovano in commercio GM che raggiungono i 4 K, con 0.1 W-2 W di potere frigorifero a 4.2 K
- I compressori vivono a lungo (>10 anni), ma le cartucce degli adsorbers vanno cambiate ogni 2-3 anni, così come le guarnizioni del dislocatore.

Layout and typical lifetimes of components.



Es: il "Fast Cooling System" dell'esperimento CUORE

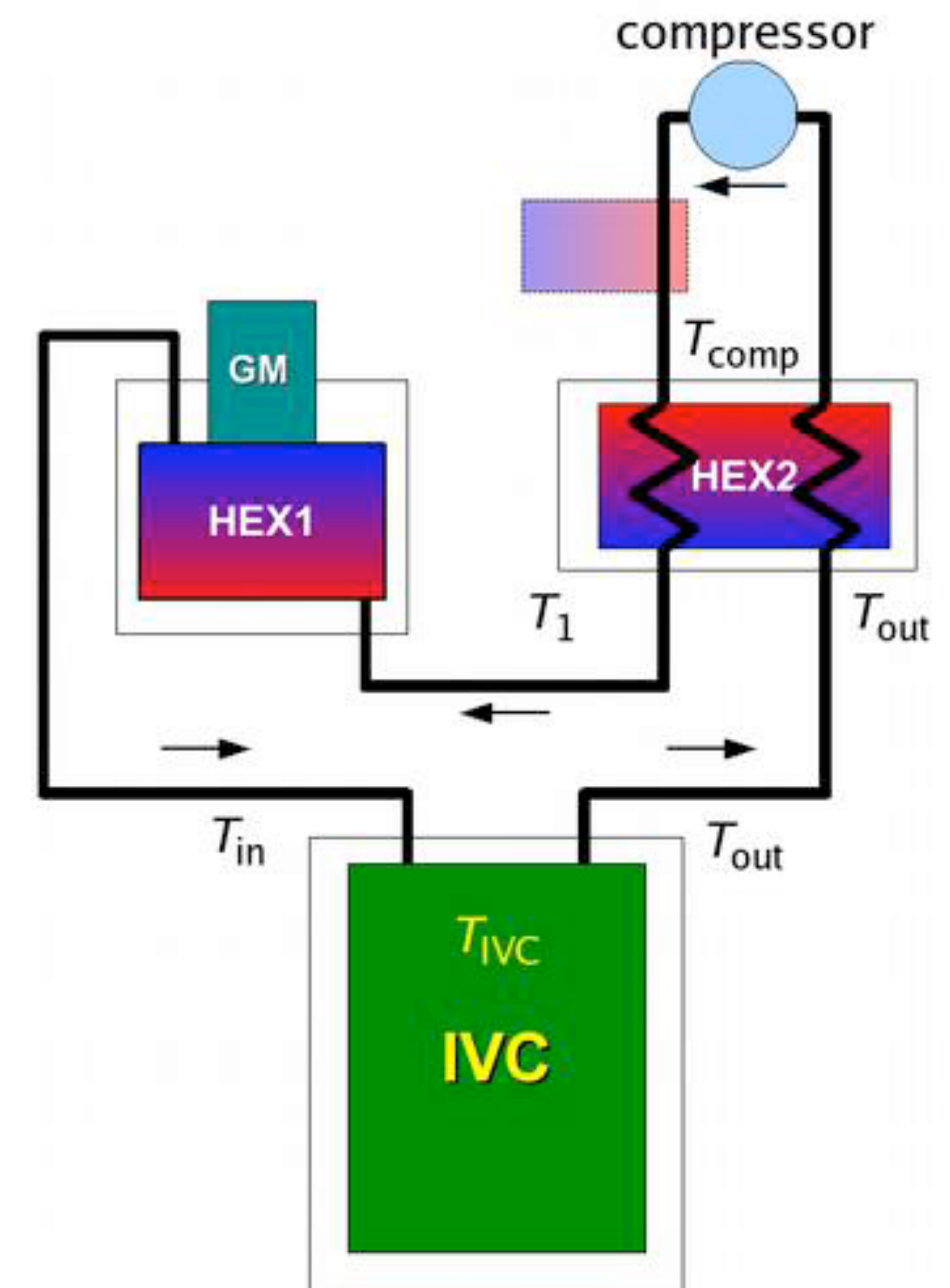
Sistema di preraffreddamento del criostato di CUORE (vedi dopo)

- Criostato esterno equipaggiato con:
 - 3 Gifford-McMahon AL600 (580 W @ 80K, 100W @ 30K each)
 - 3 heat exchangers
 - Moduli di filtraggio
- "Blower" per forzare la circolazione di elio gassoso freddo (fino a ~8 g/s) nella camera da vuoto più interna (IVC) del criostato di CUORE
- Raffreddamento fino a 75 K, poi solo Pulse Tube

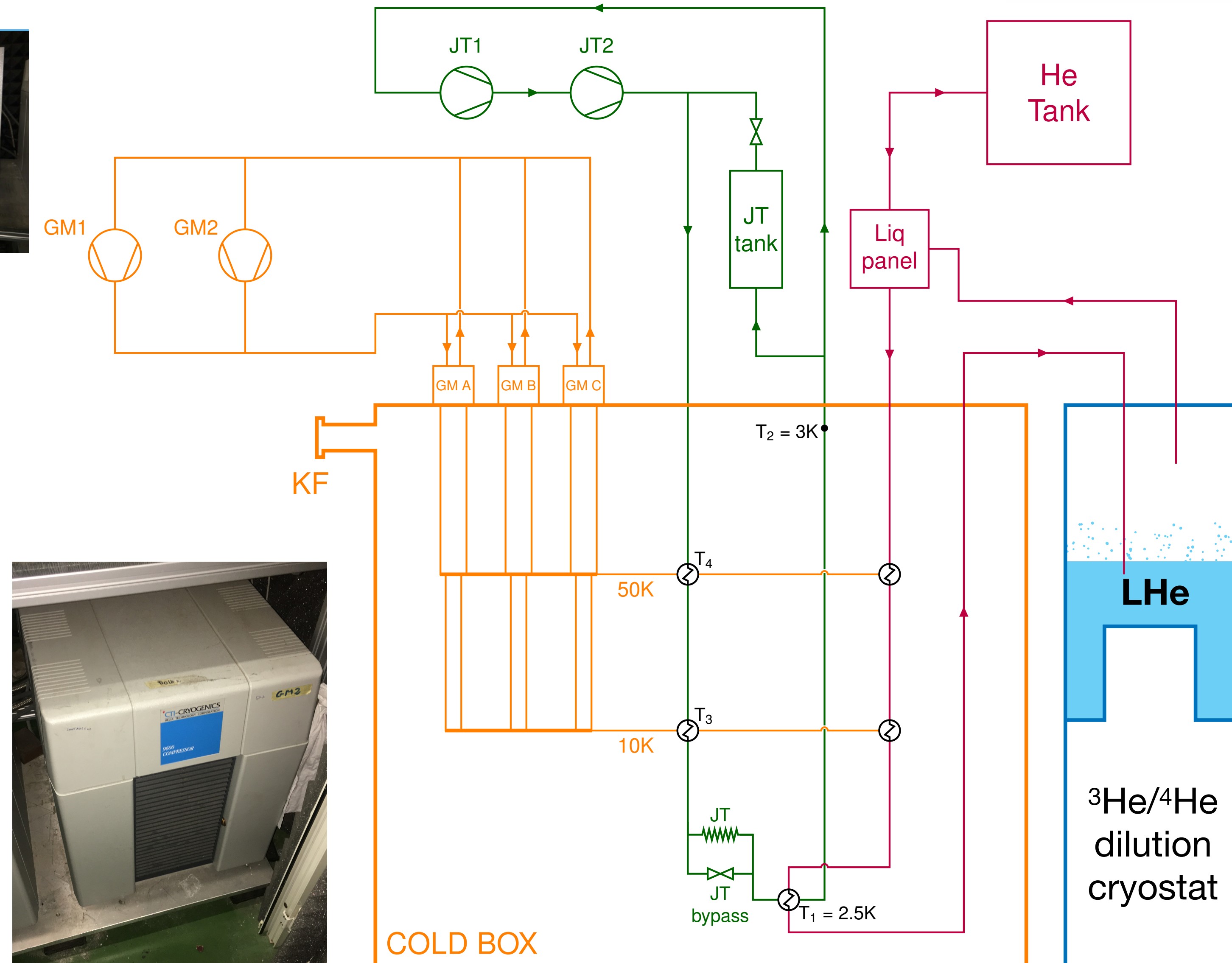
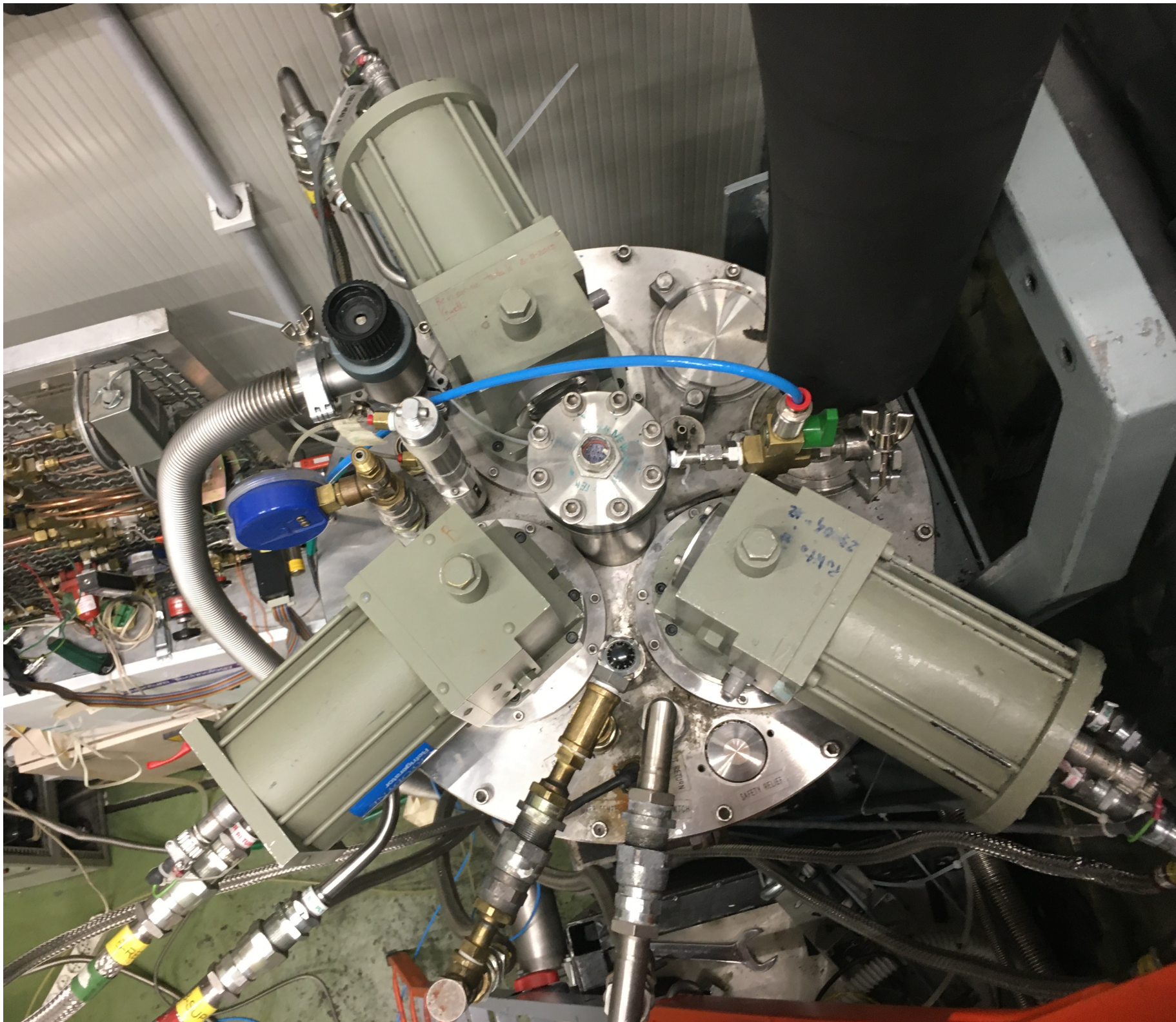
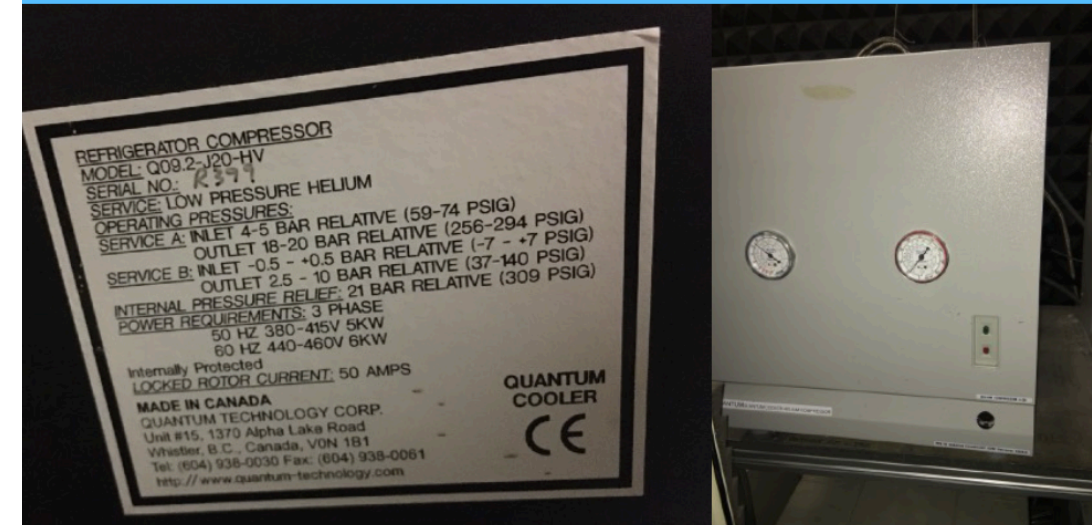
Rendering del FCS di CUORE



Schema di funzionamento del FCS di CUORE

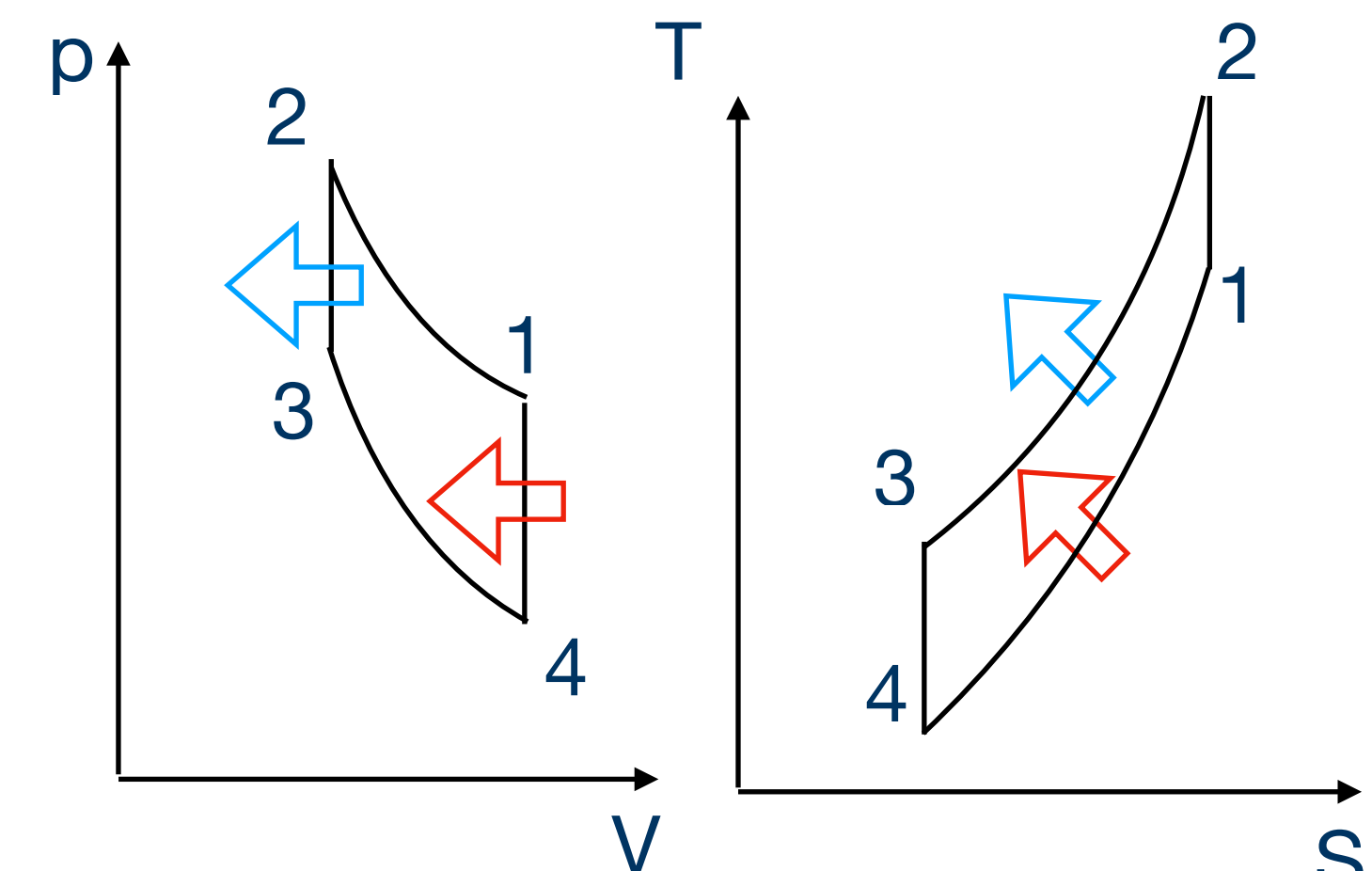
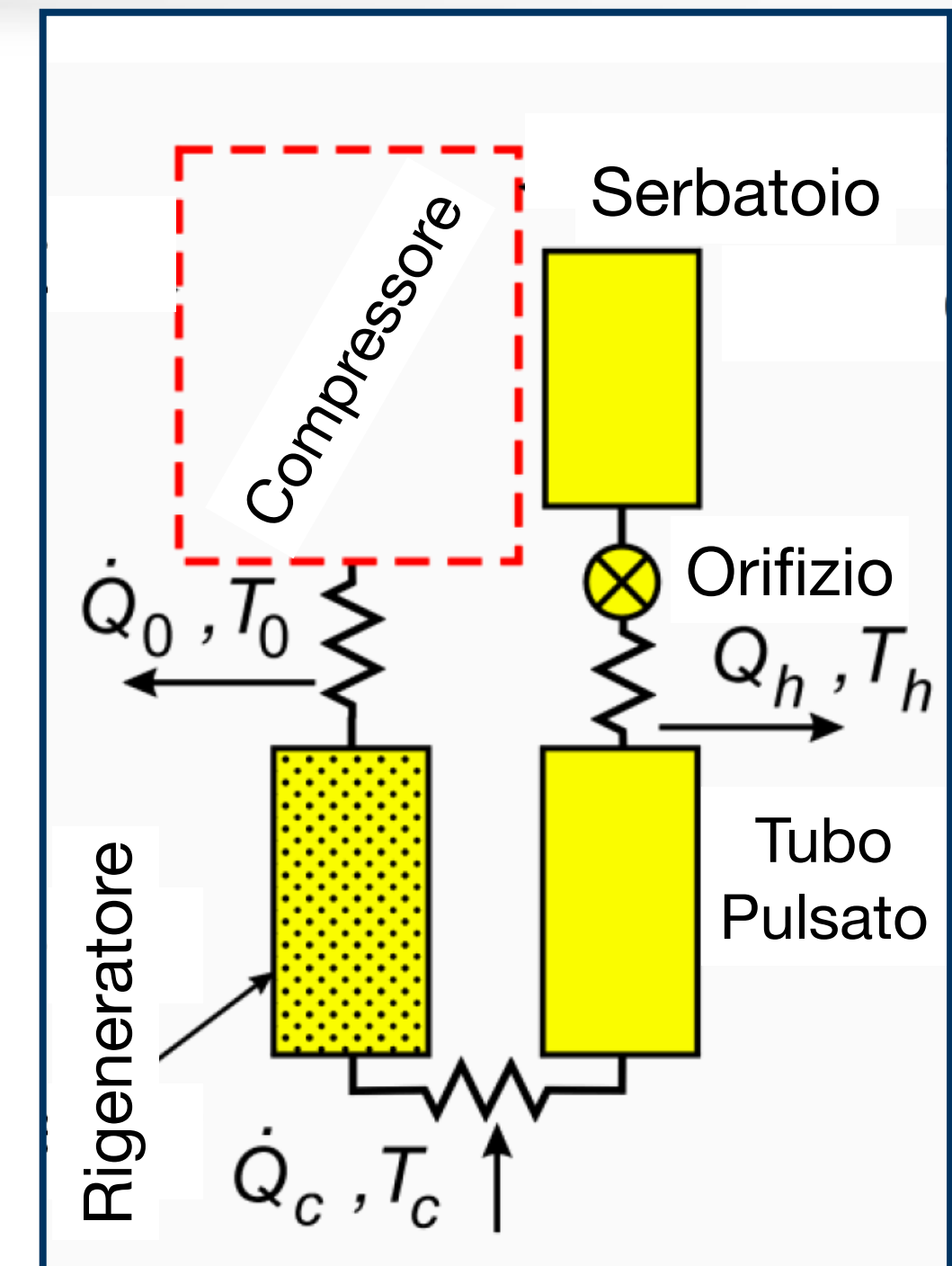


Es: liquefattore di elio basato su GM e JT @ LNGS



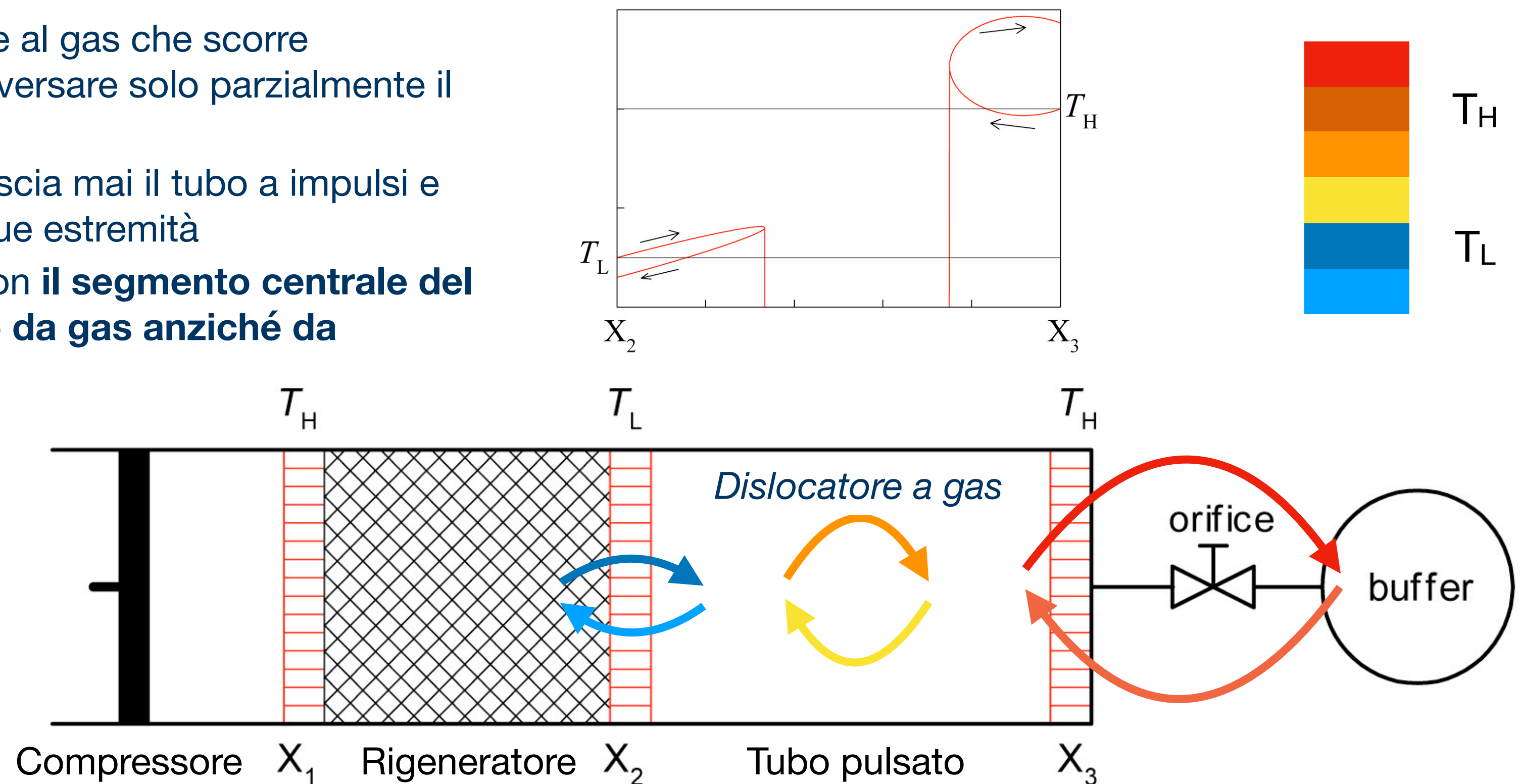
Il ciclo Pulse Tube

- I refrigeratori a tubo pulsato (Pulse Tube) furono inventati da Gifford e Longsworth nel 1964, raggiungendo una bassa temperatura di 124 K
- Nel 1984 Mikulin introdusse il concetto di orifizio e raggiunse i 105 K. Nel 1985 Radebaugh cambiò la posizione dell'orifizio in quella mostrata in figura e raggiunse i 60 K.
- Ulteriori miglioramenti da allora hanno portato ad un limite di bassa temperatura di circa 20 K con uno stadio e 2 K con due stadi.
- Il ciclo PT in versione MOLTO semplificata:
 - 1-2 compressione adiabatica (a limite isoentropica): Il pistone si abbassa (o la valvola di alta pressione si apre) per comprimere il gas (elio) nel tubo pulsato. Temperatura e pressione aumentano.
 - 2-3 raffreddamento isocoro: **il gas compresso e riscaldato**, scorre attraverso (il rigeneratore) l'orifizio nel serbatoio (dove p è più bassa) e **cede calore all'ambiente** (al rigeneratore) attraverso lo scambiatore di calore all'estremità calda del tubo pulsato. Il flusso si interrompe quando la pressione nel tubo pulsato viene ridotta al valore medio.
 - 3-4 espansione adiabatica (al limite isoentropica): il pistone si alza (o la valvola di bassa pressione si apre) ed espande adiabaticamente il gas nel tubo a impulsi. La pressione e la temperatura diminuiscono.
 - 4-1: riscaldamento isocoro: **il gas freddo e a bassa pressione** nel tubo pulsato **assorbe calore dal sample** prima di essere spinto oltre l'estremità fredda dal flusso di gas proveniente dal serbatoio attraverso l'orifizio (il rigeneratore). Il flusso si interrompe quando la pressione nel tubo pulsato aumenta fino a raggiungere la pressione media.



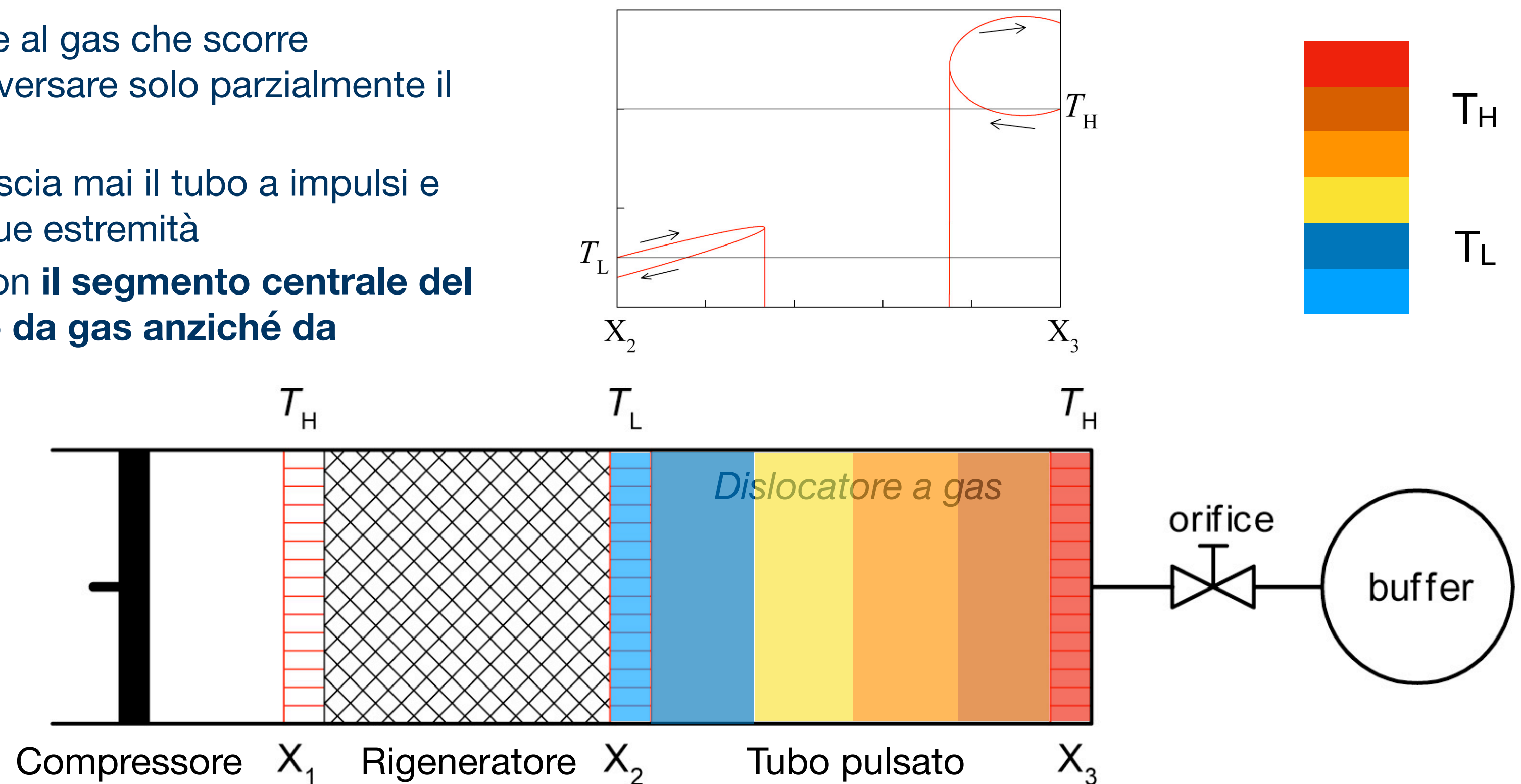
Principio di funzionamento del tubo pulsato

- Il PT con orifizio (OPTR) funziona idealmente con compressione ed espansione adiabatica nel cilindro, che prende il nome di “tubo pulsato”
- Per una data frequenza esiste un limite inferiore al diametro del tubo pulsato per mantenere i processi adiabatici.
- Una funzione del tubo pulsato è quella di isolare i processi alle sue due estremità:
 - deve essere sufficientemente grande da consentire al gas che scorre dall'estremità calda o dall'estremità fredda di attraversare solo parzialmente il tubo a impulsi prima che il flusso venga invertito
 - il gas nella parte centrale del tubo a impulsi non lascia mai il tubo a impulsi e forma un **gradiente di temperatura** che isola le due estremità
 - il gas nel tubo a impulsi è diviso in tre segmenti, con **il segmento centrale del gas agisce come un dislocatore ma è costituito da gas anziché da materiale solido**
- Affinché questo **dislocatore a gas** possa isolare efficacemente le due estremità del tubo pulsato, la turbolenza al suo interno deve essere ridotta al minimo (“stiramento” del flusso alle due estremità è fondamentale per il buon funzionamento del PT, di solito ottenuto tramite griglie a nido d’ape)



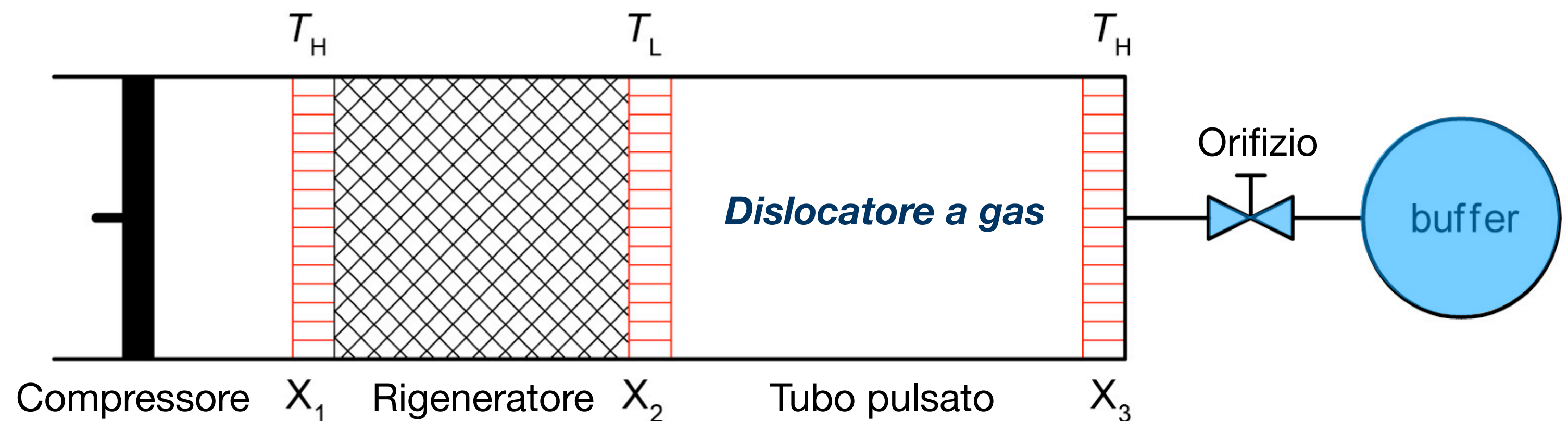
Principio di funzionamento del tubo pulsato

- Il PT con orifizio (OPTR) funziona idealmente con compressione ed espansione adiabatica nel cilindro, che prende il nome di “tubo pulsato”
- Per una data frequenza esiste un limite inferiore al diametro del tubo pulsato per mantenere i processi adiabatici.
- Una funzione del tubo pulsato è quella di isolare i processi alle sue due estremità:
 - deve essere sufficientemente grande da consentire al gas che scorre dall'estremità calda o dall'estremità fredda di attraversare solo parzialmente il tubo a impulsi prima che il flusso venga invertito
 - il gas nella parte centrale del tubo a impulsi non lascia mai il tubo a impulsi e forma un **gradiente di temperatura** che isola le due estremità
 - il gas nel tubo a impulsi è diviso in tre segmenti, con **il segmento centrale del gas agisce come un dislocatore ma è costituito da gas anziché da materiale solido**
- Affinché questo **dislocatore a gas** possa isolare efficacemente le due estremità del tubo pulsato, la turbolenza al suo interno deve essere ridotta al minimo (“stiramento” del flusso alle due estremità è fondamentale per il buon funzionamento del PT, di solito ottenuto tramite griglie a nido d’ape)



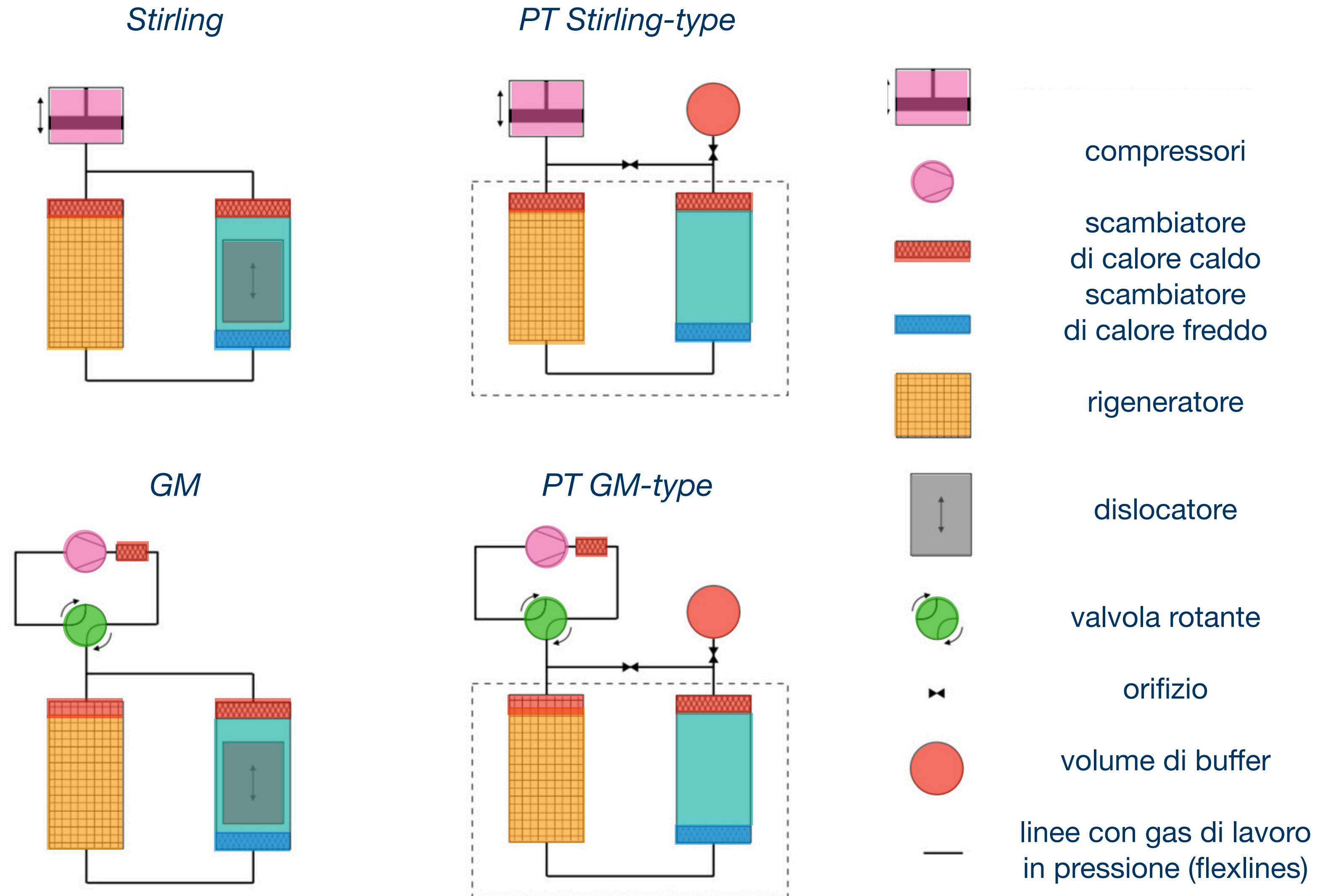
Confronto tra PT vs Stirling/GM

- Nel criorefrigeratore PT il **dislocatore è eliminato**. Il corretto movimento del gas in fase con la pressione si ottiene attraverso l'**uso di un orifizio**, insieme a un **serbatoio di buffer** per immagazzinare il gas durante un semiciclo:
 - assenza di parti meccaniche mobili a freddo
 - livello di vibrazioni più basso
 - più affidabile e manutenzione meno frequente
- Il flusso attraverso l'**orifizio** fa sì che il movimento del gas all'estremità fredda sia simile a quello che si verifica in un criorefrigeratore Stirling o GM a causa del movimento del dislocatore
- Anche il **serbatoio di buffer** gioca un ruolo importante:
 - volume sufficientemente grande da far sì che al suo interno si verifichino oscillazioni di pressione trascurabili mentre il flusso oscilla
 - la caduta di pressione attraverso l'orifizio è semplicemente la pressione dinamica nel tubo pulsato
 - il flusso oscillante attraverso l'orifizio separa gli effetti di riscaldamento e raffreddamento proprio come fa il dislocatore nelle Stirling e GM, **con la differenza che nel PT il flusso è in fase con la pressione sull'orifizio piuttosto che nel rigeneratore** (caso ideale per un dislocatore)
- Il dislocatore mobile nei criorefrigeratori Stirling e GM presenta diversi svantaggi:
 - conduzione del calore assiale e a heat leaks
 - fonte di vibrazioni
 - durata limitata



Tipologia di PT

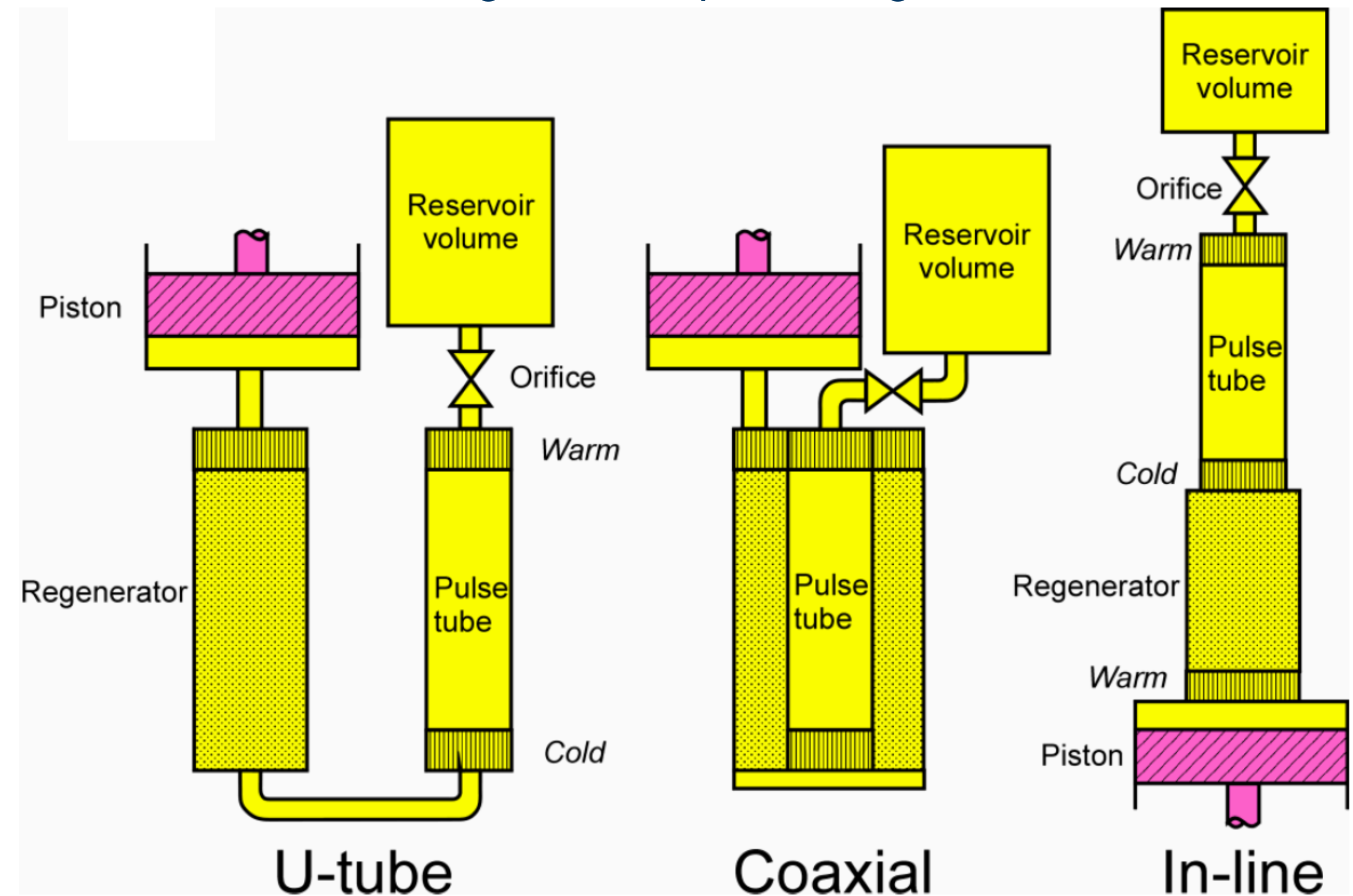
- Il refrigeratore a Pulse Tube si differenzia dalle macchine Stirling e GM per:
 - l'assenza del dislocatore, il cui ruolo è giocato dal movimento del gas stesso
 - la presenza del volume di buffer e dell'orifizio
- Se il refrigeratore a Pulse Tube opera con un compressore alternativo (es. a pistone) quindi senza l'utilizzo di valvole, si parla di **PT di tipo Stirling**
- Se il refrigeratore a Pulse Tube opera con un compressore rotativo (es. a vite) quindi con l'ausilio di valvole, si parla di **PT di tipo GM**



Geometrie per PT

- La disposizione **in linea** è la più efficiente perché non richiede spazio vuoto all'estremità fredda per invertire la direzione del flusso né introduce turbolenza nel tubo pulsato a causa dell'inversione del flusso. Lo svantaggio è la scomodità di avere la regione fredda situata tra le due estremità calde.
- La disposizione più compatta e quella che più si avvicina alla geometria del criorefrigeratore Stirling è la disposizione **coassiale**. Questa geometria presenta il potenziale problema di una mismatch dei profili di temperatura nel rigeneratore e nel tubo pulsato che porta ad un flusso di calore costante tra i due componenti e a un'efficienza ridotta. (es. NIST liquefattore O₂ per la NASA, efficienza del 17% di Carnot)
- Il compromesso più utilizzato e largamente diffuso è la **geometria a U**

Diverse geometrie per i refrigeratori a PT



Esempi di Pulse Tube

Primo PT (GM-type) commerciale



PT (Stirling-type) ad alta efficienza per applicazioni spaziali



Es: Pulse Tubes by Cryomech

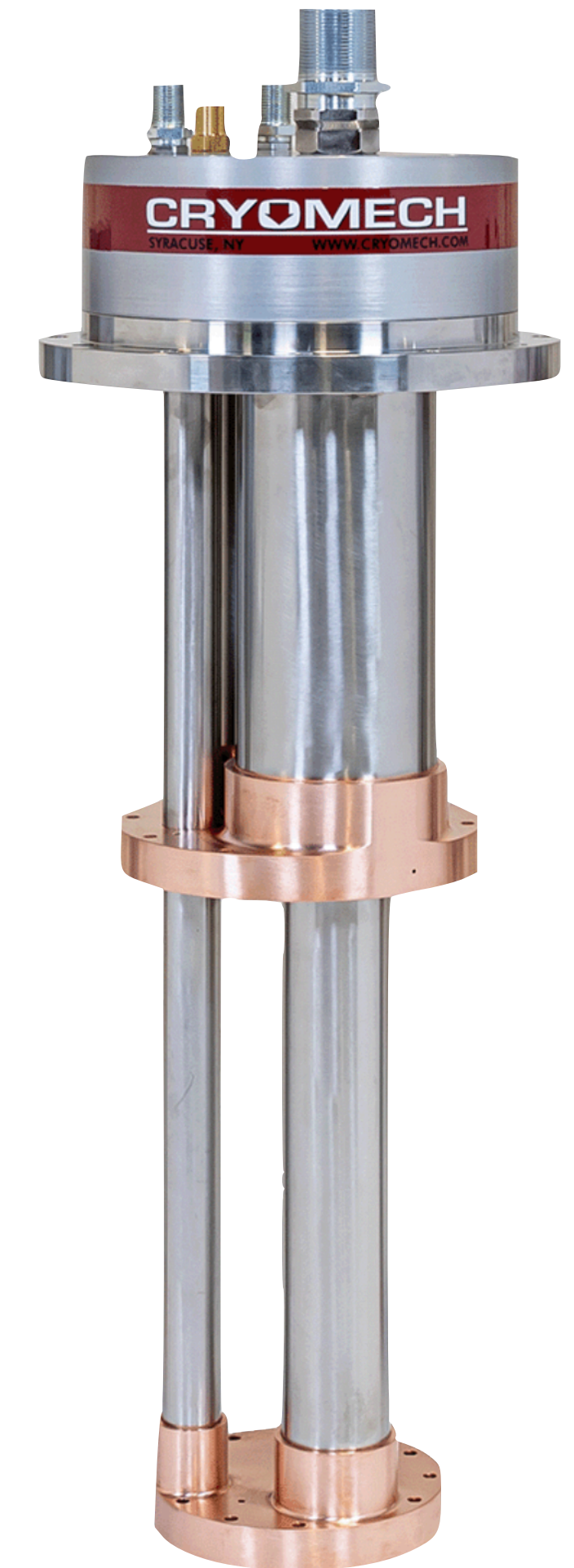
PT 425 by Cryomech (2.7 W @ 4.2 K)



*PT 425-RM by Cryomech (2.35 W @ 4.2 K)
con preraffreddamento linea di iniezione
3He/4He per criostato a diluizione*

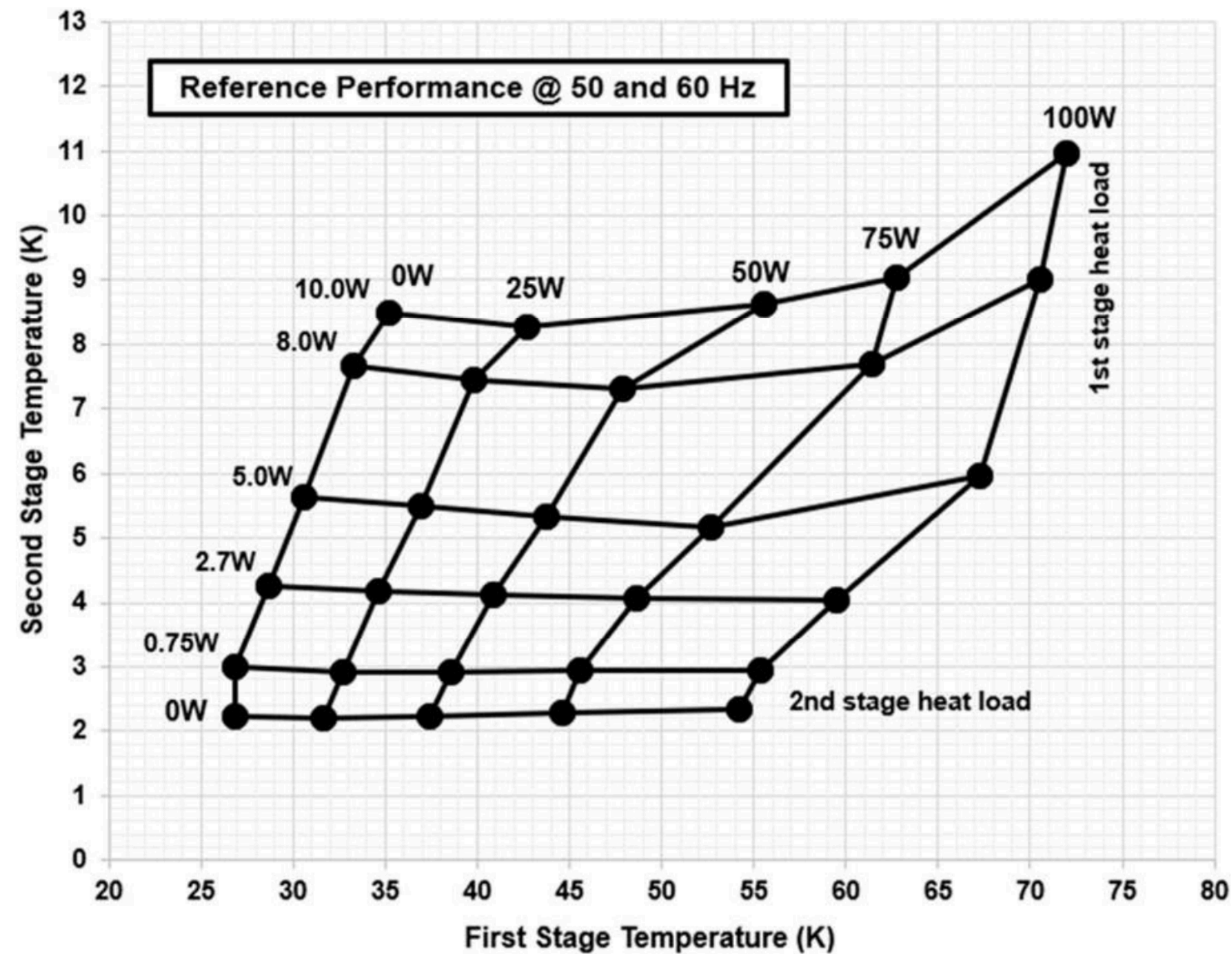


*PT 450 by Cryomech
(5 W @ 4.2 K, 65 W @ 45K)
“il più potente PT in circolazione”*



Es: Pulse Tubes by Cryomech

PT 425 by Cryomech



Certified Performance: 0 W $\leq$ 2.8K
 2.7 W @ 4.2 K with 55 W @ 45K

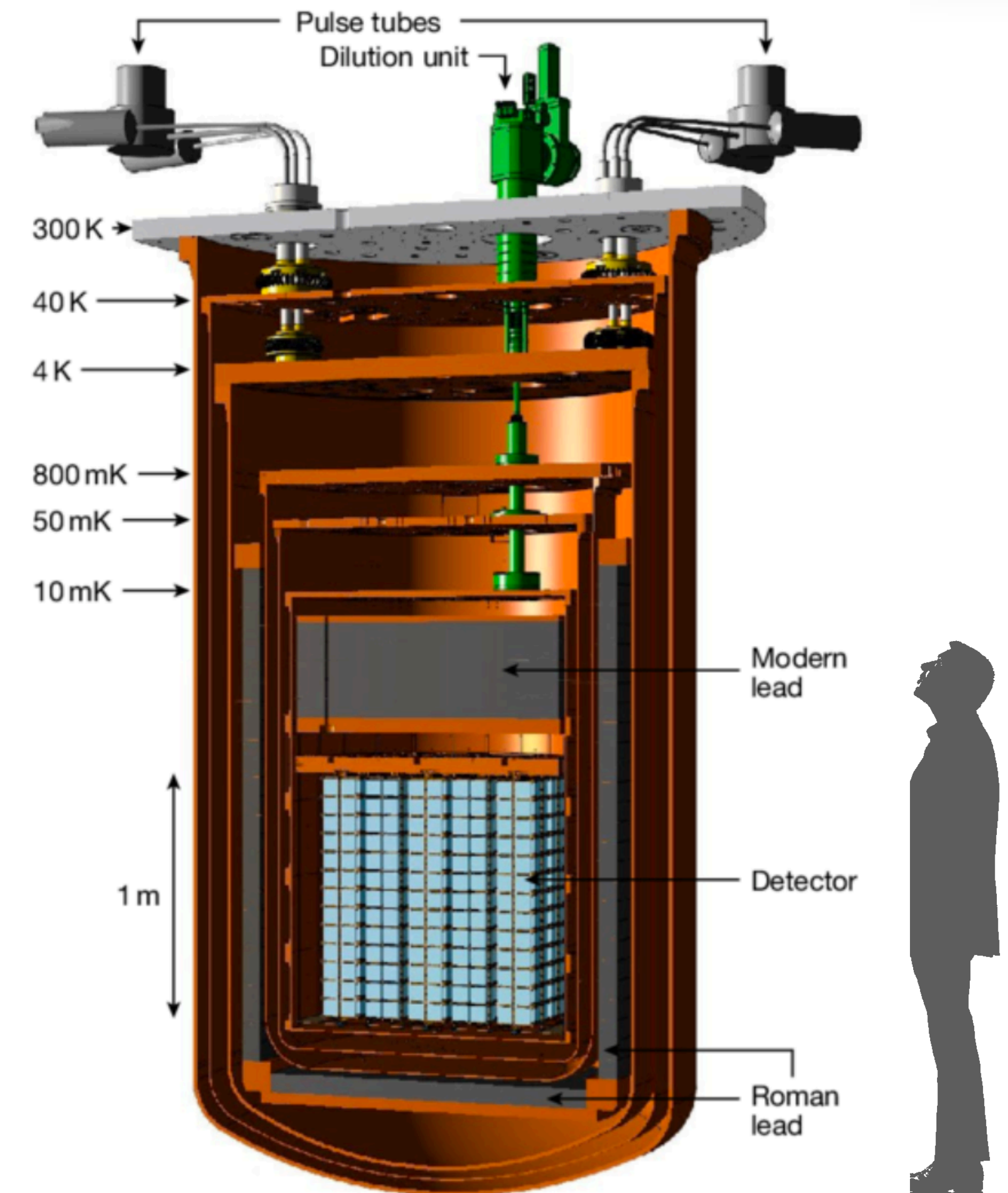
Il criostato di CUORE @ LNGS

La sfida tecnologica di CUORE:

operare ~**1 ton** di rivelatore a **10 mK** per **5 anni**
in ambiente a **vibrazioni estremamente ridotte**

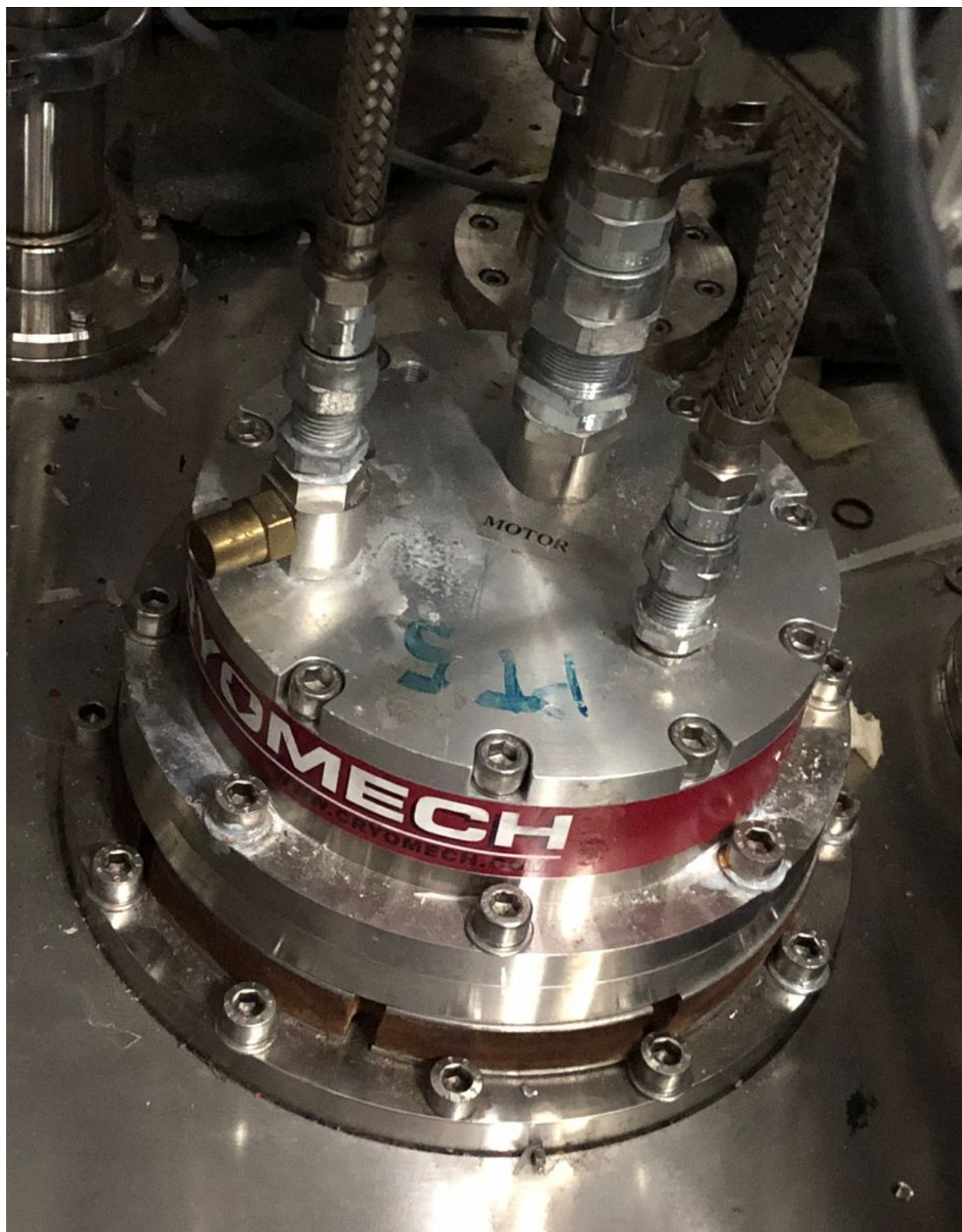
Il più grande e potente criostato a diluizione al mondo

- temperatura di base 10 mK
- entalpia totale da rimuovere 10^9 J
- Potere frigorifero
 - 3 GM** (580 W @ 80 K each) **1.74 kW @ 80 K**
 - 4(+1) PT** (1.35 W @ 4.2 K each) **4.7 W @ 4.2 K**
 - diluizione $^3\text{He}/^4\text{He}$ (120 stp ^3He) **4 μW @ 10 mK**
- Massa totale del criostato: ~30 tons
 - $\leq 4\text{K}$ ~15 tons
 - $\leq 50\text{ mK}$ ~3 tons
 - $\sim 10\text{ mK}$ ~1 ton



Ridurre le vibrazioni dei PT: es. CUORE

Testa @300K
di uno dei PT di CUORE



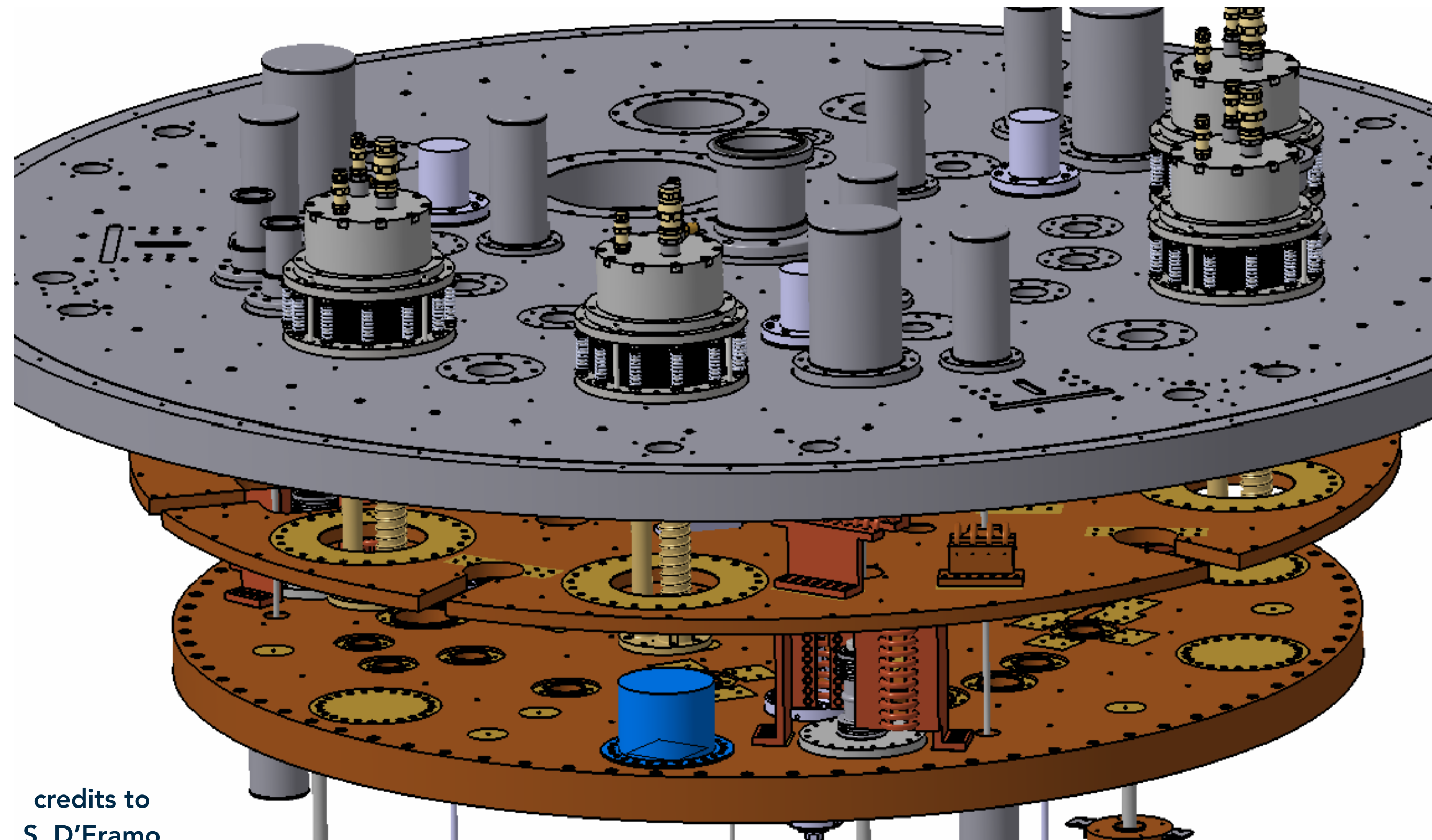
Collari anti-vibrazioni



Sliding seals

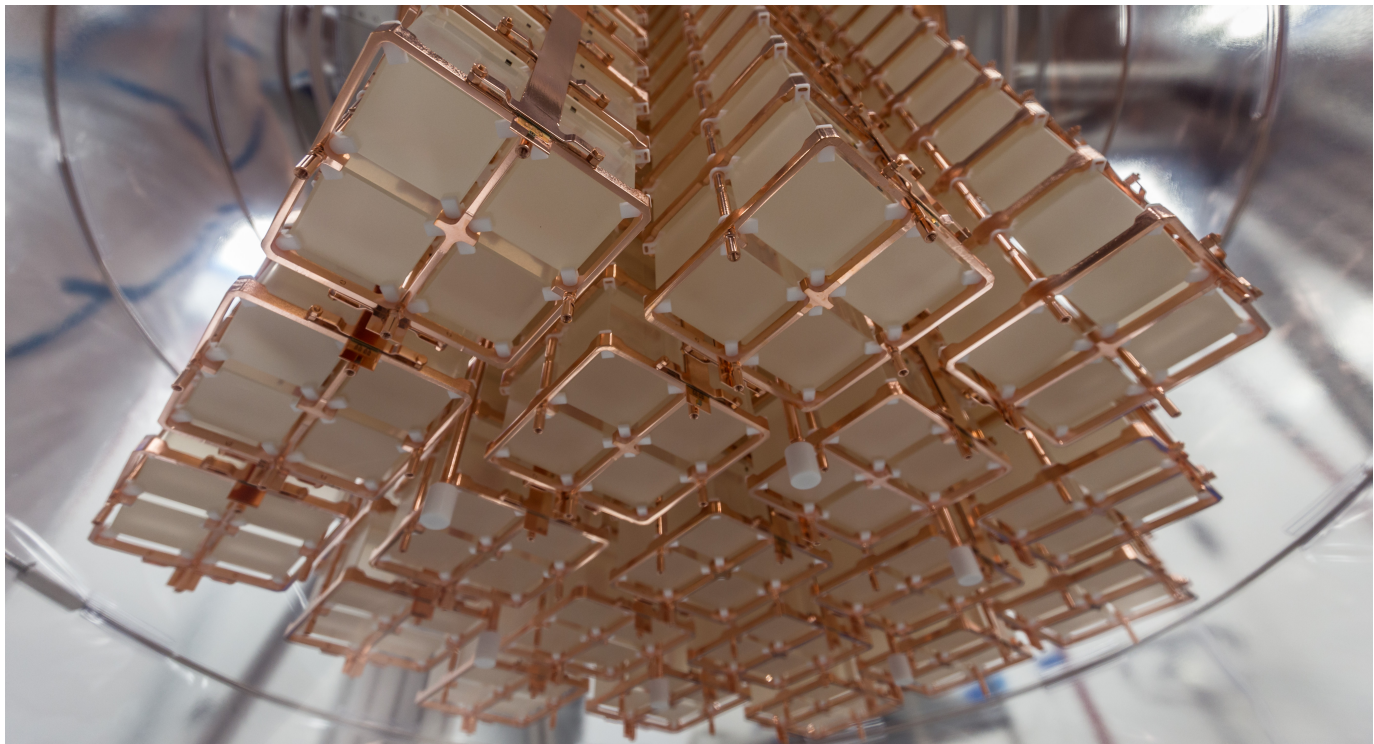
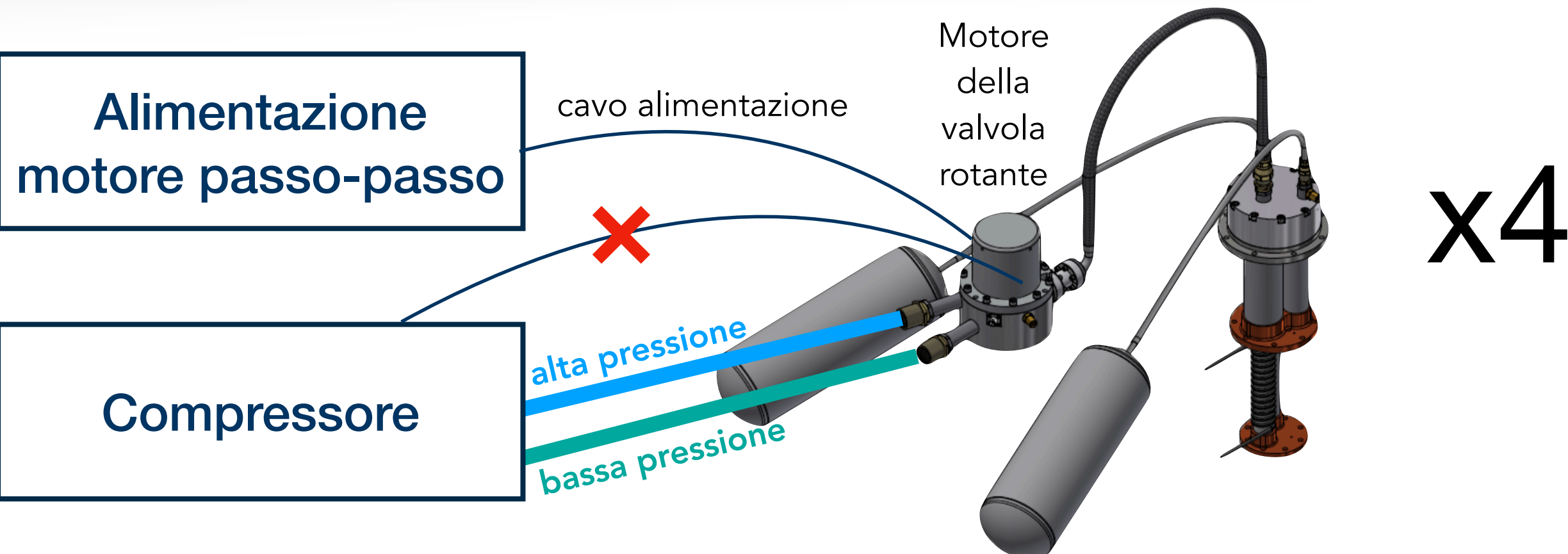


Modello 3D dei piatti a 300K, 40 K e 4K del crostato di CUORE

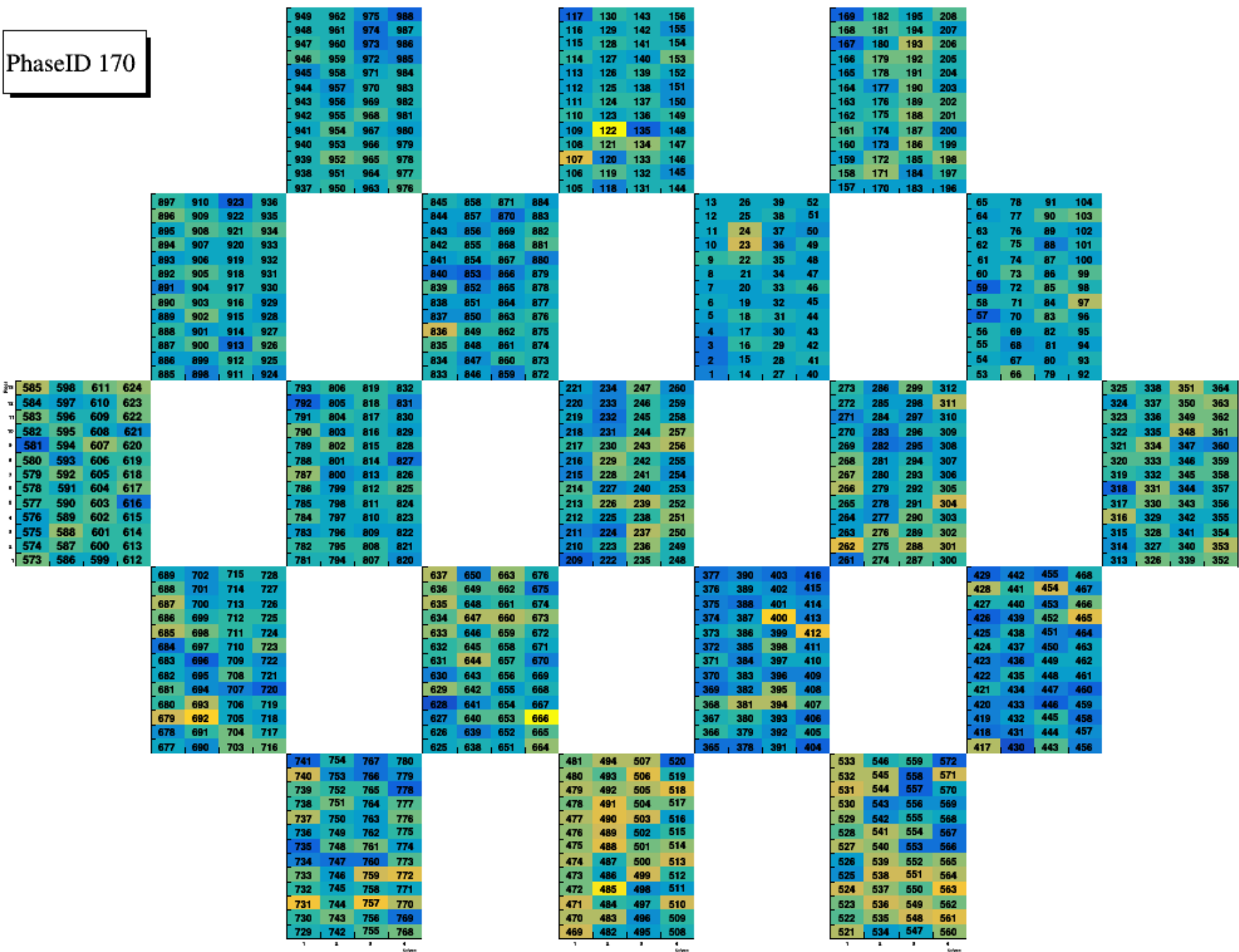
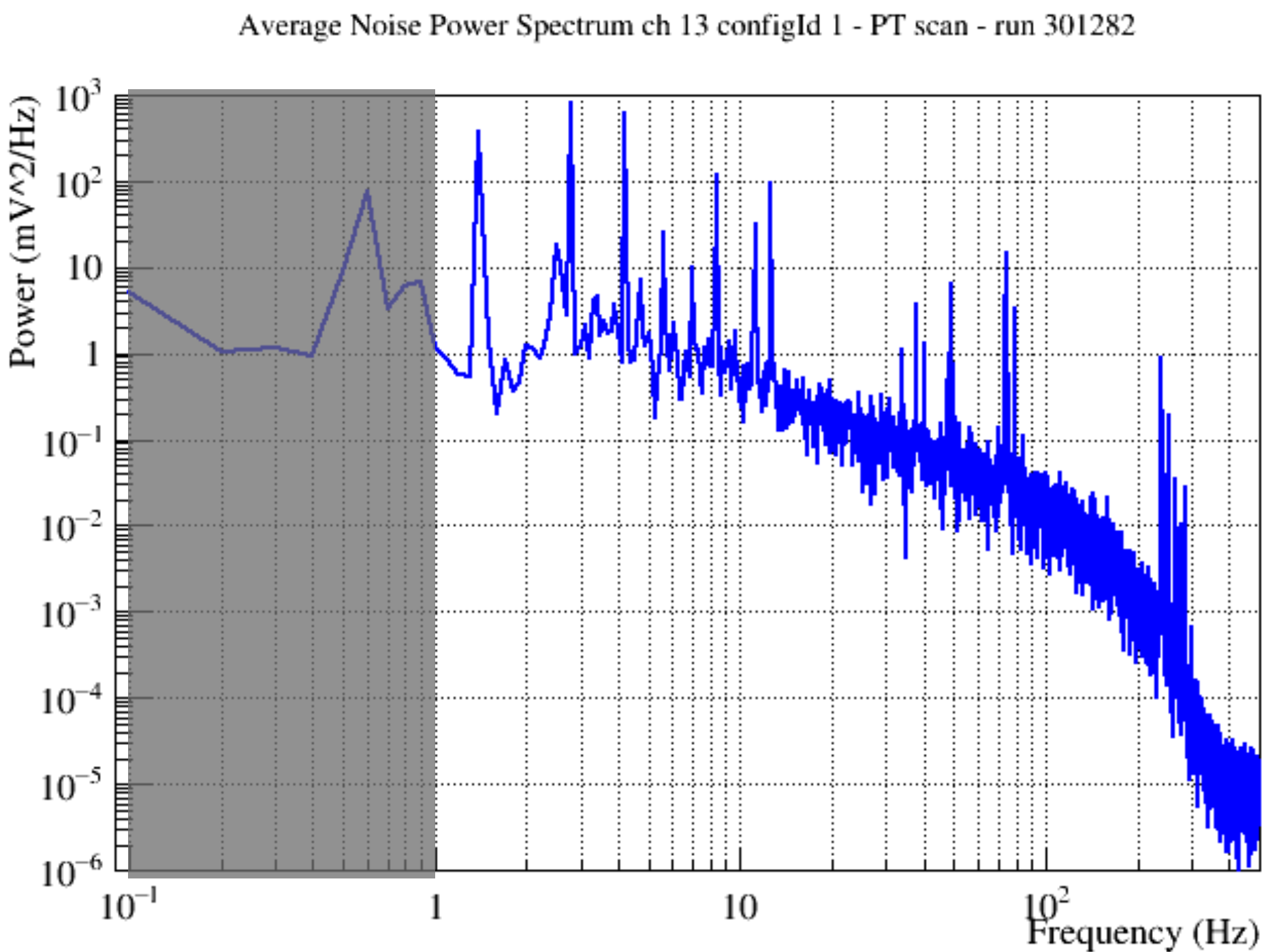


credits to
 S. D'Eramo

Ridurre le vibrazioni dei PT: es. CUORE



x4

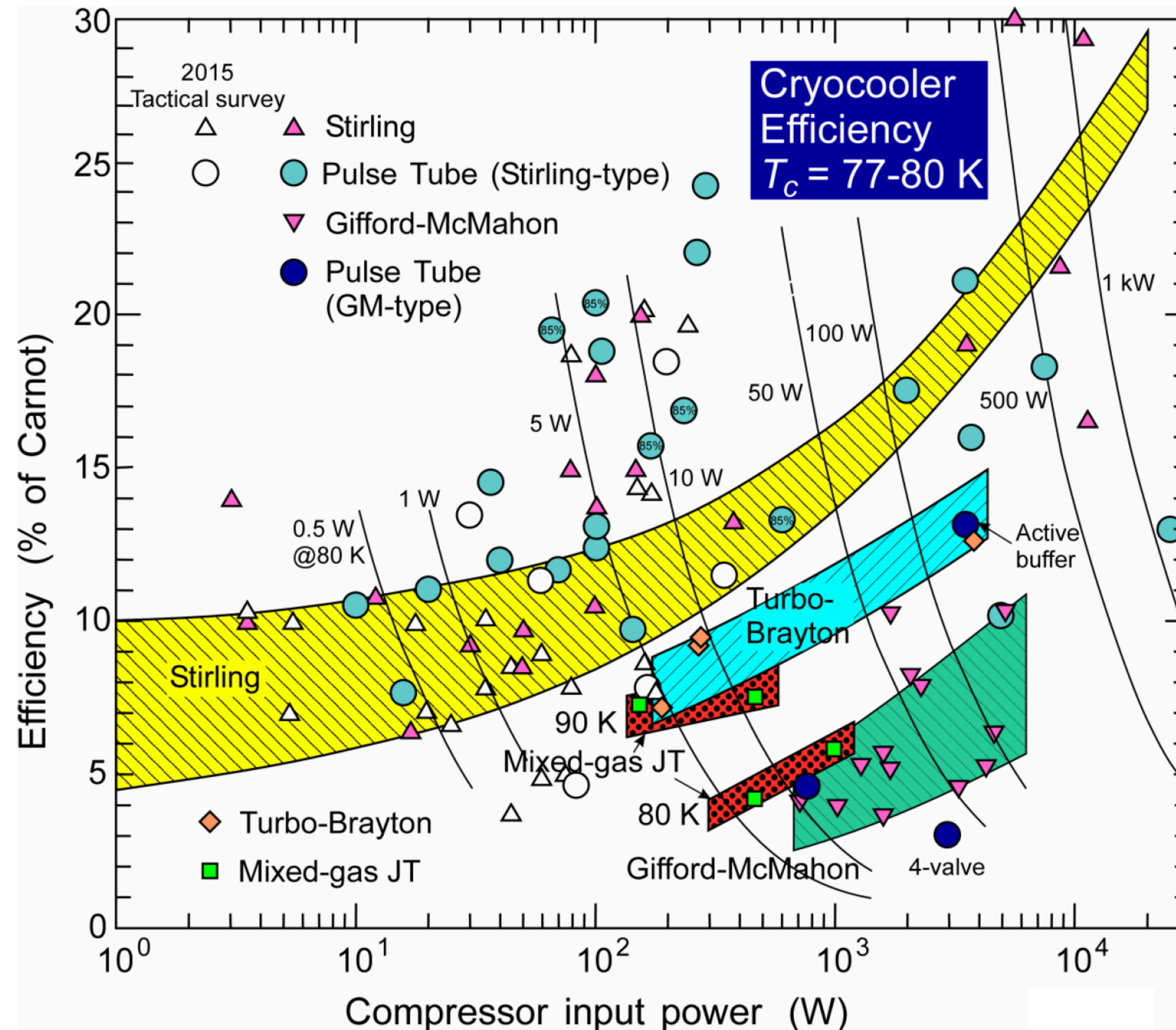




Criorefrigeratori a confronto



Efficienza a 80 K



Potere frigorifero

