

4^e Ecole d'Automne

Détection de rayonnements à très basse température

Balaruc les Bains du 14 au 20 novembre 1999

Physique et techniques des basses températures
détecteurs cryogéniques, acquisition et traitement des signaux.

INTRODUCTION

A LA CRYOGENIE

Maurice **CHAPELLIER**

METHODES de REFROIDISSEMENT
M.Chapellier SPEC/DSM/CE SACLAY

Bref rappel de thermodynamique

fonctions d'état : énergie interne U et entropie S et leurs combinaisons

$dU=dQ+dW$ chaleur et travail fournis au systeme

$dU=dQ-pdV$

$dS=dQ/T$ pour une transformation réversible

On peut à température constante intégrer dS et dQ . Cela donnera par exemple pour un changement de phase, évaporation d'un liquide, dilution d'He3 pur dans He4 la production de froid

$$Q=T(S_1 - S_2)$$

ou sont S_1 et S_2 sont les entropies de la phase liquide (ou concentrée) et gazeuse (ou diluée)

$dQ=0$ pour une transformation adiabatique

$H=U+pV$ fonction très utile en réfrigération: est appelé l'enthalpie. On a aussi $dH=dQ+Vdp$

C'est la *chaleur échangée avec un fluide a pression constante* (par exemple gaz pompé). Nous donnons en annexe les courbes d'enthalpie de l'He4 et de l'He3 qui permettent de calculer la chaleur échangée avec le gaz tout le long de son cycle de réchauffement.

H est aussi la fonction thermodynamique qui reste constante dans une détente irréversible et adiabatique (traversée d'impédance, poreux) dite détente de Joule- Thomson.



L'effet thermique de cette détente est donnée par la formule

$$\left. \frac{dT}{dp} \right|_H = \frac{\left. \frac{\partial V}{\partial T} \right|_p - V}{C_p}$$

le signe de cette expression donne l'effet de la détente Joule- Thomson, échauffement ou refroidissement. Elle dépend de la pression et de la température.

Donnons également la relation de Clausius-Clapeyron à l'interface de 2 phases d'un même constituant (liquide -gaz ou solide liquide)

$$\frac{dP}{dT} = \frac{S_v - S_l}{V_v - V_l}$$

ou encore

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T} * \frac{1}{V_v - V_l}$$

A l'équilibre liquide vapeur, la pente de la courbe de pression $P=f(T)$ s'exprime en fonction des entropies S , ou de la chaleur latente d'évaporation L et des volumes molaires V de la vapeur et du liquide.

Production et usage des liquides cryogéniques:

Toute machine thermique peut transformer de la chaleur en travail en empruntant de la chaleur à la source chaude et en cédant de la chaleur à la source froide.

Inversement un travail mécanique peut enlever de la chaleur à une source froide et céder cette chaleur à une source chaude.

On comprime un gaz à température constante. $-Q$ est fourni au système. On a donc abaissé l'entropie. Pour certain fluide on a déjà du liquide qui se refroidira par évaporation. Sinon une détente Joule-Thomson avec quelquefois production de travail extérieur refroidira le gaz qui se liquéfiera partiellement. Le surplus de gaz froid sera utilisé pour prérefroidir le gaz comprimé.

Nous entrons maintenant directement dans le sujet en présentant l'utilisation des liquides cryogéniques :

- l'azote liquide ($T=77\text{ K}$ à $p = 1\text{ bar}$). Il sert essentiellement de garde, pour évacuer l'essentiel des pertes thermiques

Sa chaleur latente d'évaporation est de
5600 J/mole. (1mole=28g)

Il se solidifie à 63 K sous une pression de 0,14 Bar en une phase ayant une grande chaleur spécifique. Utilisé dans un cryostat à He pour prérefroidir il doit être complètement éliminé sous peine de non transfert. Le solide a en plus d'une grande capacité calorifique une mauvaise conductibilité thermique. Il est de ce fait à même d'évaporer une grande quantité d'He⁴ liquide

- l'hélium 4, liquide cryogénique de base

$T = 4,2\text{ K}$ à $p = 1\text{ bar}$

Il est liquéfié de façon industrielle auprès des puits de gaz naturel dont il est un constituant de faible importance.

Pour obtenir une température plus basse on peut pomper le liquide dont la température d'équilibre s'abaisse avec la pression. Sa chaleur latente est de 84 J/mole.

Si $T < 2,17\text{ K}$, le liquide devient superfluide. Sa conductibilité devient alors très grande jusqu'à des températures basses, de l'ordre de 0,5 K. En dessous de cette température l'essentiel des excitations du superfluide ont disparu, il reste les phonons et la conductibilité devient, comme celle d'un solide diélectrique, proportionnelle à T^3 . Il est donc inexact de dire sans réserve que He₄ liquide superfluide est un très bon conducteur thermique

Remarquons aussi que, en dessous de 1,5 K la chaleur d'évaporation est essentiellement constante. Si $L(0)$ est la chaleur latente, en appliquant la formule de Clapeyron, on trouve

$$p \propto \exp(-L(0)/RT)$$

$$\dot{Q} \propto L(0) \exp(-L(0)/RT)$$

La pression diminue exponentiellement, ainsi que la puissance évacuée.

Un autre problème vient compliquer la cryogénie à He⁴ pompée : le film superfluide remonte le long des parois, s'évapore à plus haute température et limite ainsi l'efficacité du pompage. *L'équivalent thermique apporté par le film est de 1 mW par cm de périmètre du tube de pompage (s'il est parfaitement lisse).

Les plus basses températures en He⁴ se font par pompage d'un système bien isolé à travers un orifice de très petit diamètre, ce diaphragme limitant le flux de superfluide.



On peut obtenir ainsi 0,7K avec des pompes très puissantes (ou une pompe à charbon actif).

On préférera en général utiliser He³ pour obtenir cette gamme de température d'autant plus que la pression de vapeur de l' He³ est très utile pour mesurer la température dans la gamme 1.5K à 0.4K

L'Helium3 est un isotope rare produit par la décomposition du tritium (H³₁ -> H³₂ + b). C'est donc un "sous-produit" de la bombe à hydrogène. On peut en trouver aussi en quantité à la surface de la lune ou il est déposé par les vents cosmiques (ce serait une source rentable si la fusion nécessitait un approvisionnement conséquent de cet isotope!!). Son diagramme de phase est donné en annexe

Sa chaleur latente (48 J/mole) est inférieure à celle de He⁴ et il n'est superfluide qu'à des températures excessivement basse

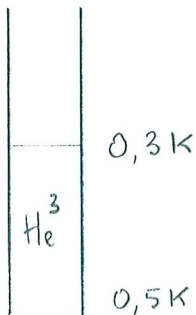
(1 mK à p = 0 et 2,7 m K à p = 34 bars).

Il est très employé jusqu'à des températures de 0,27 K.

Il est liquéfiable à pression de quelque bars par une détente Joule Thomson. On doit à J.G. Daunt la première étude des courbes d'enthalpie de ce fluide et l'idée d'un réfrigérateur sans point froid à 1.5K . Cette idée a été reprise ensuite par différents physiciens et appliquée à la dilution (de Waele, A. Benoit et P. Pari entre autres)

Attention, en dessous de 0,5 K on peut observer des phénomènes d'inhomogénéité de température avec un écart considérable entre le haut, surface pompée à 0,3 K, et le bas qui reste à 0,5 K avec des constantes de temps très longues. On doit homogénéiser la température par des frittés métalliques.

Mentionnons aussi la possibilité de système fermé avec du gaz sous pression et une pompe à charbon actif dont la première réalisation est due à J.P.Torre et Chanin (19)



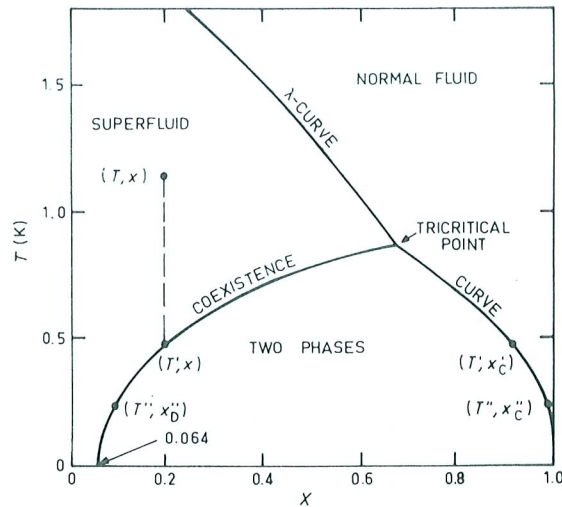
Melange He3/He4

A température élevée, He³ est miscible en toute proportions à He⁴, dont il va modifier la température de superfluidité T_l.

En dessous de 0,68 K, le mélange peut se séparer en deux phases A et B, B étant plus riche en He³ est moins dense et flotte sur la phase diluée.

A T = 0 x3 dilué = 0,06

Ce fait est très important car le 'gaz' He^3 dilué dans He^4 qui agit comme du "vide" aura une concentration finie à $T = 0$. On n'aura pas de décroissance exponentielle de la pression du gaz.



La chaleur extraite par dilution peut s'écrire $Q = T(S_{\text{dil}} - S_{\text{conc}})^n$ et comme les 2 entropies sont linéaires en T (liquides de Fermi)

$$S_{\text{dil}} = 108 T$$

$$S_{\text{conc}} = 24 T$$

$$\text{d'où } Q = T(S_{\text{dil}} - S_{\text{conc}}) = 84 T^2 \text{ Joule/mole}$$

La puissance frigorifique diminue comme T^2 .

La température limite pratique est de 2mk.

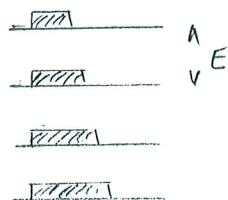
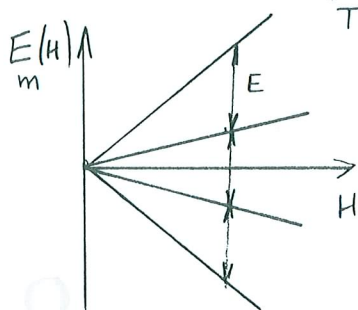
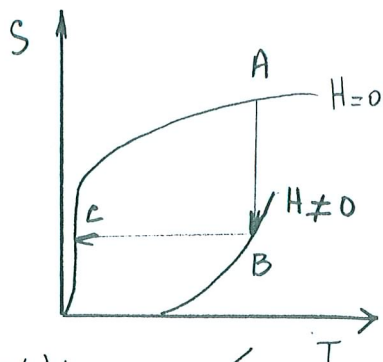
Dans les 3 procédés précédents, He^4 , He^3 , mélange, on se servira toujours de l'enthalpie du gaz pompé pour prérefroidir le fluide réinjecté d'un système continue, ou pour limiter les pertes thermiques d'un système à cycle unique.

Autres procédés.

pour mémoire : Effet Pomerantchuk : solidification adiabatique d' He^3 liquide. $T_{\text{lim}} = 1 \text{ m K}$

Fontaine superfluide : filtration sous pression de la phase He^4 superfluide $T_{\text{lim}} \sim 0,7 \text{ K}$

Systèmes magnétiques.



Quand on applique un champ magnétique à un système contenant des moments magnétiques, on va orienter ces moments et réduire l'entropie du système si on maintient la température constante $A \rightarrow B$

Si ensuite on isole le système, on abaissera la température de B à C en réduisant le champ magnétique.

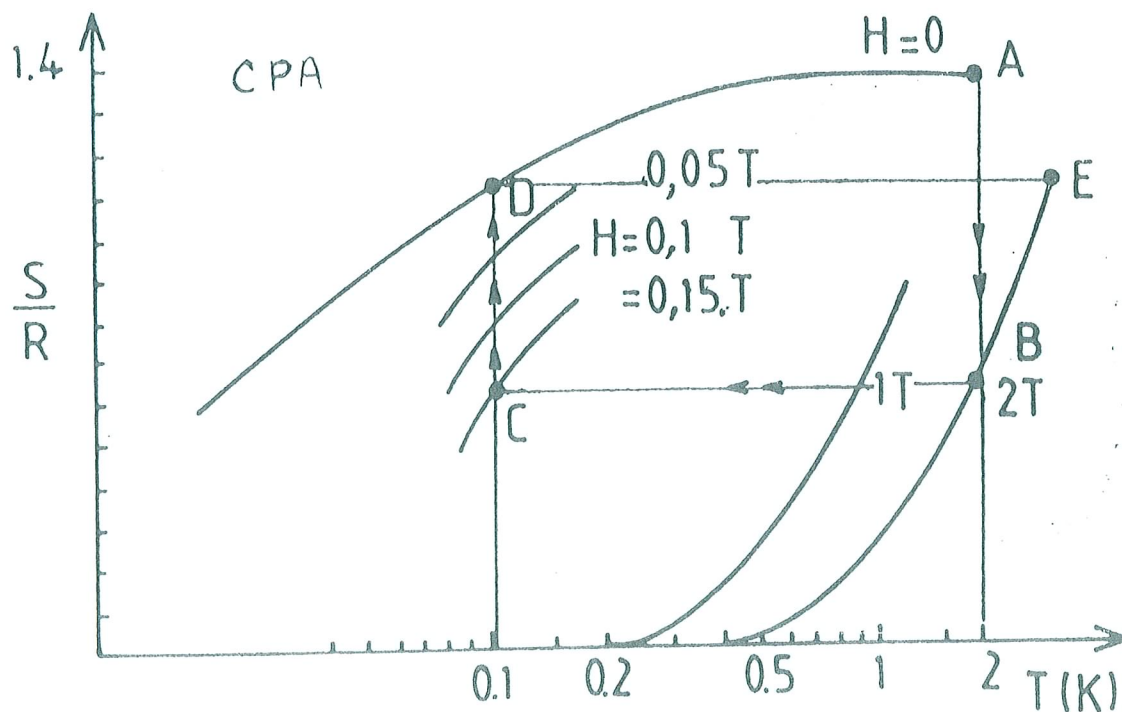
On peut donner une autre description plus détaillée pour expliquer les limitations de cette méthode. Les moments électroniques sont portés par un spin I , qui placé dans un champ magnétique donnent $2I+1$ niveaux séparés par $E=gbH$

A l'équilibre à la température T le rapport de population de 2 niveaux adjacents est donné par l'exponentielle de Boltzmann $r = \exp(-E/kT)$

Si on diminue E en réduisant H , le système étant isolé les populations des sous niveaux ne varient pas. On aura donc $H/T = \text{cte}$

Cette formule donne l'impression que l'on pourra atteindre n'importe quelle basse température. Il n'en est évidemment rien car chaque spin voit un champ additionnel moyen produit par les autres spins H_{loc} qui dépend de la concentration des ions paramagnétiques et de leurs interactions dans le solide. Plus les interactions sont faibles, plus H_{loc} est petit, plus basse est la température limite, de l'ordre de $kT_{lim} = gbH_{loc}$

Ordre de grandeur : Pour un sel classique $Cr^{2+}(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$ alun de Chrome Potassium, le spin est de $3/2$, la température limite de l'ordre de 10 mK. La figure ci dessous montre les différentes étapes de la désaimantation que nous allons détailler



A -> B Refroidissement par contact avec le bain extérieur $Q=12,4$ J/mole soit l'évaporation de $3,6$ cm³ d'hélium

B -> C On va ensuite isoler le système et réduire le champ magnétique jusqu'à la température désirée, ici 100mK.

C -> D L'étape suivante consiste à abaisser H pour compenser les pertes thermiques. On pourra récupérer $Q=0,4$ Joule en abaissant le champ à $H=0$

Avantages: Cette méthode est de mise en marche assez simple, elle a d'ailleurs été la première à être utilisée pour la production de très basses températures. Certains sels (CMN) très dilués ont permis d'approcher des températures de 1,5mK .

Elle est encore programmée pour des expériences spatiales (fusées) ou pour des environnements difficiles. Elle revient en force à cause de sa simplicité et de la nécessité de faire des expériences de détermination d'éléments en analysant le rayonnement X émis par excitation des atomes proche de la surface.

On peut combiner cette méthode avec un prérefroidissement à l'aide de He³, le champ magnétique nécessaire est alors faible.

. Inconvénients: On ne peut obtenir une basse température que pendant la seconde partie du cycle. Il faut ensuite recommencer un cycle complet .

Extensions vers les très basses températures

On prends des moments magnétiques de plus en plus petits, d'interactions de plus en plus faibles pour atteindre des températures en dehors des possibilités des méthodes précédentes. Il faut dans ce cas préparer le système à l'aide des températures obtenue par dilution. Les records se situent à quelque dizaine de microdegré pour une température transmise ou même à la fraction de nanokelvin pour le système désaimanté lui même.

Il faut remarquer qu'à ces températures extrêmes le paramètre le plus intéressant est l'abaissement de l'entropie du système. Ce sont les interactions qui détermineront la température. Plus elles seront faibles plus la température sera basse.

DIAGRAMME ENTHALPIQUE DE L'He₄

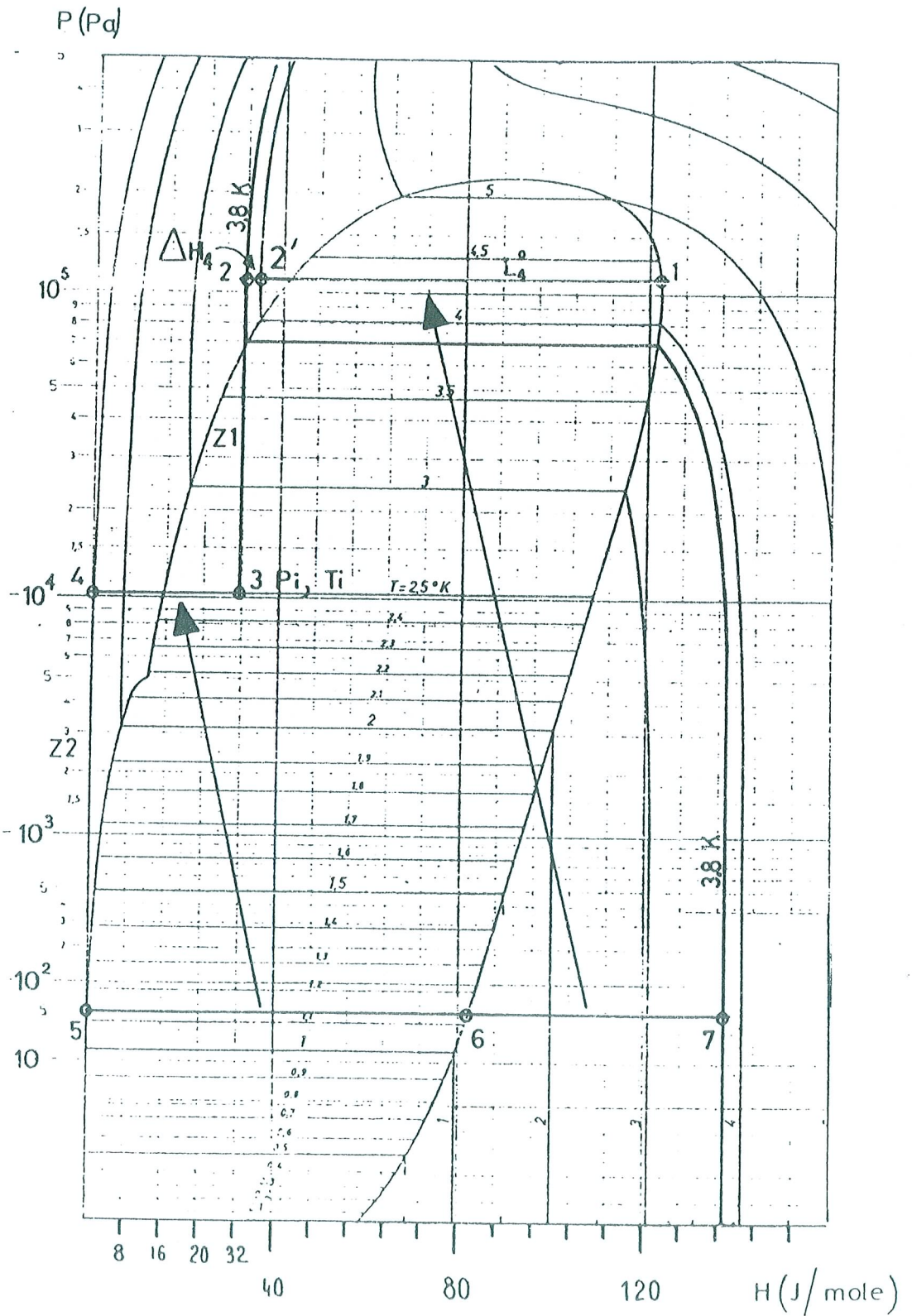


Fig. 9

_ COURBES ENTHALPIQUES DE L'HELIUM 3 _

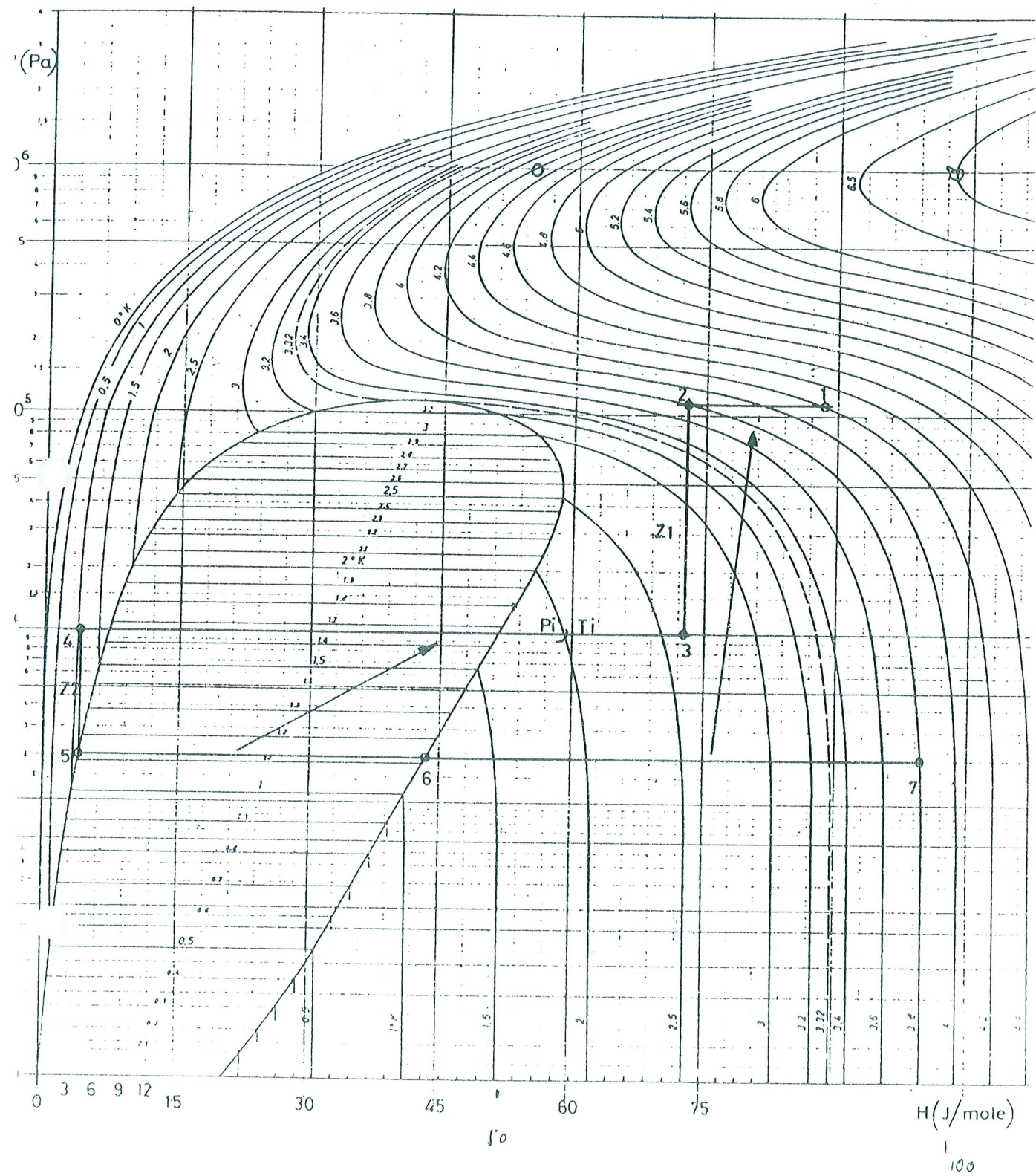


Fig. 8

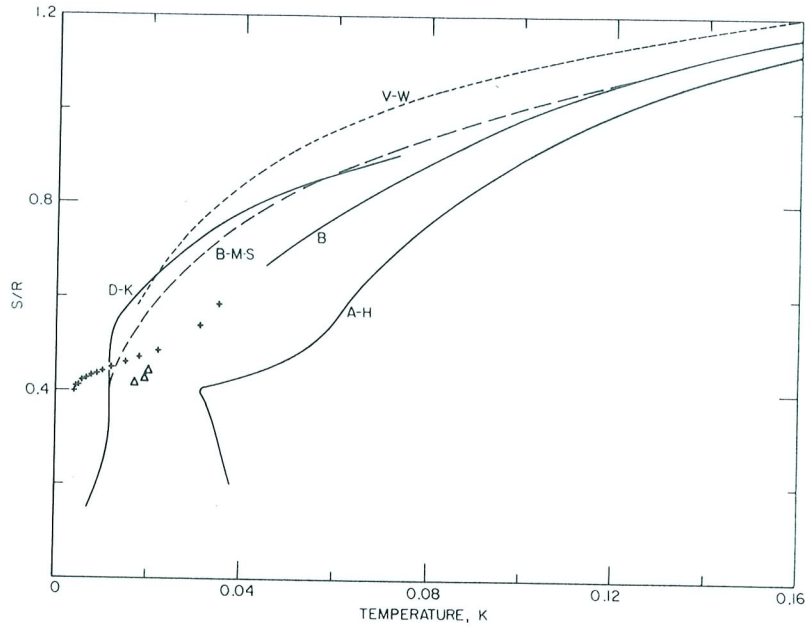


Fig. V.3. Entropy versus temperature, for chromic potassium alum. B, Bleaney (1950b); D-K, Daniels and Kurti (1954) and B-M-S, Beun, Miedema and Steenland (1957) – both renormalized (see text); V-W, Vilches and Wheatley (1966a). Data points marked + (De Klerk, Steenland and Gorter, 1949) and Δ (Ambler and Hudson, 1954) were obtained using heating by ac losses. Curve A-H, Ambler and Hudson (unpublished), has magnetic temperatures, T^{\oplus} , as abscissae.

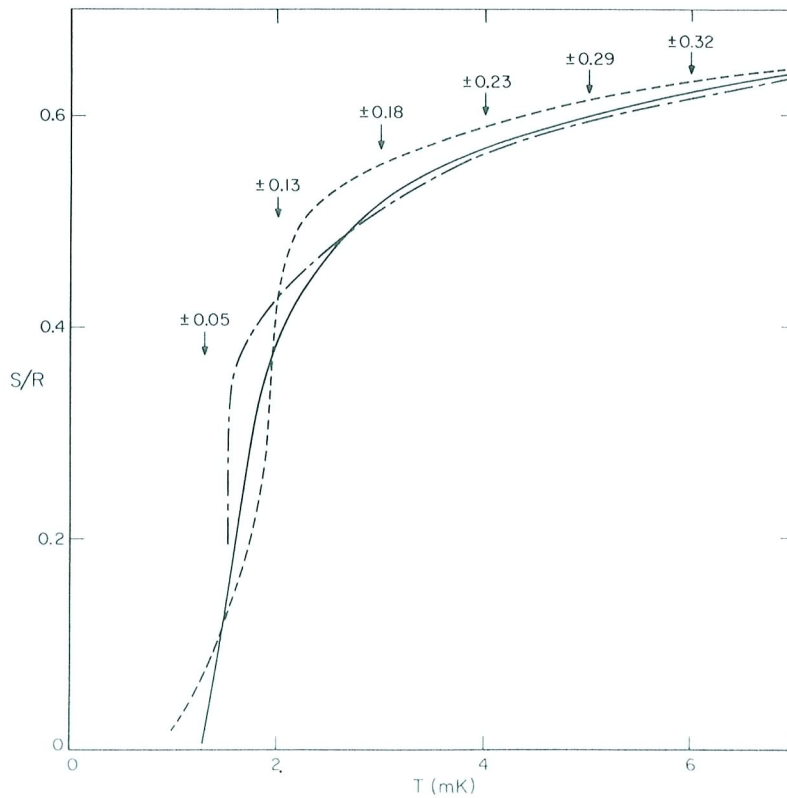


Fig. V.2. Entropy versus temperature, for CMN. - - - - Hudson and Kaeser (1967), gamma-ray heating; ——— Mess et al. (1969), electrical heating; - · - · - Huntzicker and Shirley (1970), nuclear orientation, plus estimated uncertainties of T expressed in mK.

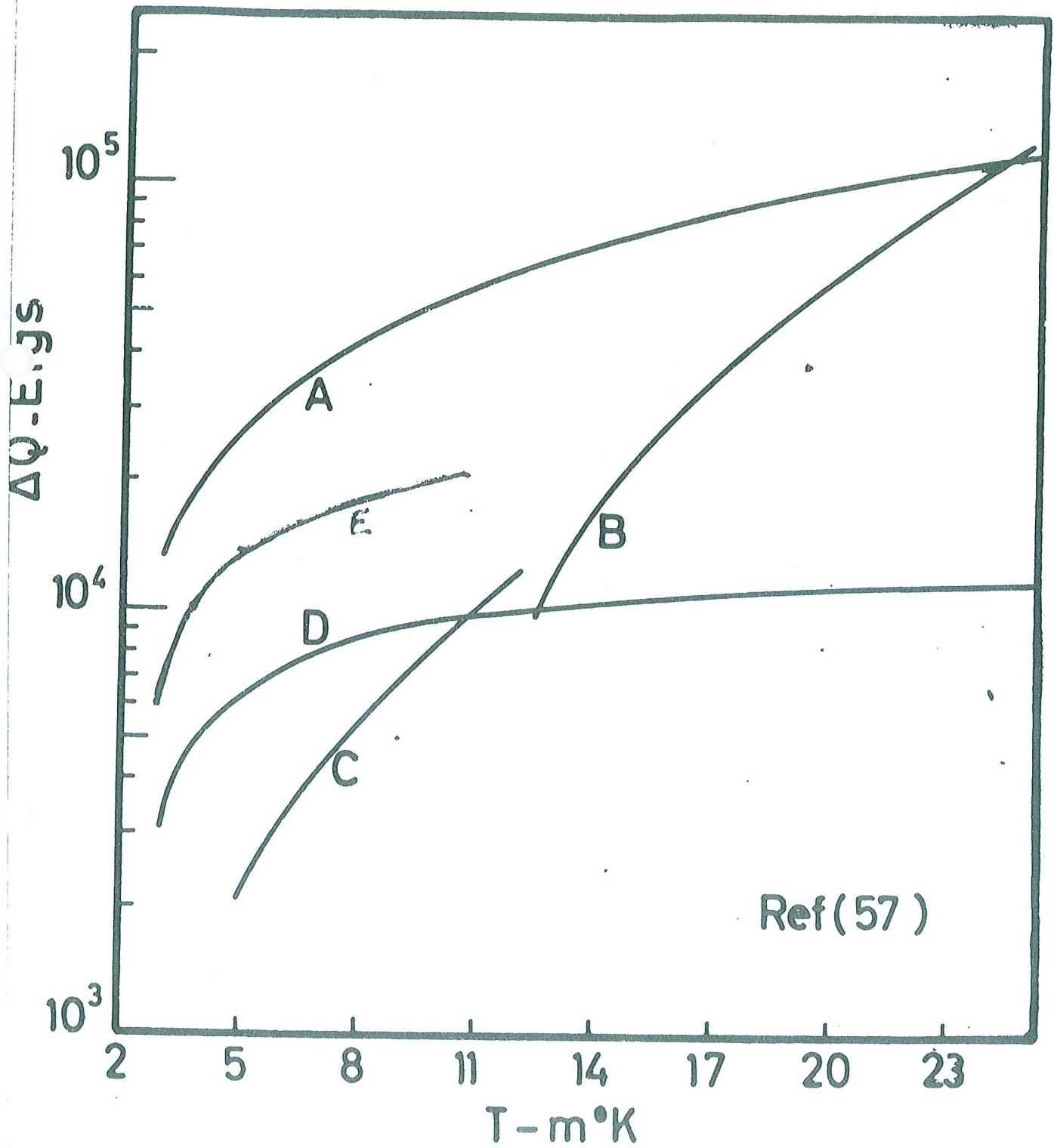


Fig. 5 - Pouvoir de réfrigération. Chaleur absorbée lors

- A : Conversion 1/10 mole 3He liquide en solide (Pomeranchuk)
- B : Dilution continue en 10^4 sec avec $n_3 = 32 \mu mol/sec$
- C : Dilution cycle unique après extraction 1/10 mole 3He
- D : Réchauffement 1/10 mole de CMN de 2 mK à T
- E $PrCu_6$