

1K以下の温度測定法I

矢山, 英樹
九州大学基幹教育院自然科学実験系部門

<https://doi.org/10.15017/1933253>

出版情報：九州大学低温センターだより. 12, pp.19-29, 2018-03. Kyushu University Low Temperature

Center

バージョン：

権利関係：

1 K 以下の温度測定法 I *

矢山英樹

九州大学 基幹教育院 自然科学実験系部門

超低温で温度を測定する際につきまとう最も難しい問題は、測定される試料と温度計の間の温度差を最小にすることである。その温度差は、測定時にセンサーに発生する熱量、温度計の熱伝導度、および試料と温度計の境界に生じるカピツツア抵抗によって決まる。また、熱平衡に達する速さは、温度計の熱容量に依存する。低温での温度測定は、このようにさまざまな問題が発生するため、低温の生成と同じくらい難しい。

温度計は2つのグループに分けられる。その一つは1次温度計であり、もう一つは2次温度計である。1次温度計は、ある物質のパラメータが、よく確立された物理法則に従って温度変化し、前もって較正しなくても温度測定が可能である。それに対し、2次温度計は、1点あるいはそれ以上の温度定点で較正する必要がある。

超低温測定のための1次温度計は、熱力学的関係、例えば、外部から加えられる熱量とエントロピー変化の関係や、系に存在する複数の相のケミカルポテンシャルが等しくなければならないという関係や、クラウジウス-クラペイロンの式に直接基づいた温度計である。その他の1次温度計は、放射性核による γ 線の放射、メスバウアー(Mössbauer)効果、スーパーリークで隔てられた ^3He - ^4He 混合液と ^4He 間の浸透圧を用いたものなどがある。一方、2次温度計は、電気抵抗を測定する抵抗温度計や、核磁気の磁化率を測定する磁気温度計などがある。これらの2次温度計は、一般的に速い応答性と高い精度を有するものであるが、前もって信頼できる温度スケールで較正する手順が必要である。

1 超低温での温度スケール

温度スケールを作るためには、異なる物質による測温データ、すなわちガス温度計と磁気温度計で得られたデータを比較したり、液体と蒸気および液体と固体の平衡状態線に沿った圧力の温度依存性を比較したりして熱力学的温度を決定し、それらを平均することが行われる。物質の振舞いによって、次のような二つのスケール法がある。

- a) 正確な温度定点となり得る相の温度、または相転移点を別の場所で再現すること。
- b) 前もって他の場所で較正された高い安定性を有する温度計（例えば、プラチナ抵抗温度計やゲルマニウム抵抗温度計）と比較すること。

実際に国際的温度スケールを作る際には、この両方と平均法が用いられる。

絶対温度 13.8 K 以上の較正には、国際実用温度スケール(International Practical Temperature

* 本稿は、ウクライナ科学アカデミー低温物理工学研究所編、矢山英樹、I.B.ベルクトフ訳「超低温の実験技術」九州大学出版会、2000年、からの抜粋である。

Scale) (IPTS-68) [1]を用いることができる^{*1}. これは熱力学的温度が精度良く確立された温度定点に基づいて作られたものである^{*2}. この温度スケールは、温度範囲 13.81 K から 1337.58 K までをカバーする. 13.81 K から 903.89 K までは、温度定点で較正されたプラチナ抵抗温度計で再現される. 温度定点の間は、抵抗温度計とその補間式を用いて決定される. 温度 237.16 K 以下の IPTS-68 の主要な温度定点を表 1 に示す.

表 1 IPTS-68 の温度定点 [1]

温度定点	温度 (K)	誤差 (K)
平衡水素の三重点	13.81	0.01
333.306 hPa における平衡水素の沸点	17.042	0.01
1,013.25 hPa における平衡水素の沸点	20.28	0.01
1,013.25 hPa におけるネオンの沸点	27.102	0.01
酸素の三重点	54.361	0.01
1,013.25 hPa における酸素の沸点	90.188	0.01
水の三重点	273.16	0(定義)

より低温では、国際度量衡委員会が、ヘリウムの蒸気圧温度スケール、0.9 K から 5.2 K で ⁴He を用いた T_{58} と、0.2 K から 3.3 K で ³He を用いた T_{62} を推奨している^{*3*4}. T_{58} [2]は、次のような測定を基にして作られた.

- 1) ガス温度計で温度を測定し、飽和蒸気圧を測定する.
- 2) 平衡状態における液相と気相のケミカルポテンシャルが等しいという条件

$$\ln P = \xi - \frac{L_0}{RT} + \frac{5}{2} \ln T - \frac{1}{RT} \int_0^T S_l dT + \frac{1}{RT} \int_0^P V_l dP + \varepsilon \quad (1)$$

に現れる物理量を測定する. ここで、 P と T は平衡状態での圧力と温度、 L_0 は $T = 0$ での蒸発潜熱、 V_l と S_l は液相でのモル体積とモルエントロピーである. $\xi = \ln[g(mk_B^{5/3}/2\pi\hbar^2)^{3/2}]$ はガスの化学定数であり、 m は原子の質量、 k_B はボルツマン定数、 \hbar はプランク定数、 g は原子の基底状態の縮退度であり ⁴He の場合 1、³He の場合 2 である.

$$\varepsilon = \ln(PV_g/RT) - 2B/V - 2C/V_g^2$$

はビリアル補正であり非理想気体の状態方程式

*1 訳注：現在では ITS-90 が用いられる. その温度定点を表 1A に示す.

*2 この温度スケール IPTS-68 は、低温でわずかに熱力学的温度からずれているため、代わりに低温部分で温度スケール EPT-76 が用いられることがある.

*3 現在、これらの温度スケールは正確でないことが認められている. 温度スケール EPT-76 を用いて修正されなければならない.

*4 訳注：現在では、ITS-90 に基づくヘリウム蒸気圧温度スケール T_{90} が用いられる[表 2A の文献参照]. ただしその温度範囲は、0.65 ~ 5.0 K であり、次の補間式で与えられる.

$$T = \sum_{i=0}^9 A_i [(\ln P - B)/C]^i \quad (1.A)$$

式(1.A)中の係数と定数は、適用温度範囲によって異なる. それらの値は、表 2A に示されている.

$$PV_g / RT = 1 + B/V_g + C/V_g^2 \quad (V_g \text{ はモル体積})$$

に現れる係数 B と C を含む。

3) 常磁性塩の磁気温度計で温度を測定し、飽和蒸気圧を測定する。

1 K 以下の温度を決めるのに T_{58} を使うのは難しい。なぜなら、その温度領域では ${}^4\text{He}\text{ II}$ の蒸気圧が 10 Pa 以下になり、超流動フィルムの蒸発一再凝縮に基づく誤差が大きくなるからである[3]。

表 1A ITS-90 の温度定点

温度定点	温度 (K)
ヘリウム蒸気圧	3~5
平衡水素の三重点	13.8033
平衡水素の蒸気圧(またはヘリウムガス温度計)	≈ 17
平衡水素の蒸気圧(またはヘリウムガス温度計)	≈ 20.3
ネオンの三重点	24.5561
酸素の三重点	54.3584
アルゴンの三重点	83.8058
水銀の三重点	234.3156
水の三重点	273.16
ガリウムの融点	302.9146
インジウムの凝固点	429.7485
錫の凝固点	505.078
亜鉛の凝固点	692.677
アルミニウムの凝固点	933.473
銀の凝固点	1,234.93
金の凝固点	1,337.33
銅の凝固点	1,357.77

* 凝固点は圧力 1,013.25 hPa での値。文献は表 7.2A のものを参照。

T_{62} は ${}^3\text{He}$ の飽和蒸気圧の測定に基づいて作られたものであり、1K 以下の温度範囲で非常に有用である[3, 4, 5, 6]。これは、 ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ の飽和蒸気圧を 0.9 K 以上で比較し、液相と気相の平衡状態曲線に沿って式(1)の係数を決定したものである[3, 6]。このスケールは、次の式で表わされる[6]。

$$\begin{aligned} \ln P_3 = & -2.49174 T^{-1} + 9.69646 - 0.286001 T + 0.198608 T^2 \\ & - 0.0502237 T^3 + 0.00505486 T^4 + 2.24846 \ln T \end{aligned} \quad (2)$$

ここで P_3 は ${}^3\text{He}$ の蒸気圧で単位は Pa、適用温度範囲は 0.2 K から臨界点 3.32 K までである。式(2)によって計算された T 対 P のデータを表 2 に示す。この計算式は、逆に、 T^{-1} を $\ln P$ の級数で表わすこともできる[7]。

より広範な研究により、IPTS-68 の低温での補助スケールである ${}^3\text{He}$ と ${}^4\text{He}$ の蒸気圧温度スケール T_{62} と T_{58} は熱力学温度との間にずれがあり、互いに一致しないことが分かった[8]。国際度量衡委員会は 1976 年に、IPTS-68 が更新され国際実用スケールが確立されるまでの間（およそ 1987 年頃まで）、温度範囲 0.5 ~ 30 K に新しい予備スケールを導入することを決めた[9, 10]。このスケールの略称は EPT-76 である[11]。EPT-76 は表 3 に示されるような温度定点によって決定される。EPT-76 スケールでは、IPTS-68 と違って、 T_{76} を作るために幾つかの補間方法が用いられた。その方法は、

次のとおりである。

- a) 表3に示された一つまたは複数の温度定点で気体温度計や磁気温度計を較正し、それを用いて補間を行なう。
- b) 13.81 K以上では、IPTS-68を表4に示すように修正する。
- c) 5 K以下では、³Heと⁴Heの蒸気圧温度スケール T_{58} と T_{62} を表5に示すように修正する。
- d) 9つの国際スケールを用いる[11]^{*1}。

表2 ³Heの飽和蒸気圧と温度の関係、 T_{62}

$P(\text{Pa})$	$T(\text{mK})$								
0.002	203	1.200	352	85	615	580	865	3,600	1,285
0.003	209	1.500	360	90	621	620	877	3,800	1,302
0.004	213	2.000	372	95	626	660	888	4,000	1,318
0.005	217	2.500	381	100	632	700	898	4,200	1,333
0.006	219 _s	3.000	390	110	641 _s	750	911	4,400	1,348
0.007	222	4.000	403	120	651	800	923	4,600	1,363
0.008	224	5.000	414	130	660	850	934	4,800	1,377
0.009	226	6.000	423 _s	140	668	900	945	5,000	1,391
0.010	228	7.000	432	150	676	950	956	5,200	1,404
0.015	235	8.000	439	160	683	1,000	966	5,400	1,417
0.020	241	10.00	452	170	690	1,050	976	5,600	1,430
0.025	245	12.00	463	180	697	1,100	985 _s	5,800	1,443
0.030	249	15.00	476	190	704	1,150	995	6,000	1,455
0.040	255	18.00	489	200	710	1,200	1,004	6,300	1,473
0.050	260	20.00	496	210	716	1,300	1,021	6,600	1,490
0.060	264	23.00	506	220	722	1,400	1,037	6,900	1,507
0.070	267	26.00	514	240	733	1,500	1,053	7,200	1,523
0.080	270	30.00	525	260	744	1,600	1,068	7,500	1,539
0.100	276	34.00	535	280	754	1,700	1,082	7,800	1,554 _s
0.150	286	38.00	544	300	764	1,800	1,096	8,100	1,570
0.200	294	42.00	552	320	773	1,900	1,109	8,400	1,584
0.250	300	46.00	559	340	781	2,000	1,122	8,700	1,598 _s
0.300	305	50.00	566	360	790	2,200	1,146	9,000	1,613
0.400	314	55.00	575	390	802	2,400	1,169	9,300	1,626 _s
0.500	321	60.00	582	420	813	2,600	1,191	9,600	1,640
0.600	327	65.00	590	450	824	2,800	1,211	9,900	1,653
0.700	332	70.00	597	480	834	3,000	1,231	10,200	1,666
0.800	337	75.00	603	510	844	3,200	1,250	10,600	1,683
1.000	345	80.00	609	540	853	3,400	1,268	11,000	1,699

注：絶対温度を補正するには、表7.5 (T_{58} スケール)を用いること。

温度範囲 0.01 ~ 0.5 K では、NBS-CTS-1 温度スケールが存在する。これはノイズ温度計と核整列温度計に基づいて作られた[12]。このスケールの誤差は、10 分の数%である。それは、ゼロ磁場での純金属や金属間化合物の超伝導転移温度 T_c によって定められた温度定点によって再現される。

NBS^{*2}の装置 SRM-768 [12, 13]は、W, Be, Ir, AuAl₂, AuIn₂を装備しており、それらの超伝導転

*1 4.2 ~ 27 K では磁気温度スケール (X, PRMI) に対する補正是、式

$$T_{X, \text{PRMI}} - T_{76} = 0.51 \times 10^{-3} T_{X, \text{PRMI}} - 0.0125 T_{X, \text{PRMI}}^2 \quad \text{で表わされる。}$$

*2 訳注：NBS は American National Bureau of Standard の略である。現在は National Institute of Standards and Technology (NIST)である。

移温度において、この温度スケールを、精度 0.1 mK で再現する。しかし、NBS スケールを他のスケールと比較すると[14, 15]、NBS スケールは最低温度（タンゲステンの T_c ）付近で 0.1~1.1 mK ほど小さい値であることが分かった^{*3}。

表 2A 棚間式 (1.A) における係数

係数または定数	^3He 0.65~3.2 K	^4He 1.25~2.1768 K	^4He 2.1768~5.0 K
A_0	1.053477	1.392408	3.146631
A_1	0.980106	0.527153	1.357655
A_2	0.676380	0.166756	0.413923
A_3	0.372692	0.050988	0.091159
A_4	0.151656	0.026514	0.016349
A_5	-0.002263	0.001975	0.001826
A_6	0.006596	-0.017976	-0.004325
A_7	0.088966	0.005409	-0.004973
A_8	-0.004770	0.013259	0
A_9	-0.054943	0	0
B	7.3	5.6	10.3
C	4.3	2.9	1.9

- 文献:
- 1) H. Preston-Thomas: Metrologia **27** (1990) 3.
 - 2) B. W. Magnum: J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **95** (1990) 69.
 - 3) B. W. Magnum and G. T. Furukawa: Natl. Inst. Stand. Technol., Technical Note (1990) 1265.
 - 4) 桜井弘久: 応用物理 **59** (1990) 704.
 - 5) 阿竹徹, 斎藤一弥: 固体物理 **26** (1991) 515.
 - 6) 奈良広一: パリティ **6** (1991) 50.

表 3 EPT-76 スケールの温度定点、温度範囲 0.5~30 K の抜粋

温度定点	温度 (K)
Cd の超伝導転移点	0.519
Zn の超伝導転移点	0.851
Al の超伝導転移点	1.1796
In の超伝導転移点	3.4145
^4He の沸点*	4.2221
Pb の超伝導転移点	7.1999
平衡水素の三重点**	13.8044
333.306 hPa (2576 気圧) における平衡水素の沸点**	17.0373
平衡水素の沸点*, **	20.2734
ネオンの三重点***	24.5591
ネオンの沸点*, **, ***	27.102

注: 超伝導転移点はゼロ磁場での値 [416].

* 1,013.25 hPa での蒸気圧.

** T_{eb} の 4 つの最低温度定点、「平衡水素」とは、その温度でオルソ-パラ濃度が平衡状態にあるものという.

*** ネオンは自然同位元素濃度、0.0027 mol ^{21}Ne + 0.092 mol ^{22}Ne + 0.905 mol ^{20}Ne , である.

超伝導転移温度によって温度スケールを再現する際に、いくつかの難しい問題が現れる。その問題の一つは、同じ材料でもサンプルによって超伝導転移温度が異なることである。これはサンプルの純度の違いによるものや、機械的ストレスによって転移温度の幅が広がるものである[16]。さらに、

*3 現在では、CMN スケール[15], NMR スケール[14], ノイズ温度計と核整列温度計に基づく NBS スケールの 3 つは少なくとも 15 mK の精度で一致している[21]。転移温度 T_c を補正して SRM-768 が作られている[13]。

最低転移温度をもつ金属の T_c は、弱い磁場にも非常に敏感である。実際に、NBS の典型的なタングステンのデータ[14, 15]は、15.15 mK から 16.39 mK の間にあり、その転移幅は転移温度 T_c の 4% である。また、ベリリウムの T_c は、 $B = 10^{-4}$ T の磁場で 0.1 mK 下がる[17]。 $T_c \geq 100$ mK の試料では、転移幅は 0.3% 以下である。このように、超伝導転移温度の文献値を用いるときには、この状況を考慮に入れる必要がある[178, 214, 416]。表 6 に、0.3 K 以下の SRM-768 と、0.5 K 以上の SRM-767 [11, 19]の超伝導転移温度を示す。

表 4 EPT-76 (T_{76}) と IPTS-68 (T_{68}) との差 [11]

T_{68} (K)	$T_{68} - T_{76}$ (mK)	T_{68} (K)	$T_{68} - T_{76}$ (mK)	T_{68} (K)	$T_{68} - T_{76}$ (mK)
13.81	5.6	20.0	6.9	26.5	0.3
14.0	4.6	21.0	5.8	27	0.0
15.0	2.0	22.0	4.8	28	0.0
16.0	2.6	23.0	3.7	29	0.0
17.0	4.6	24.0	2.7	30	0.0
18.0	6.5	25.0	1.6	—	—
19.0	7.4	26.0	0.7	—	—

表 5 EPT-76 (T_{76}) とヘリウム蒸気圧スケール T_{VP} (${}^4\text{He}$ - T_{58} と ${}^3\text{He}$ - T_{62}) との差

T_{VP} (K)	$T_{VP} - T_{76}$ (mK)	T_{VP} (K)	$T_{VP} - T_{76}$ (mK)	T_{VP} (K)	$T_{VP} - T_{76}$ (mK)
0.5	-1.9	1.8	-3.9	3.2	-6.6
0.6	-2.1	2.0	-4.1	3.4	-6.8
0.8	-2.5	2.2	-4.4	3.6	-7.0
1.0	-2.9	2.4	-4.9	3.8	-7.0
1.2	-3.2	2.6	-5.4	4.0	-7.1
1.4	-3.5	2.8	-5.9	4.2	-7.1
1.6	-3.7	3.0	-6.3	4.5	-7.1
				5.0	-7.1

注: T_{VP} は T_{58} と T_{62} の平均。

表 6 SRM-768[13]と SRM-767[16]の超伝導転移温度定点

SRM-768					
材料	W	Be	Ir	AuAl ₂	AuIn ₂
超伝導転移温度 (mK)					
ノイズ温度計による	15.54 (0.19)	22.67 (0.23)	99.24 (0.022)	159.82 (0.08)	204.01 (0.02)
磁気温度計による	15.58 (0.27)	22.66 (0.19)	99.22 (0.037)	159.82 (0.036)	204.02 (0.06)
臨界磁場 (G)	1.07		19		14
SRM-767					
材料	Pb	In	Al	Zn	Cd
超伝導転移温度 (K)	7.201	3.4167	1.1746	0.844	0.515
誤差 (mK)	2.5	1.5	2.0	1.5	2.5
再現性 (mK)	0.32	0.15	0.28	0.22	0.30
臨界磁場 (G)	803	293	99	54	28

注: (1) 括弧内は標準偏差 (%); (2) 超伝導転移点を測定するには、3つの互いに直交するヘルムホルツコイルまたはシールドを用いて磁場を取り除く必要がある。

さらに低温 1 ~ 23 mK は、³He の融解曲線に沿った圧力と絶対温度の関係から決定される[20]。このスケールは、クラウジウス-クラペイロンの式に現れる物理量を測定して作られる。この方法は 2 つの段階によってなされる^{*1}。まず、融解圧での液体 ³He の超流動転移温度 T_A を単位としたスケールを決め（表 7 参照），その後、³He のスピントロピーが温度の上昇と共に $R\ln 2$ に収束することを利用して熱力学的絶対温度を決定する。この絶対温度を決定する際の誤差は、温度範囲 1.1 ~ 23 mK では、5%以下であった。³He の純度は 99.98% であった。

この新しい³He のスケールは、融解圧曲線上に明瞭な不連続点を有しており、温度定点として利用できる。それらは、次の 3 つである^{*2}。

1) 常流動 ³He から超流動 A 相への 2 次の相転移点。 $T_A = 2.75 \pm 0.11$ mK, $P_A =$

3.4342 ± 0.0003 MPa。液体の熱容量のとびに比べて 3 倍のとびが融解曲線に見られる。

2) ³He の超流動 A 相から B 相への 1 次相転移点。 $T_B = 2.18 \pm 0.10$ mK, $P_B =$

3.4362 ± 0.0003 MPa。この点で、潜熱の発生あるいは吸収が起こる。B 相から A 相への転移点では、しばらくの間温度と圧力が一定になる。（冷却時には過冷却が観測されるので、測定は加熱時にのみ行なう）。

3) 固体 ³He の磁気秩序転移点。 $T_S = 1.10 \pm 0.06$ mK, $P_S = 3.4394 \pm 0.0003$ MPa。

この点は、³He を一定速度で断熱結晶化していくときに、固体 ³He のエントロピーが T_S 以下で急に減少し、冷却速度が急に減少するところである。

³He の融解曲線に沿った圧力と温度の関係は、熱力学データ[20]や NBS スケールによって較正された CMN 温度計を用いて、温度範囲 8 ~ 300 mK で確立されている[15, 21]。熱力学的データと融解圧曲線のデータに最小二乗法を適用して融解圧曲線の実験式が得られている。それは、 T_A から 300 mK までの温度範囲で圧力の精度 ± 100 Pa ($T = 8$ mK での温度精度 ± 25 μK) をもつ次の式で表わされる[21]。

$$P - P_{min} = \sum_{i=-2}^5 a_i T^i . \quad (3)$$

ここで、 $P_{min} = 2.9316$ MPa, $a_{-2} = 2.1895 \times 10^{-9}$, $a_{-1} = -8.1989 \times 10^{-6}$, $a_0 = 0.516254$, $a_1 = -4.40395$, $a_2 = 15.3846$, $a_3 = -35.0634$, $a_4 = 59.4115$, $a_5 = -46.5947$ である。

表 8 に、³He の融解圧曲線に沿っての（式(3)による）温度と圧力の関係を示す。極小点近くの温度 ($P_{min} = 2.9316 \pm 0.0003$ MPa, $T_{min} = 318 \pm 1$ mK) で、 $P-T$ データは高温のデータ[22]と一致する（表 9 参照）。したがって、高温のデータがより低温に拡張された。このように現在では、融解圧曲線に沿った圧力と温度の関係は 0.001 K から 1.8 K をカバーし、高精度な温度スケールが確立している。それは他のスケールと比較するための低温標準として、あるいは 2 次温度計を較正するために用いることができる。

^{*1} 同様な方法が、磁場中での³He の融解曲線の研究に用いられた[38]。得られた結果は、文献[20]のデータと 8%の誤差内で一致した。

^{*2} 訳注：最近のデータ [W.Ni, J.S. Xia and E.D. Adams: J. Low Temp. Phys. **99** (1995) 167] では、 $T_A = 2.505$ mK, $T_B = 1.948$ mK, $T_S = 0.934$ mK である。

表7 溫度範囲 1~23 mK で実験値を補間することによって得られた ^3He 融解曲線の圧力, 温度, 勾配. $T^* = T/T_A$, $T_A = 2.75 \text{ mK}$, $P_A = 3.43420 \text{ MPa}$

$P - P_A$ (MPa)	$-10T(dP/dT)$ (MPa)	T^*	$P - P_A$ (MPa)	$-10T(dP/dT)$ (MPa)	T^*
0.0050	0.03241	0.432	0.0006	0.09087	0.938
0.0049	0.03363	0.445	0.0005	0.09210	0.948
0.0048	0.03487	0.458	0.0004	0.09332	0.959
0.0047	0.03613	0.471	0.0003	0.09453	0.969
0.0046	0.03741	0.484	0.0002	0.09574	0.979
0.0045	0.03872	0.497	0.0001	0.09695	0.989
0.0044	0.04003	0.510	0.0000	0.09815	1.000
0.0043	0.04137	0.523	-0.0001	0.09935	1.010
0.0042	0.04271	0.535	-0.0002	0.10054	1.020
0.0041	0.04407	0.548	-0.0003	0.10173	1.030
0.0040	0.04543	0.560	-0.0004	0.10292	1.040
0.0039	0.04681	0.573	-0.0005	0.10410	1.050
0.0038	0.04819	0.585	-0.0006	0.10529	1.060
0.0037	0.04957	0.597	-0.0007	0.10647	1.070
0.0036	0.05096	0.609	-0.0008	0.10765	1.080
0.0035	0.05235	0.621	-0.0009	0.10883	1.090
0.0034	0.05375	0.633	-0.0010	0.11001	1.100
0.0033	0.05514	0.644	-0.0020	0.12185	1.200
0.0032	0.05654	0.656	-0.0030	0.13387	1.297
0.0031	0.05793	0.668	-0.0040	0.14598	1.394
0.0030	0.05932	0.679	-0.0050	0.15759	1.489
0.0029	0.06071	0.690	-0.0060	0.16872	1.583
0.0028	0.06210	0.702	-0.0070	0.17999	1.677
0.0027	0.06348	0.713	-0.0080	0.19114	1.770
0.0026	0.06485	0.724	-0.0090	0.20216	1.862
0.0025	0.06622	0.735	-0.0100	0.21307	1.954
0.0024	0.06759	0.746	-0.0120	0.23460	2.137
0.0023	0.06895	0.757	-0.0140	0.25577	2.318
0.0022	0.07030	0.768	-0.0160	0.27664	2.499
0.0021	0.07164	0.779	-0.0180	0.29725	2.680
0.0020	0.07298	0.790	-0.0200	0.31763	2.860
0.0019	0.07311	0.791	-0.0220	0.33780	3.040
0.0019	0.07430	0.801	-0.0240	0.35780	3.220
0.0018	0.07563	0.812	-0.0260	0.37763	3.400
0.0017	0.07694	0.823	-0.0280	0.39732	3.581
0.0016	0.07824	0.833	-0.0300	0.41686	3.761
0.0015	0.07954	0.844	-0.0350	0.46517	4.213
0.0014	0.08083	0.854	-0.0400	0.51272	4.667
0.0013	0.08211	0.865	-0.0450	0.55956	5.123
0.0012	0.08338	0.876	-0.0500	0.60571	5.583
0.0011	0.08465	0.886	-0.0550	0.65123	6.045
0.0010	0.08591	0.896	-0.0600	0.69623	6.511
0.0009	0.08716	0.907	-0.0650	0.74090	6.980
0.0008	0.08840	0.917	-0.0700	0.78555	7.453
0.0007	0.08964	0.928	-0.0750	0.83059	7.929

温度範囲 0.002 ~ 2 K の絶対温度スケールは、また、あらかじめ分かっている出発磁場と温度から単結晶 CMN 試料を断熱消磁することによって得られる[23, 24, 25, 26]. 10 mK 以下では、それらの温度スケール間にかなりの違いが存在する. 最も信頼できるものは, Berkeley-CMN-T スケール[23]である. このスケールを実際に使う場合、つまり単結晶の CMN を標準温度計として用いる場合には、測定物と単結晶 CMN 試料との熱接触が難しいという問題に直面する.

実験室で用いられている融解圧曲線以外の温度スケールとしては、プラチナの磁化率に基づいたものが信頼できる. 常伝導金属の核磁化率は、スピナー格子緩和時間 T_1 を測定し、コリンハの関係式 $T T_1 = \text{const}$ を用いて、それ自身で較正できる. 転移温度 T_A , T_B , T_S の値がこの方法で決定された[27, 28].

表8 溫度範囲 3~330 mK での ${}^3\text{He}$ 融解曲線の圧力, 絶対温度, 勾配 [21]

T (mK)	$P - P_{\min}$ (MPa)	dP/dT (MPa K $^{-1}$)	T (mK)	$P - P_{\min}$ (MPa)	dP/dT (MPa K $^{-1}$)
3	0.50069	-3.56	90	0.22248	-2.33
4	0.49697	-3.84	95	0.21105	-2.24
5	0.49306	-3.96	100	0.20004	-2.16
6	0.48907	-4.02	110	0.17918	-2.01
7	0.48504	-4.04	120	0.15982	-1.86
8	0.48100	-4.04	130	0.14188	-1.73
9	0.47696	-4.04	140	0.12528	-1.59
10	0.47292	-4.03	150	0.10996	-1.47
11	0.46890	-4.01	160	0.09585	-1.35
12	0.46489	-4.00	170	0.08289	-1.24
14	0.45695	-3.95	180	0.07103	-1.13
16	0.44909	-3.91	190	0.06023	-1.03
18	0.44132	-3.86	200	0.05045	-0.93
20	0.43365	-3.81	210	0.04164	-0.83
25	0.41492	-3.68	220	0.03377	-0.74
30	0.39681	-3.56	230	0.02681	-0.65
35	0.37931	-3.44	240	0.02072	-0.57
40	0.36241	-3.32	250	0.01548	-0.48
45	0.34609	-3.21	260	0.01106	-0.40
50	0.33033	-3.1	270	0.00742	-0.33
55	0.31511	-2.99	280	0.00454	-0.25
60	0.30043	-2.89	290	0.00240	-0.18
65	0.28625	-2.79	300	0.00095	-0.11
70	0.27257	-2.69	310	0.00017	-0.05
75	0.25936	-2.59	320	0.00002	0.02
80	0.24663	-2.50	330	0.00046	0.07
85	0.23434	-2.41			

表9 溫度範囲 0.3~1.8 K での ${}^3\text{He}$ 融解曲線の圧力と絶対温度 T_{62} [21]

T_{62} (K)	P (MPa)	T_{62} (K)	P (MPa)	T_{62} (K)	P (MPa)
0.30	2.932	0.80	3.516	1.40	5.275
0.32	2.931	0.90	3.744	1.50	5.646
0.40	2.952	1.00	4.010	1.60	6.033
0.50	3.030	1.10	4.294	1.70	6.438
0.60	3.153	1.20	4.604	1.80	6.858
0.70	3.319	1.30	4.928		

CMN 粉末の磁化率温度計は、 $T \leq 5$ mK で磁化率の温度依存性がキュリーワイス則からずれるため、信頼性が下がる。また、ノイズ温度計もその温度領域では熱接触が悪くなるし感度も小さくなる。ノイズ温度計で求められた T_A の値が、2.53 K から 2.81 K に亘って分散しているのがそれを証明している[29, 30, 31]。

100 mK 以下の新しい温度スケールを作る可能性は、常流動および超流動 ${}^3\text{He}$ の研究過程で見出された。それは、常流動 ${}^3\text{He}$ では、熱容量[457]、粘性[32, 33]、第ゼロ音波の吸収[31]実験である。超流動 ${}^3\text{He}$ では、A 相の NMR における周波数シフトの実験である[27, 34, 35, 36]。超流動 ${}^3\text{He}$ の 2 次相転移 T_A と 1 次相転移 T_B 線に沿った圧力の温度依存性は、温度測定のために利用できる。それら

は、磁気温度と熱力学的温度の間の補正 ($T = T^* + 0.1 \text{ mK}$) を行なった LCMN 常磁性温度計[37]を用いて測定され表になっている。これらのスケールの信頼性は、理論の正確さとその実験的チェックによって決まる。

参考文献

- [1] The International Practical Temperature Scale of 1968. Adopted by the Comite International des Poids et Mesures, Metrologia, 1969, Vol. 5, No. 2, pp. 35-44.
- [2] Brickwedde F.G., van Dijk H., Durieux M.D. *et al.*, The “1958 ${}^4\text{He}$ scale of temperatures”, J. Res. Nat. Bur. Stand. A., 1960, Vol. 64, No. 1, pp. 1-17.
- [3] Sydoriak S.G., Sherman R.H., The 1962 ${}^3\text{He}$ scale of temperatures I. New vapor pressure comparisons, J. Res. Nat. Bur. Stand. A., 1964, Vol. 68, No. 6, pp. 547-558.
- [4] Roberts T.R., Sherman R.H., Sudoriak S.G., The 1962 ${}^3\text{He}$ scale of temperatures III, Evaluation and status, J. Res. Nat. Bur. Stand. A, 1964, Vol. 68, No. 6, pp. 567-578.
- [5] Sherman R.H., Sydoriak S.G., Roberts T.R., The 1962 ${}^3\text{He}$ scale of temperatures IV, Tables, J. Res. Nat. Bur. Stand. A, 1964, Vol. 68, No. 6, pp. 579-588.
- [6] Sydoriak S.G., Roberts T.R., Sherman R.H., The 1962 ${}^3\text{He}$ scale of temperatures II. Derivation, J. Res. Nat. Bur. Stand. A., 1964, Vol. 68, No. 6, pp. 559-556.
- [7] Montgomery H., Expansion formulae for the helium-3 and helium-4 vapor pressure scales, Cryogenics, 1965, Vol. 5, No. 4, pp. 229-230.
- [8] Besley L.M., Kemp W.R.G., An intercomparison of temperature scales in the range 1 to 30 K using germanium resistance thermometry, Metrologia, 1977, Vol. 13, No. 2, pp. 35-51.
- [9] Hudson R.P., Measurement of temperature, Rev. Sci. Instr., 1980, Vol. 51, No. 7, pp. 871-881.
- [10] Terrien J., News from BIPM, Metrologia, 1977, Vol. 13, No. 2, pp. 53-54.
- [11] The 1976 provisional 0.5 K to 30 K temperature scale, Metrologia, 1969, Vol. 15, No. 2, pp. 35-44.
- [12] Soulen R.J., Jr., Marsak H., The establishment of a temperature scale from 0.01 to 0.05 K using noise and ${}^{60}\text{Co}$ ray anisotropy thermometers, Cryogenics, 1980, Vol. 20, No. 7, pp. 408-412.
- [13] Colwell J.H., Fogle W.E., Soulen J. Jr., The NBS temperature scale in the range 15 to 200 mK, Proc. 17th Int. Conf. Low Temp. Phys. (LT-17, 1984), S. 1. : S. n., 1984, Pt 1, pp. 395-396.
- [14] Fogle W.E., Hornung E.W., Mayberry M.C., *et al.*, Experiments with powdered CMN thermometers between 10 mK and 4 K and a comparison with NBS SRM 768 fixed point device, Physica B, 1982, Vol. 110, pp. 2129-2131.
- [15] Creywall D.S., Busch P.A., ${}^3\text{He}$ -melting-curve thermometry, J. Low Temp. Phys., 1982, Vol. 46, No. 5/6. pp. 451-465.
- [16] Schooley J.F., Evans G.A., Jr, Soulen R.J., Jr., Preparation and calibration of the NBD SRM 767: a superconductive temperature fixed point device, Cryogenics, 1980, Vol. 20, No. 4, pp. 193-199.
- [17] Steinbeck M., Matsumoto D., Anderson A.C., Compact low temperature fixed point device, Rev. Sci. Instr., 1979, Vol. 50, No. 2, pp. 260-261.
- [18] Colwell J.H., Schooley J.F., Soulen R.J., Use of superconductors as thermometric fixed points, J. Appl. Phys., 1969, Vol. 40, No. 5, pp. 2163.
- [19] Голуб А.А., Зарубин Л.И., Немиш И.Ю. Полупроводниковые термометры сопротивления для интервала 4,2-0,3 К., Всесоюз. совещ. "Квантовая метрология и фундаментальные физические константы". - Л., 1982. - С. 117.

- [20] Halperin W.P., Rasmussen F.B., Archie C.N., *et al.*, Properties of melting ^3He : specific heat, entropy, latent heat, temperature, *J. Low Temp. Phys.*, 1978, Vol. 31, No. 5/6, pp. 617-698.
- [21] Greywall D.S., Specific heat of normal liquid ^3He , *Phys. Rev. B*, 1983, Vol. 27, No. 5, pp. 2747-2766.
- [22] Grodski J.J., Dison A.E., Simple numerical check of calibration of germanium resistance thermometers, *Cryogenics*, 1973, Vol. 13, No. 10, pp. 614-616.
- [23] Fisher R.A., Hornung E.W., Brodale G.E., Giauque W.F., Magneto thermodynamics of $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, II., The evaluation of absolute temperature and other thermodynamic properties of CMN to 0.6 K, *J. Chem. Phys.*, 1973, Vol. 58, No. 12, pp. 5584-5604.
- [24] Hudson R.P., Kaeser R.S., CMN: magnetic temperature scale 0.002-2 K, *Physics*, 1967, Vol. 3, No. 2, pp. 95-113.
- [25] Huntzicker J.J., Shirley D.A., Proposed absolute temperature scale for cerium magnesium nitrate below 0.003 K, *Phys. Rev. B*, 1970, Vol. 2, No. 11, pp. 4420-4431.
- [26] Mess K.W., Lubbers J., Niesen L., *et al.*, Thermal and magnetic properties of cerium magnesium nitrate below 1 K, *Physica*, 1969, Vol. 41, No. 2, pp. 260-288.
- [27] Ahonen A.I., Haikala M.T., Krusius M., *et al.*, Phase diagram of liquid ^3He between 0.7 and 2.5 mK, *Phys. Rev. Lett.*, 1974, Vol. 33, No. 11, pp. 628-631.
- [28] Avenel O., Bernier M., Bloyet D., *et al.*, NMR-thermometry: experimental checks on metallic samples, *Proc. 14th Int. Conf. Low Temp. Phys.*, LT-14, 1975, Amsterdam; Oxford; New York, 1975, Vol. 4, pp. 64-67.
- [29] Johnson R.T., Wheatley J.C., Compressional cooling of ^3He to milli-degree temperatures, *J. Low Temp. Phys.*, 1970, Vol. 2, No. 3/4, pp. 423-448.
- [30] Webb R.A., Giffard R.P., Wheatley J.C., Noise thermometry at ultra-low temperature, *J. Low Temp. Phys.*, 1973, Vol. 13, No. 3/4, pp. 383-423.
- [31] Wheatley J.C., Experimental properties of the extraordinary phases of liquid ^3He at milli-kelvin temperatures, *Physica*, 1973, Vol. 69, No. 1, pp. 218-244.
- [32] Alvesalo T.A., Collan H.K., Loponen M.T., *et al.*, The viscosity and some related properties of liquid ^3He at the melting curve between 1 and 100 mK, *J. Low Temp. Phys.*, 1975, Vol. 19, No. 1/2, pp. 1-37.
- [33] Carless D.S., Hall H.E., Hook J.R., Vibrating wire measurements in liquid ^3He , I, The normal state, *J. Low Temp. Phys.*, 1983, Vol. 50, No. 5/6, pp. 583-603.
- [34] Berg R.F., Engel B.N., Ihas G.G., NMR in bulk $^3\text{He-A}$: pressure dependence and thermometry, *Proc. 17th Int. Conf. Low Temp. Phys.* (LT-17, 1984) S. 1. : S. n., 1984, Pt 2, pp. 1171-1172.
- [35] Osheroff D.D., Brinkman W.F., Longitudinal resonance and domain effects in the A and B phases of liquid helium three, *Phys. Rev. Lett.*, 1974, Vol. 32, No. 11, pp. 584-587.
- [36] Osheroff D.D., Gully W.J., Richardson R.C., *et al.*, New magnetic phenomena in liquid ^3He below 3 mK, *Phys. Rev. Lett.*, 1972, Vol. 29, No. 14, pp. 920-923.
- [37] Paulson D.N., Krusius M., Wheatley J.C., *et al.*, Magnetic thermometry to below one millikelvin with lanthanum diluted cerium magnesium nitrate, *J. Low Temp. Phys.*, 1979, Vol. 34, No. 1/2, pp. 63-83; (Err., 1979, Vol. 36, No. 5/6, p. 721).
- [38] Kummer R.B., Mueller R.M., Adams E.D., Nuclear spin ordering of solid ^3He in applied magnetic fields, *J. Low Temp. Phys.*, 1977, Vol. 27, No. 3/4, pp. 319-439.