



2019

Metody wyznaczania wartości stałej Boltzmann, redefinicja kelwina

Marek Kozicki
Samodzielne Laboratorium Termometrii GUM
14 marca 2019 r.

Obecna definicja kelwina (1967 r.)

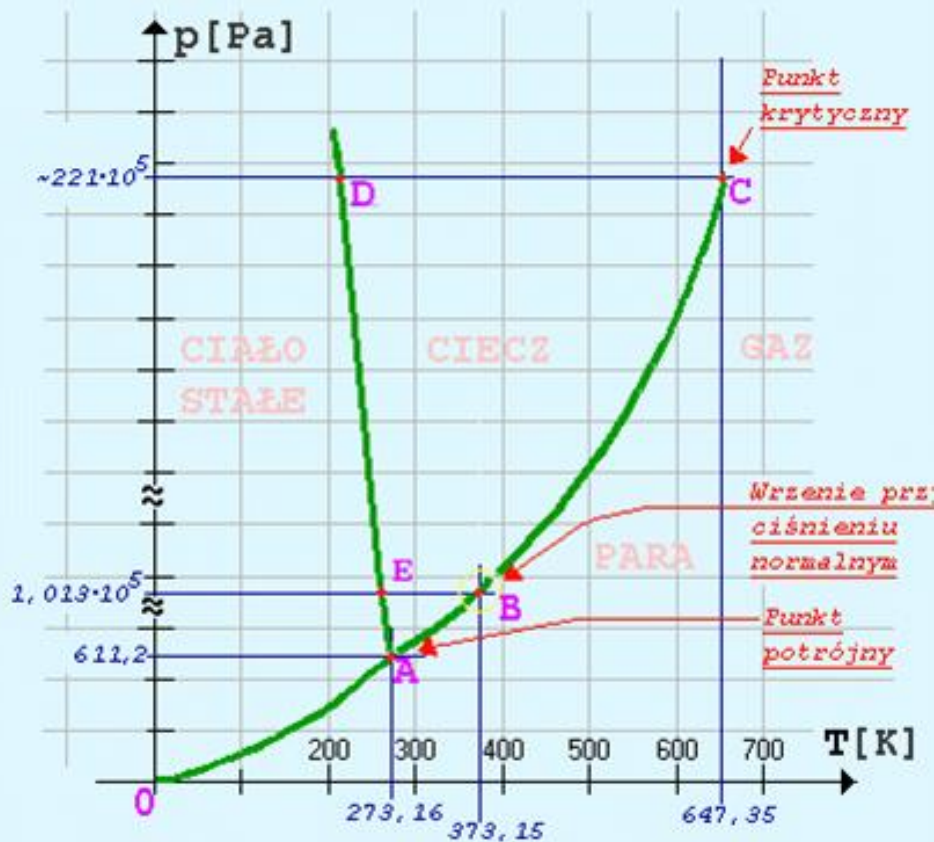
- Kelvin – jednostka temperatury w układzie SI równa $1/273,16$ temperatury punktu potrójnego wody, oznaczana K.
- Punkt potrójny – stan, w jakim dana substancja może istnieć w trzech fazach termodynamicznych równocześnie w równowadze termodynamicznej

- Punkt potrójny wody:

$$t = 273,16 \text{ K}$$

$$p = 611,2 \text{ Pa}$$

Punkt potrójny wody



Punkty stałe MST-90

Lp.	Temperatura	Substancja	Rodzaj punktu	Wr(T90)
1	od -270,15 do -268,15	³ He	V	
2	-259,3467	e-H ₂	T	0,00119007
3	-256,15	e-H ₂ (lub He)	V (lub G)	
4	-252,85	e-H ₂ (lub He)	V (lub G)	
5	-248,5939	Ne	T	0,00844974
6	-218,7916	O ₂	T	0,09171804
7	-189,3442	Ar	T	0,21585975
8	-38,8344	Hg	T	0,84414211
9	0,01	H₂O	T	1,00000000
10	29,7646	Ga	M	1,11813889
11	156,5985	In	F	1,60980185
12	231,928	Sn	F	1,89279768
13	419,527	Zn	F	2,56891730
14	660,323	Al	F	3,37600860
15	961,78	Ag	F	4,28642053
16	1064,18	Au	F	
17	1084,62	Cu	F	

Przyrządy interpolacyjne wg MST-90

0,65 K to 5,0 K:

Vapour pressure ^3He und ^4He

$$T_{90}/\text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i \left[\frac{\ln(p)/\text{Pa} - B}{C} \right]^i$$

3,0 K to 24,5561 K:

Gasthermometer (He)

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V}$$

13,8033 K bis 961,78 °C:

Standard Platinum Resistance Thermometer

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left\{ \frac{T_{90}/\text{K} - 754,15}{481} \right\}^i$$

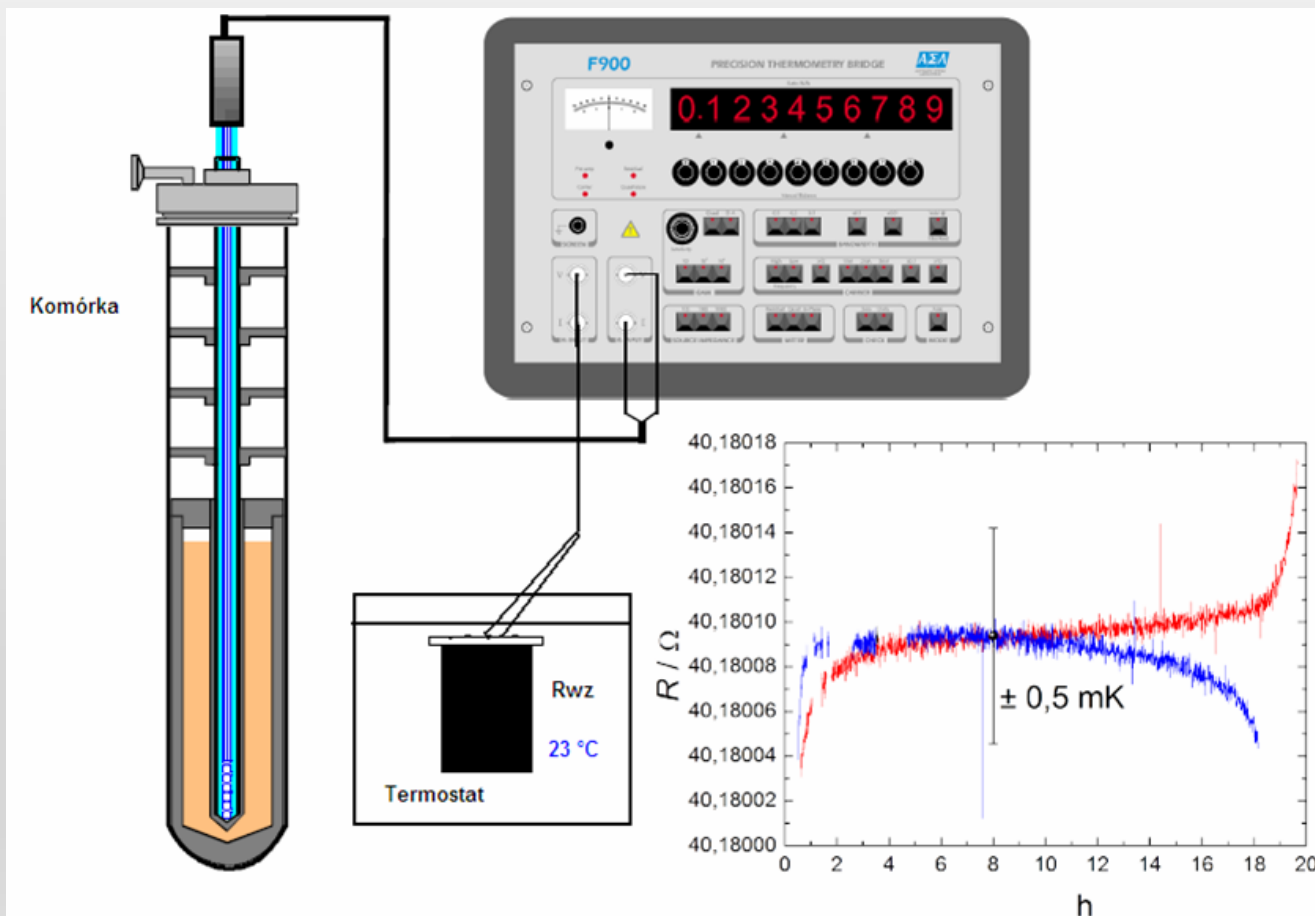
above 961,78 °C:

Radiation Thermometer

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp\{c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}\} - 1}{\exp\{c_2[\lambda T_{90}]^{-1}\} - 1}$$

X: Ag, Au, Cu; $c_2=0,014388 \text{ m}\cdot\text{K}$

Realizacja MST-90

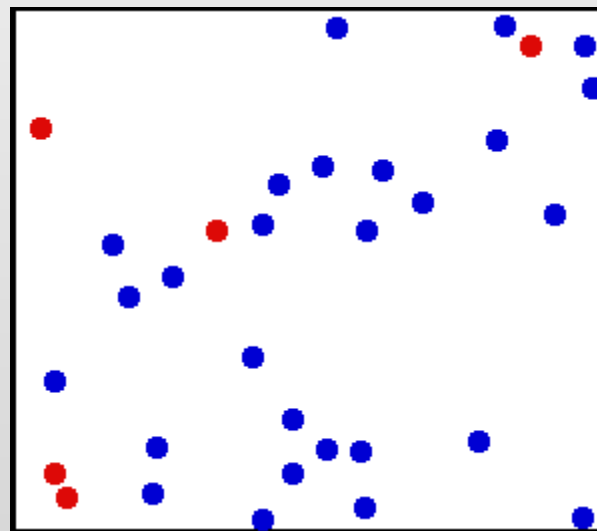


Temperatura termodynamiczna

- Teoria kinetyczna gazu (nazywana też **teorią kinetyczno-molekularną**) – temperatura określona jest przez średnią energię kinetyczną ruchu chaotycznego molekuł ciała. Większej prędkości molekuł odpowiada wyższa temperatura układu.

$$\langle E \rangle = \frac{f}{2} kT$$

- wszystkie ciała składają się w cząstek, których rozmiary można pominąć,
- cząstki znajdują się w nieprzerwanym, chaotycznym ruchu,
- cząstki oddziałują na siebie poprzez zderzenia sprężyste, a między zderzeniami poruszają się zgodnie z zasadami dynamiki Newtona,
- całkowita energia ciała jest sumą energii kinetycznej, potencjalnej i wewnętrznej tego ciała.



- Równanie Clapeyrona, równanie stanu gazu doskonałego

$$pV = nRT$$

Pomiary temperatury termodynamicznej

- Metody pomiaru temperatury, w których podstawowy związek między wielkością mierzoną a temperaturą termodynamiczną T można zapisać bez konieczności wprowadzania nieznanymi, stałych zależnych od temperatury, nazywa się termometrią pierwotną.
- W podstawowych równaniach dla tych metod, temperatura pojawia się jako energia cieplna kT .
- Tych metod można również użyć do wyznaczenia wartości stałej Boltzmann

Nowa definicja kelwina

Kelwin, oznaczenie K, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmannna k , wynoszącej $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, wyrażonej w jednostce J K^{-1} , która jest równa $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, gdzie kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Wraz z redefinicją zostanie ustanowiona nowa *mise en pratique* (MeP-K)

Warunki przyjęcia nowej wartości k

- Względna niepewność standardowa wartości stałej Boltzmannna $u(k)/k$ mniejsza niż 1×10^{-6}
- Wyznaczenie wartości k jest przeprowadzone poprzez zastosowanie przynajmniej dwóch różnych metod pomiarowych z niepewnością względną mniejszą niż 3×10^{-6} dla każdej

Termometry akustyczne (AGT)

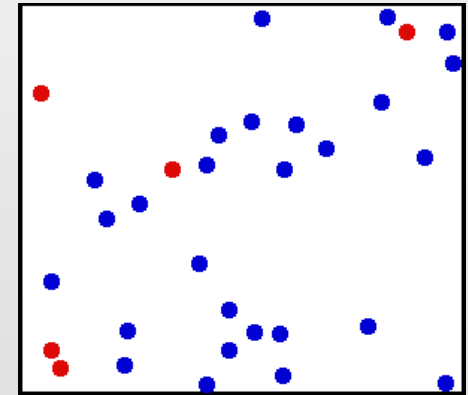
- Termometry akustyczne (Acoustic gas thermometers) działają bezpośrednio w oparciu o teorię kinetyczno-molekularną

$$\frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = \frac{3}{2} kT$$



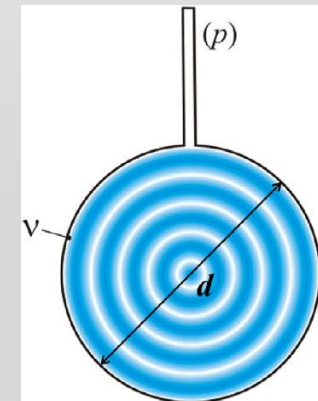
$$\frac{9}{5} u_0^2$$

$$u_0^2 = \frac{\gamma k N_A T}{M}$$



- Równanie wirialne (gaz rzeczywisty)

$$pV_m = RT(1 + Bp + Cp^2 + \dots)$$

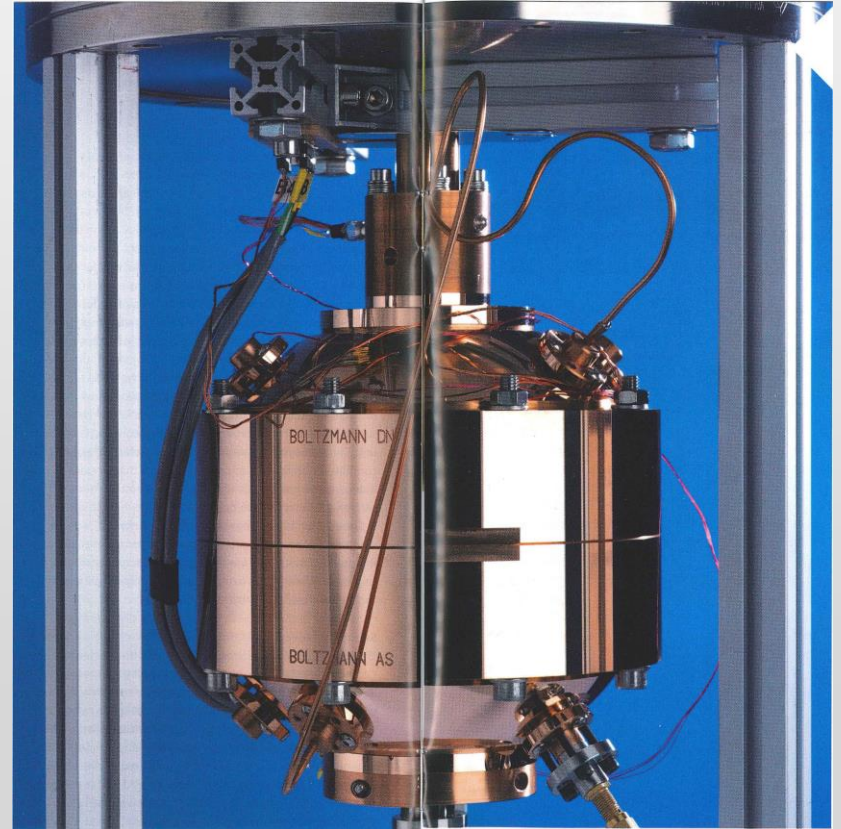


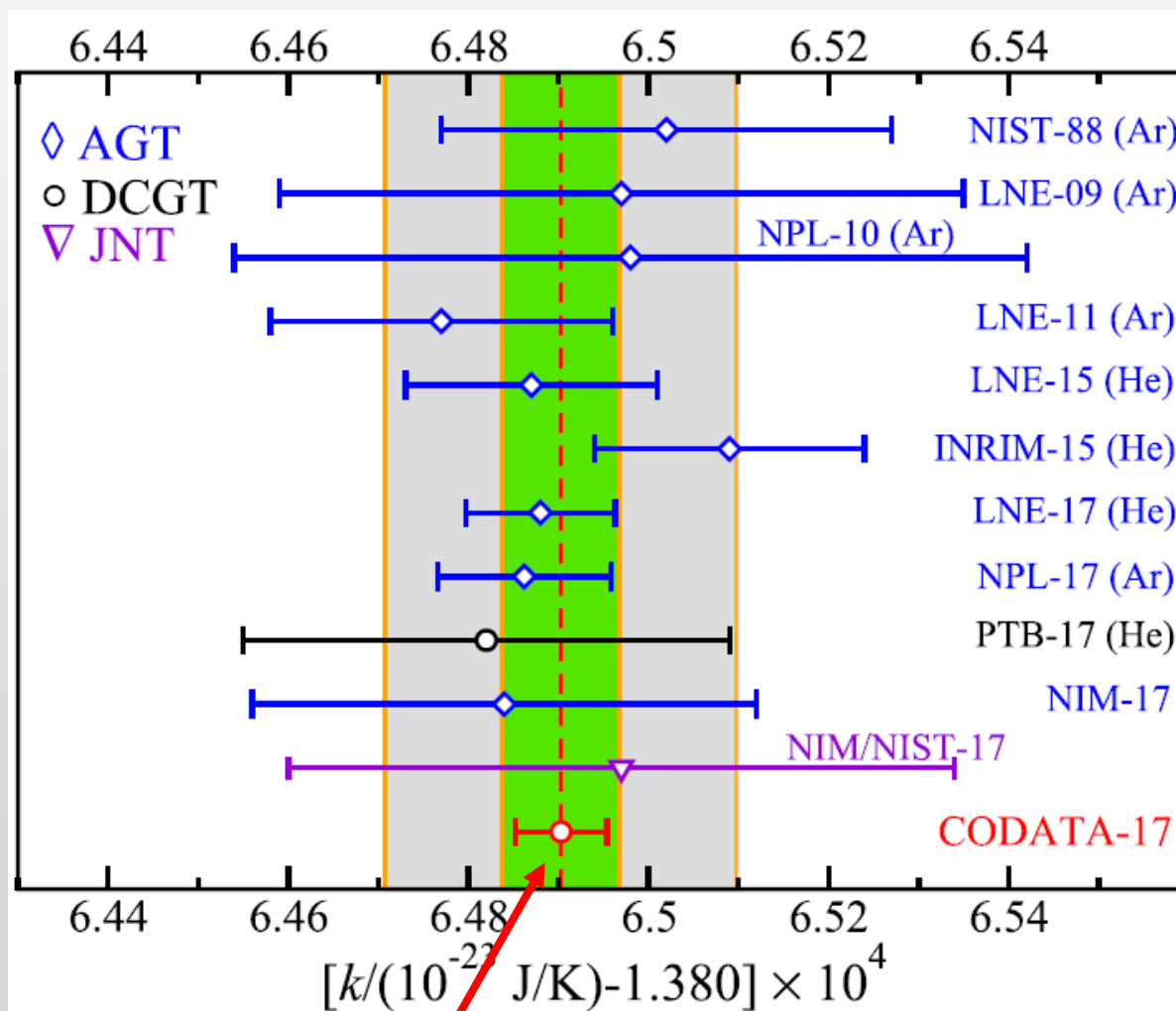
Termometry akustyczne (AGT)

- Rezonatory o kształcie cylindrycznym, sferycznym lub quasi-sferycznym
- Rezonatory quasi-sferyczne generuje się również rezonans mikrofal w celu zmierzenia wymiarów
- Używane gazy to hel i argon
- Składniki niepewności: pomiary mikrofalowe, pomiary akustyczne, czystość gazu, termostatacja i pomiar T_{90}
- Najdokładniejsze dotychczas wyznaczenie stałej Boltzmann (LNE):

$$k = 1,38064878 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$$\frac{u(k)}{k} = 0,60 \times 10^{-6}$$



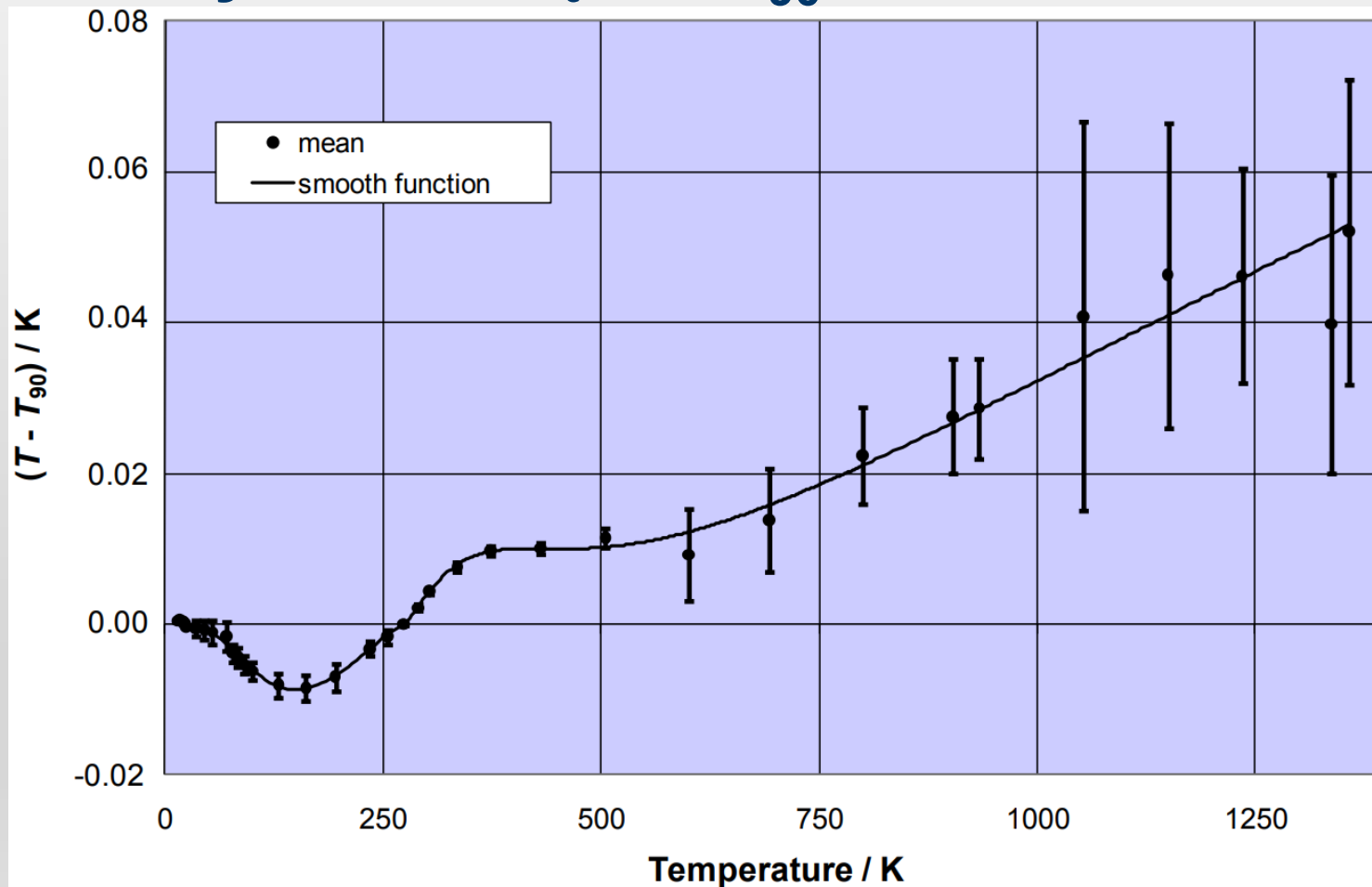


$$k = 1,38064903 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \frac{u(k)}{k} = 3,7 \times 10^{-7}$$

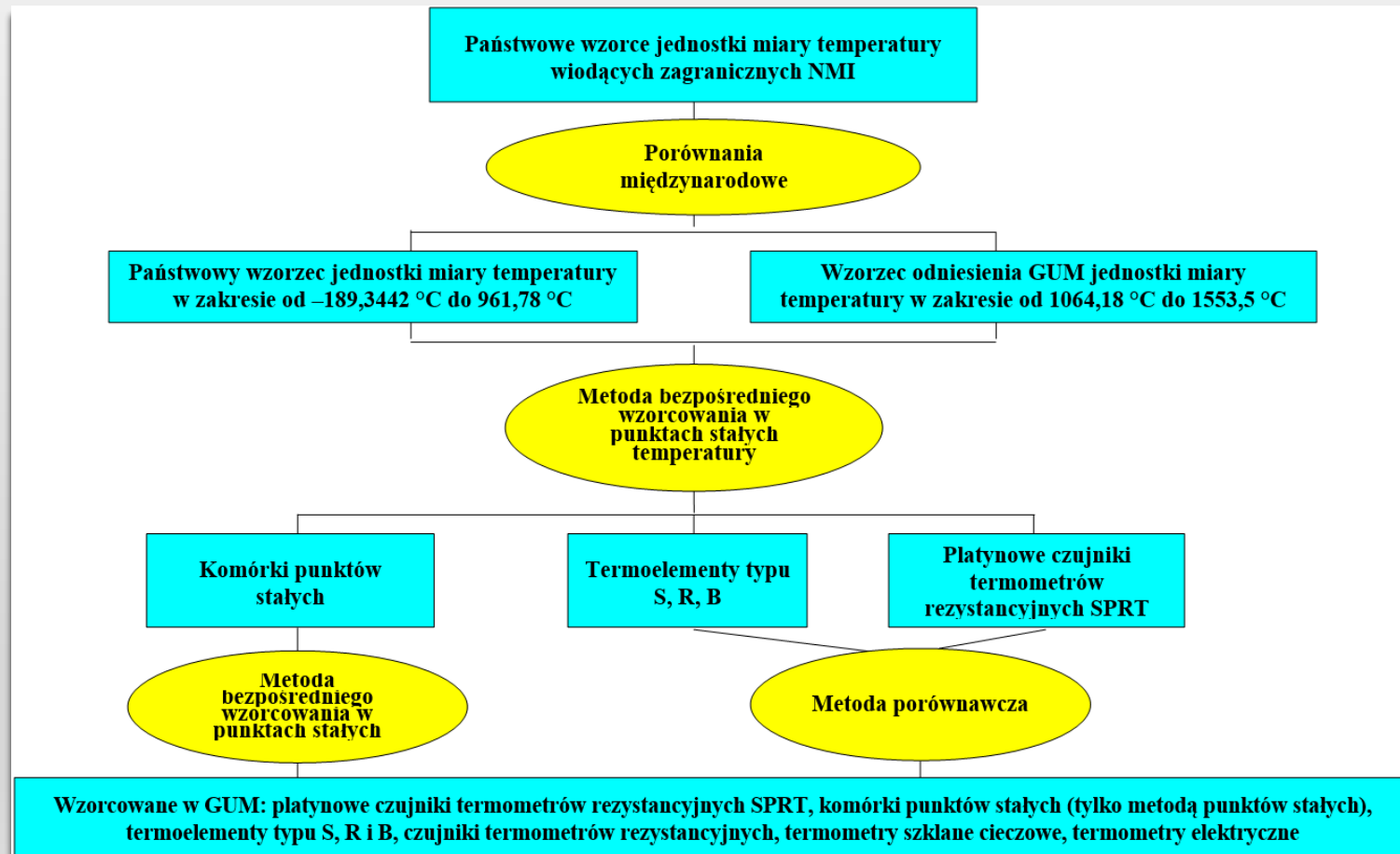
Skutki wprowadzenia nowej definicji kelwina

- Nowa definicja nie sugeruje metody odtwarzania jednostki
- Wartość nominalna temperatury punktu potrójnego wody pozostaje taka sama
- Niepewność wyznaczenia k przechodzi na punkt potrójny wody (101 μK)
- PPW traci swoją fundamentalną rolę w termodynamicznej skali temperatury
- Zostaną dopuszczone niektóre termodynamiczne metody odtwarzania jednostki
- Status MST-90 i PLTS-2000 pozostaje nienaruszony
- Możliwe będzie poprawienie niepewności pomiaru w zakresach odległych od punktu potrójnego wody
- *MeP-K* będzie umożliwiać przeliczanie wartości T na T_{90} i odwrotnie

Wyznaczenie różnic między skalą termodynamiczną T a T_{90}



Spójność w pomiarach temperatury



Literatura

- B. Fellmuth, J. Fischer, G. Machin, S. Picard, P. P. M. Steur, O. Tamura, D. R. White and H. Yoon: The kelvin redefinition and its *mise en pratique* (2015)
- *Mise en Pratique* of the definition of the kelvin – DRAFT, www.bipm.org (2013)
- Technical Annex for the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (2013)
- J. Fischer: Low uncertainty Boltzmann constant determinations and the kelvin redefinition (2015)
- H. Preston-Thomas: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 1990, vol. 27,
- CIPM: Report of the 94th meeting (2005)
- Technical Annex for the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (2013)
- Supplementary Information for The International Temperature Scale of 1990, publ. BIPM (1990)
- G. Machin: The kelvin redefined. *Measurements Science and Technology* 29 022001, 2018.
- J. Fischer, Progress towards a new definition of the kelvin. *Metrologia* 52 S364-S375, 2015
- D. B. Newell et al: The CODATA 2017 values of h , e , k , and NA for the revision of the SI. *Metrologia* 55 L13-L16, 2017.

Dziękuję za uwagę!