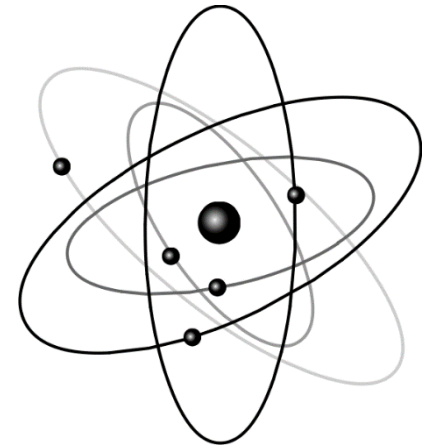




Seminarium WFiIS
Kraków, 9 listopada 2018



Redefinicja kelwina

Andrzej Zięba

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
AGH Kraków

Plan:

1. Motywacja
2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna
3. Termometria akustyczna
4. Termometria szumowa
5. Termometria stałej dielektrycznej gazu
6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He
7. Konsekwencje redefinicji kelwina

Obecna definicja kelwina

Kelwin jest $1/273,16$ częścią temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody

Nowy układ SI (kwantowy układ SI)

Wartości makroskopowych jednostek podstawowych s, m, kg, A, K, mol mają być takie, by wyrażone w tych jednostkach wartości wybranych stałych fizycznych miały ustalone wartości (tj. bez niepewności) równe:

$$\Delta \nu(133\text{Cs}) = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$h = 6,626\,06\text{X} \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$e = 1,602\,17\text{X} \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$$

$$k_B = 1,380\,6\text{X} \cdot 10^{-24} \text{ J/K}$$

$$N_A = 6,022\,14\text{X} \cdot 10^{23} \text{ 1/mol,}$$

- Dydaktyka: informacja dla nauczania fizyki
- Kontynuacja tematu z seminarium WFiS 2014/03/07, **Kwantowy układ SI**
- 18-20 listopada 2018, Wersal, posiedzenie Generalnej Konferencji Miar (CGMP) - planowane oficjalne przyjęcie zmian w układzie SI
- Info o znaczeniu pewnego wyniku elektrodynamiki kwantowej dla wyznaczenia stałej Boltzmanna – uzyskanych w zespole prof. Bogumiła Jeziorskiego z ICh UW

Plan:

1. Motywacja

2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna

3. Termometria akustyczna

4. Termometria szumowa

5. Termometria stałej dielektrycznej gazu

6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He

7. Konsekwencje redefinicji kelwina

Zasada pomiaru temperatury

- (i) Skala Celsjusza: dwa punkty stałe + interpolacja przy użyciu termometru cieczowego
- (ii) Skala termodynamiczna: jeden punkt stały (TP H_2O 273,16 K) + interpolacja termometrem gazowym H_2 lub He
- (iii) Współcześnie: zbiór punktów stałych + interpolacja termometrem Pt (skala ITS-1990, 14 punktów od TP H_2 , 13,8 K do MP Cu, 1358 K).
Pozostaje wyróżniona temperatura TP H_2O

Stała Boltzmann

- (i) Boltzmann – mechanika statystyczna gazu

$$\frac{m \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} k_B T$$

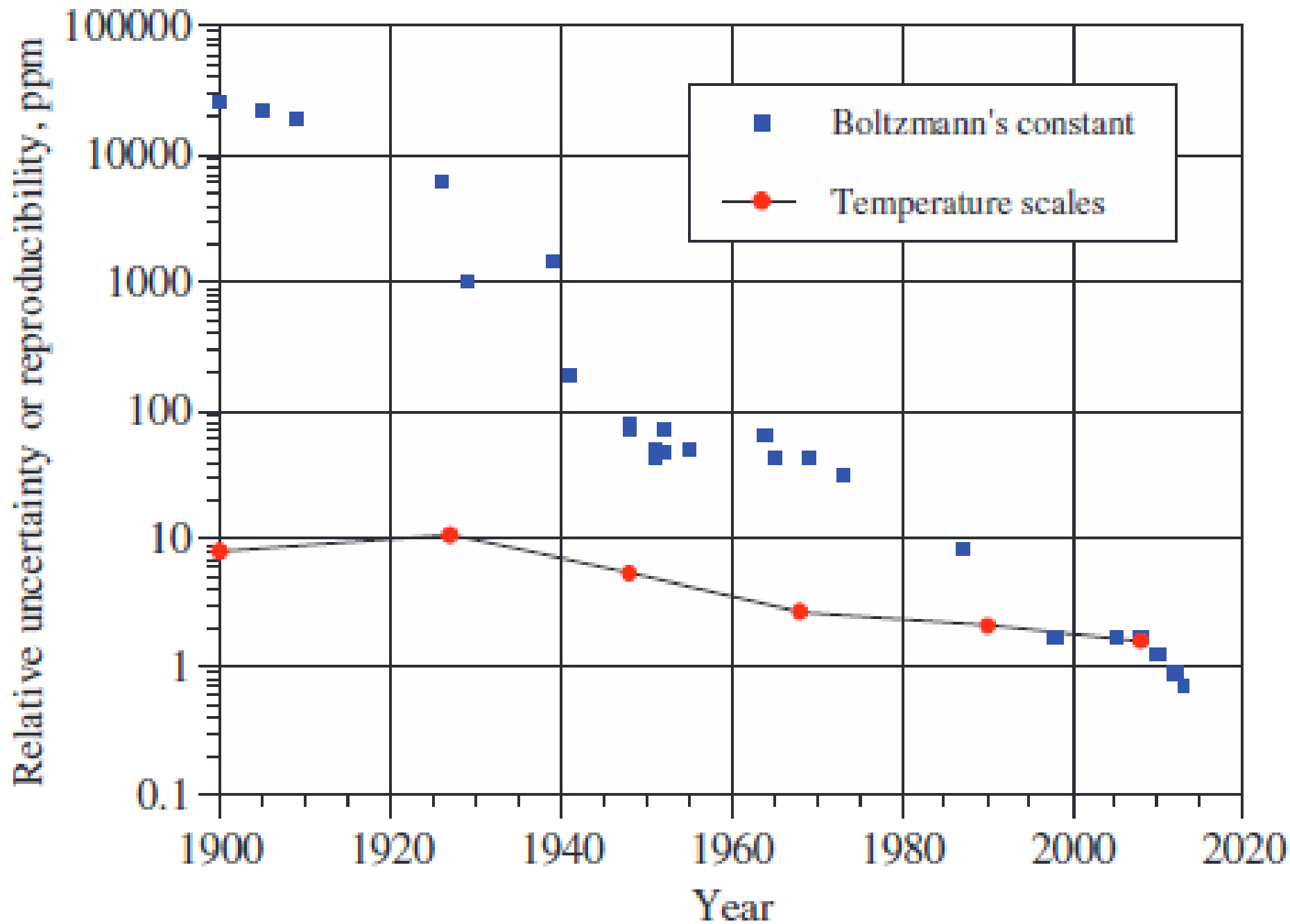
- (ii) Planck – termodynamika gazu fotonowego, wprowadza termin „stała Boltzmann”

$$I(\lambda) = \frac{2c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

- (iii) Smoluchowski, Einstein – ruchy Browna
- (iv) Perrin – 13 metod pomiaru k_B (Nobel 1926)
- (iv) obecnie – znaczenie metrologiczne ma kilka metod o dokładności rzędu 1 ppm.

Podstawa doświadczalna redefinicji:

dopiero w XXI wieku niepewność wyznaczenia stałej Boltzmann'a stała się mniejsza od niepewności skal temperatury opartych o punkty stałe



Plan:

1. Motywacja
2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna
- 3. Termometria akustyczna**
4. Termometria szumowa
5. Termometria stałej dielektrycznej gazu
6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He
7. Konsekwencje redefinicji kelwina

Prędkość dźwięku w gazach

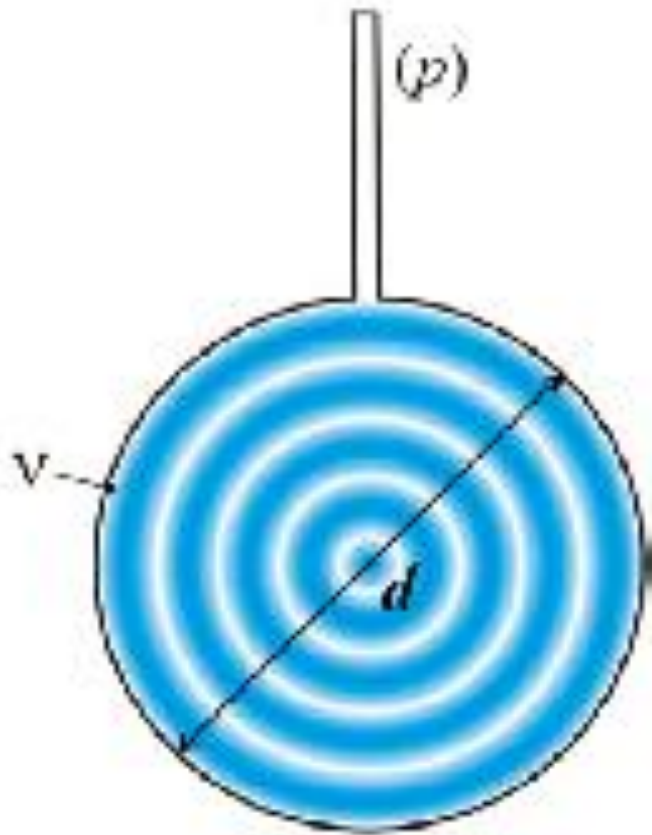
$$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}, \quad \text{gazy jednoatomowe } \kappa = \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5} = 1,4$$

- Gaz doskonały: $\frac{pV}{T} = N k_B \Rightarrow \frac{p}{\rho} = \frac{p}{\frac{Nm}{V}} = \frac{k_B T}{m}$

$$v = \sqrt{\frac{\kappa k_B T}{m}}$$

W przybliżeniu gazu doskonałego prędkość dźwięku zależy od temperatury, nie zależy od ciśnienia

Rezonans akustyczny (A) oraz elektromagnetyczny (EM)



fala akustyczna

$$f = \frac{v}{Z_{nl}^A}$$

fala elektromagnetyczna $f = \frac{c}{Z_{nl}^{EM}}$

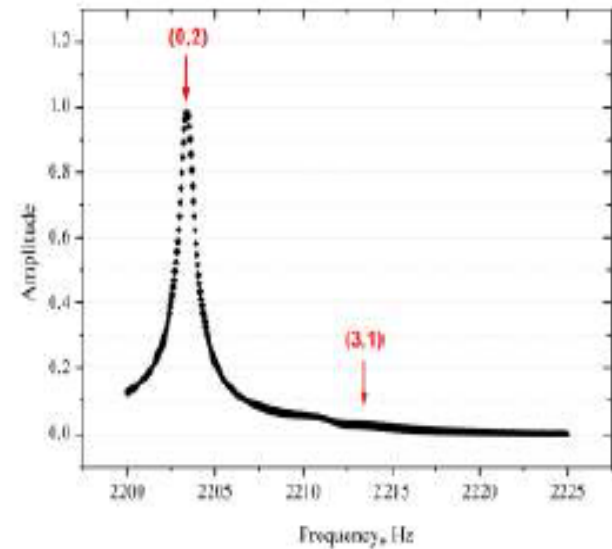
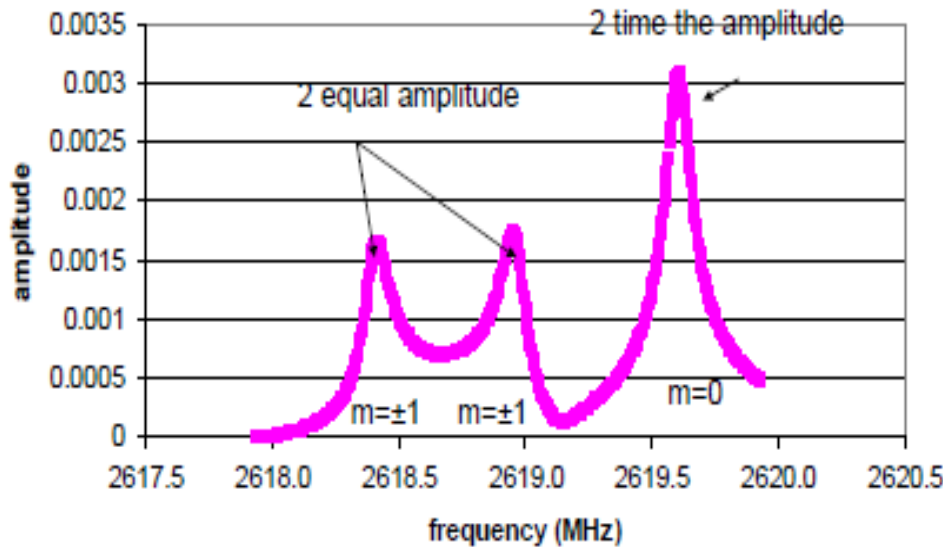
$$Z_{nl}^A \approx Z_{nl}^{EM}$$

Rezonanse EM oraz A

≈ 2,6 Ghz

≈ 2,3 kHz)

TM11 BCU3



$$k_B = \left\langle \frac{3}{5} \frac{mc_0^2}{T_{tp,water}} \left(\frac{Z_{nl}^{EM}}{Z_{nl}^A} \right)^2 \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{\langle f_{nl}^A + \Delta f_{nl}^A \rangle}{\langle f_{nl}^{EM} + \Delta f_{nl}^{EM} \rangle} \right)^2 \right\rangle$$

3.1 L diamond turned copper triaxial ellipsoid

- The resonator should give even better acoustic, electromagnetic and CMM measurements
- The thermostat is improved
- Experiment planned for this year



New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas

L Pitre^{1,8}, F Sparasci¹, L Risegari¹, C Guianvarc'h¹, C Martin¹,
M E Himbert¹, M D Plimmer¹, A Allard², B Marty³, P A Giuliano Albo⁴,
B Gao⁵, M R Moldover⁶ and J B Mehl⁷

Laboratoire Commun de Métrologie LNE-CNAM,
Paris + Turyn + Pekin + Gainsbourg (NIST)

$$u_r(k_B) = 0,56 \text{ ppm}$$

Dygresja: narodowe instytuty metrologiczne

- **Werner von Siemens.**
1887: Physikalisch-Technische Reichsanstalt
obecnie Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig + Berlin)
- **Instytuty metrologiczne: NPL 1900, NBS obecnie NIST 1901**
- **Zdzisław Rauszer**
– „ojciec założyciel” polskiej metrologii, studia we Petersburgu, uczeń Mendelejewa
Projekt Rauchera 1918: Urząd Miar
+ Królewski Instytut Metrologiczny
Dekret Piłsudskiego 1919: Główny Urząd Miar
- **Włodzimierz Lewandowski**
studia Wydział Geodezji UW, doktorat w Paryżu – pomiary czasu & systemy GPS
m. in. „Principal Physicist” w BIPM, Sevres (1985 – 2014)
motto „w poszukiwaniu straconego czasu”
2014 Polska Agencja Kosmiczna
2016-2018 Prezes GUM
Kampus Laboratoryjny GUM w Kielcach

Plan:

1. Motywacja
2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna
3. Termometria akustyczna
- 4. Termometria szumowa**
5. Termometria stałej dielektrycznej gazu
6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He
7. Konsekwencje redefinicji kelwina

Szum termiczny

wzór Johnsona-Nyquista (1928)


$$\langle U^2 \rangle = 4 k_B T R \Delta f$$

Opornik 100Ω + wyrafinowana elektronika

Pomiar porównawczy: względem „quantum-accurate pseudo-noise reference”

Długi czas pomiaru, do 100 dni

An improved electronic determination of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry

Jifeng Qu^{1,6}, Samuel P Benz², Kevin Coakley² , Horst Rogalla^{2,3}, Weston L Tew⁴, Rod White⁵, Kunli Zhou¹ and Zhenyu Zhou¹

Published 18 July 2017 • © 2017 BIPM & IOP Publishing Ltd

Metrologia, Volume 54, Number 4

1 – Narodowy Instytut Metrologii, Pekin

2, 3,4 – NIST, Boulder i Gaithersburg

5 – Measurements Standard Laboratory, NZ

$$u_r(k_B) = 2,7 \text{ ppm}$$

Plan:

1. Motywacja
2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna
3. Termometria akustyczna
4. Termometria szumowa
- 5. Termometria stałej dielektrycznej gazu**
6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He
7. Konsekwencje redefinicji kelwina

Podstawy teoretyczne

- Polaryzowalność elektryczna atomu: $\boldsymbol{\mu} = \alpha_0 \mathbf{E}$
- Podatność dielektryka: $\chi_e = n \alpha_0$
- Koncentracja n dla gazu $n = \frac{N}{V} = \frac{p}{k_B T}$
- podatność gazu (bezwzględna) $\chi_e = n \alpha_0 = \frac{p \alpha_0}{k_B T}$
- przenikalność el. bezwzględna $\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\alpha_0 p}{k_B T}$
- pojemność kondensatora ogólnie: $C = \varepsilon l^*$
gdzie l^* jest stałą o wymiarze długości

wzór końcowy:
$$\frac{C}{C_0} = 1 + \frac{\alpha_0 p}{\varepsilon_0 k_B T}$$

- **Co trzeba mierzyć?**

- (a) $T = 273,16$ – stała, duży kriostat punktu potrójnego wody
- (b) ciśnienie p – w zakresie 0 - 70 bar
- (c) pomiar C – precyzyjny mostek pojemnościowy
- (d) najważniejszy czynnik dodatkowy - kompresja elektrod kondensatora cylindrycznego

- **Co trzeba obliczyć – polaryzowalność α_0**

Układ pomiarowy w PTB

Dr. Joachim Fischer

Direktor und Professor

Fachbereichsleiter 7.4
Temperatur

Head of Department 7.4
Temperature

Telefon: 030 3481-7473

Mobil: 0175 3542476

Fax: 030 3481-7508

joachim.fischer@ptb.de

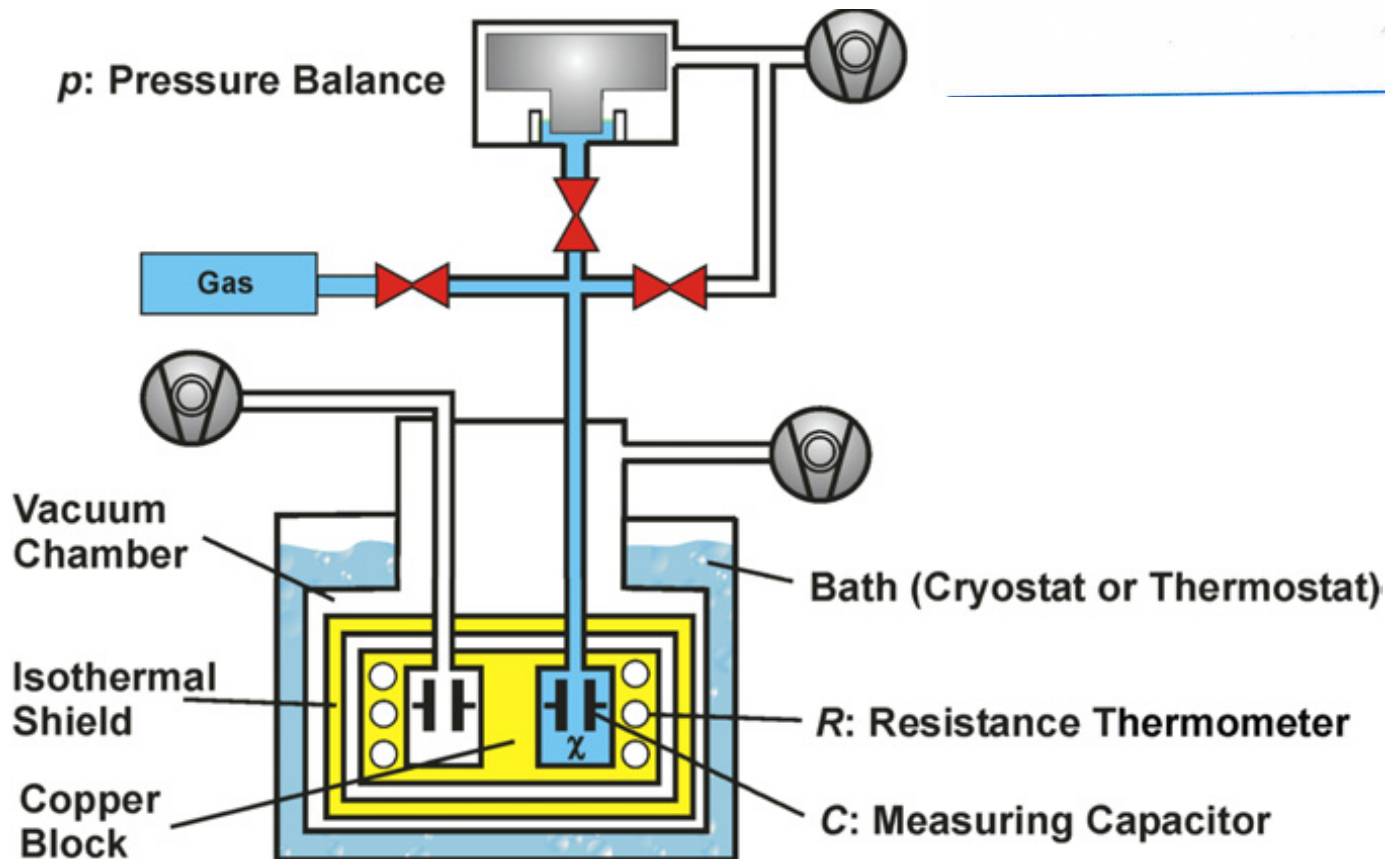


Table 2. Uncertainty budget for the determination of the Boltzmann constant k by DCGT at the TPW.

Component	$u(k)/k \cdot 10^6$
<i>Monte-Carlo simulations (type A components)</i>	
Susceptibility (scatter of capacitance bridge reading)	3.5
Pressure repeatability	1
Temperature instability	0.5
Capacitance instability	5
<i>Type B estimates</i>	
Susceptibility measurement (capacitance change)	1
Determination of effective compressibility (RUS, FEM)	5.8
Temperature (traceability to the TPW)	0.3
Pressure measurement (7 MPa)	1.9
Head correction (pressure of gas column)	0.2
Impurities (measuring gas)	2.4
Surface layers (impurities)	1
Polarizability <i>ab initio</i> calculation (theory)	0.2
Combined standard uncertainty	9.2

Final determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry

Christof Gaiser¹, Bernd Fellmuth, Norbert Haft, Axel Kuhn, Bettina Thiele-Krivoi, Thorsten Zandt, Joachim Fischer, Otto Jusko and Wladimir Sabuga

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abbestrasse 2-12, 10587, Berlin and Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

$$u_r(k_B) = 1,9 \text{ ppm}$$

Plan:

1. Motywacja
2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna
3. Termometria akustyczna
4. Termometria szumowa
5. Termometria stałej dielektrycznej gazu
- 6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He**
7. Konsekwencje redefinicji kelwina

Dygresja: warszawska szkoła chemii kwantowej

- **Włodzimierz Kołos (1928 – 1996)**
Dokładne obliczenie cząsteczki wodoru
W. Kołos and L. Wolniewicz, *Rev. Mod. Phys.* 35, 473 (1963)
też: kataliza mionowa
- **Lucjan Piela**
monografia *Idee chemii kwantowej*, PWN 2003
(w przypisie: „kołosówka”)
- **Bogumił Jeziorski**
Nagroda FNP 2000 („Polski Nobel”) w kategorii nauk ścisłych, *za stworzenie nowego formalizmu dokładnych kwantowych obliczeń oddziaływań międzyatomowych i międzymolekularnych*
Współautor prac omawianych dalej

Obliczenie polaryzowalności helu:

- **Cząsteczka helu (helium dimer):** $E = 150 \text{ neV}$, $d = 52 \text{ \AA}$
T. Korona, H. L. Williams, R. Bukowski, B. Jeziorski, and K. Szalewicz, *Helium dimer potential from symmetry-adapted perturbation theory calculations using large Gaussian geminal and orbital basis sets*, J. Chem Phys. **106**, 5109–5122 (1997).
- **M. R. Moldower (NIST, 1998)**
Can a Pressure Standard be Based on Capacitance Measurements?
- **Łach i inni (2004): polaryzowalność statyczna He**
- **Piszczałowski i inni (2015): polaryzowalność dynamiczna (częstotliwości optyczne)**

Radiative Corrections to the Polarizability of Helium

Grzegorz Łach,¹ Bogumił Jeziorski,¹ and Krzysztof Szalewicz²

¹*Department of Chemistry, University of Warsaw, Pasteura 1, 02093 Warsaw, Poland*

²*Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, Newark, Delaware 19716, USA*

(Received 12 December 2003; published 10 June 2004)

TABLE IV. Contributions to the polarizability of ${}^4\text{He}$ in atomic units $\times 10^{-6}$.

Nonrelativistic approximation	1 383 809.986 ...
α^2 relativistic corrections	-80.35(2)
Ref. [6]	-80.358 (27)
Ref. [7]	-80.34(2)
α^3 QED without $\partial_{\mathcal{E}}^2 \ln k_0$ contribution	30.473(1)
Ref. [6]	30.474(1)
α^3 QED contribution from $\partial_{\mathcal{E}}^2 \ln k_0$	0.193(2)
α^4 , $\alpha^2 m_e/M_{\text{He}}$, and $\alpha^3 m_e/M_{\text{He}}$ terms	0.49(23)
Total	1 383 760.79(23)

Frequency-Dependent Polarizability of Helium Including Relativistic Effects with Nuclear Recoil Terms

Konrad Piszczatowski,¹ Mariusz Puchalski,² Jacek Komasa,² Bogumił Jeziorski,³ and Krzysztof Szalewicz

¹*Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, Newark, Delaware 19716, USA*

²*Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University, Umultowska 89B, 61-614 Poznań, Poland*

³*Department of Chemistry, University of Warsaw, Pasteura 1, 02-093 Warsaw, Poland*

- Polaryzowalność statyczna: 1,383 760 77(14)
(Łach i inni: 1,383 760 79(23))
- Polaryzowalność dynamiczna: 1,391 811 64(14)
(dla dł fali lasera He-Ne 633 nm, $u_r = 0,1$ ppm)

Zastosowanie: **interferometryczny pomiar ciśnienia**
(zastąpi 3 m słup Hg wagi 27 kg)

Plan:

1. Motywacja
2. Pomiar temperatury a stała Boltzmannna
3. Termometria akustyczna
4. Termometria szumowa
5. Termometria stałej dielektrycznej gazu
6. Obliczenie QED polaryzowalności atomu He
- 7. Konsekwencje redefinicji kelwina**

**The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A
for the revision of the SI 2018:**

$$k_B = 1,38064903(51) \text{ J/K}$$

niepewność względna $u_r(k_B) = 0,37 \text{ ppm}$

wartość zalecona do rewizji SI:

$$k_B = 1,380649 \text{ J/K}$$

Wymagania CIPM zostały spełnione:

(i) wartość CODATA z dokł. $< 1 \text{ ppm}$

(ii) co najmniej 2 pomiary różnymi metodami z dokł. $< 3 \text{ ppm}$

Otwarta droga do zatwierdzenia redefinicji:

posiedzenie CGPM, Wersal, 13-16 listopada

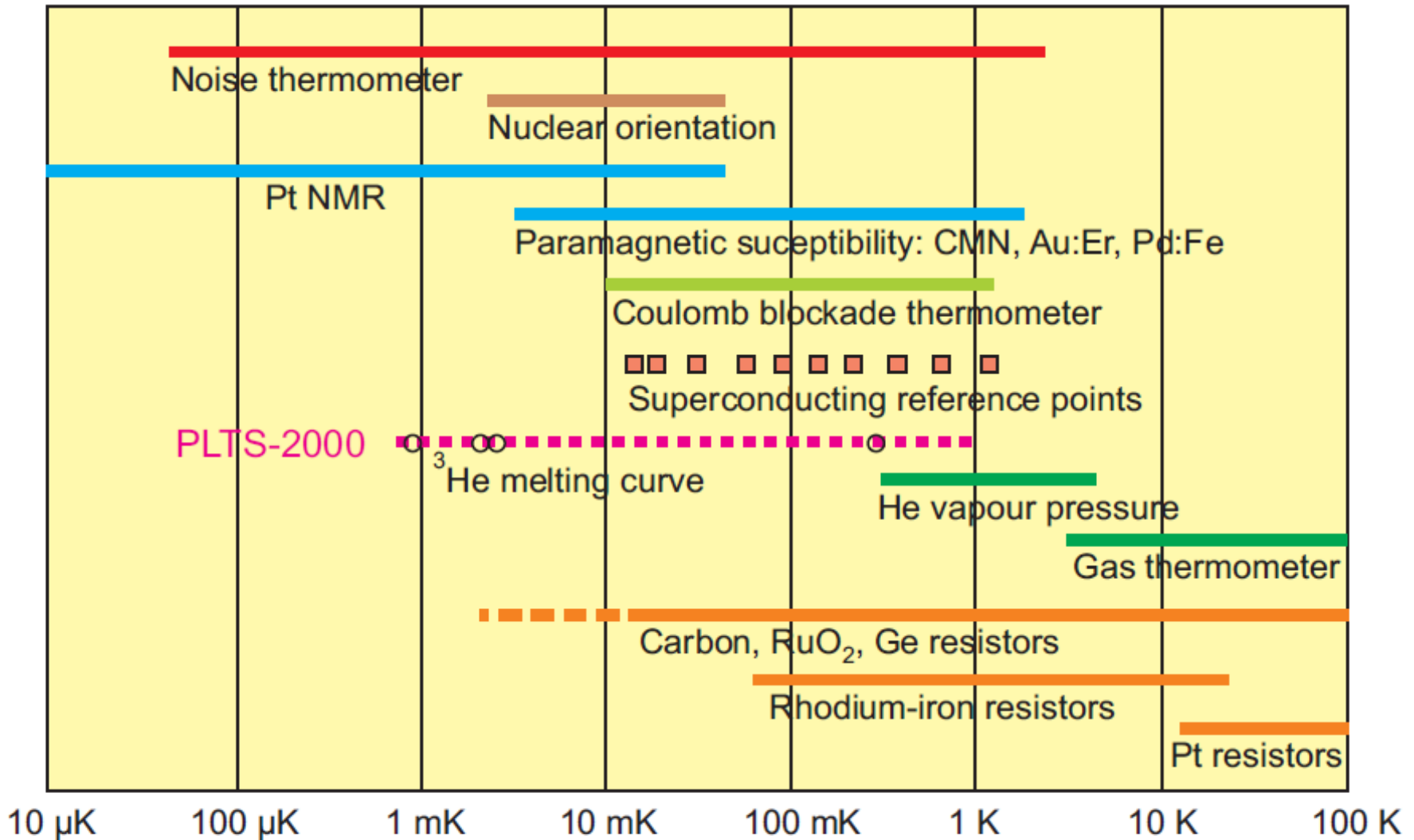
Głosowanie 15-go czyli najbliższy czwartek, godz. 15.00

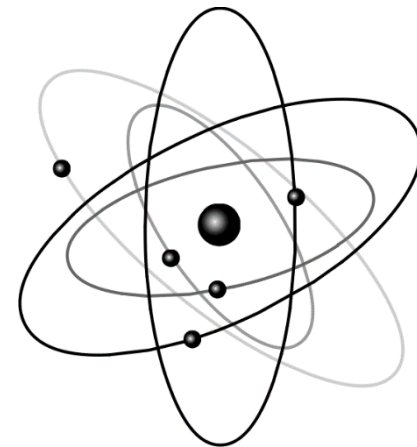
draft rezolucji udostępniony w intrnecie

Konsekwencje redefinicji kelwina

- Ustalenie k_B i innych stałych ustala wartość licznych stałych pochodnych, np. stałej gazowej $R = N_A k_B$
- W pomiarach zwykłych dokładności nic się nie zmieni
- Wszystkie punkty stałe temperatury (skala ITS-1990) będą równouprawnione. Niepewność k_B przeniesiona zostanie na niepewność temperatury **TP H₂O**
- Niezależności definicji kelwina od **TP H₂O** ułatwi rozwój nowych, *bezwzględnych* metod pomiaru temperatury, w szczególności:
 - wysoka T – termometria radiacyjna (prawo Plancka)
 - niska T – liczne metody (verte), skala PLTS-2000

Termometria w niskich temperaturach





Dziękuję za uwagę