



TEKNOLOGISK
INSTITUT

En ny definition for SI enheden for temperatur: Kelvin

Jan Hald, Dansk Fundamental Metrologi
Jan Nielsen, Teknologisk Institut



SI systemet

n Syv grundenheder:

Masse

Længde

Tid

Elektrisk strøm

Luminositet

Stofmængde

Temperatur



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (French)
INTERNATIONAL BUREAU OF WEIGHTS AND MEASURES
(English)

Temperatur

- n Vigtig parameter i fysiske og kemiske processer
- n Intuitiv forståelse svær
- n ”Den her er dobbelt så varm som den der”
– giver ikke mening
- n Skala nødvendig som laver en sammenhæng mellem varme og begrebet temperatur

Hvad er en temperaturskala

- n Formålet med en temperaturskala er at lave en praktisk håndterbar måde at angive temperaturer og ”justere” termometre efter.
- n Siden 1700 tallet har man været enige om at en skala skal være universel – dvs. realiserbar i ethvert veludstyret laboratorium.
- n En skala består af:
 - Fikspunkter
 - Et interpolerende/ekstrapolerende instrument
 - matematik

Eksempel - Fahrenheit skalaen forslået 1724 af Daniel Gabriel Fahrenheit:

n **Fikspunkter**

(inspireret af Ole Rømer 1708):

1. Is + vand + salmiak (1:1:1)
= 0 °F (-17.78 °C – derfra frysertemp.)
2. Is + vand
= 32 °F (0 °C) – da 32 kan halveres 5 gange uden brøker
3. kogende vand ved std. atmosfære = 212 °F (99.97 °C)
– oprindeligt anvendte han kropstemperatur
= $3 \times 32 = 96$ °F
dvs. 1 °F = $1/180$ af forskel mellem 2. og 3.

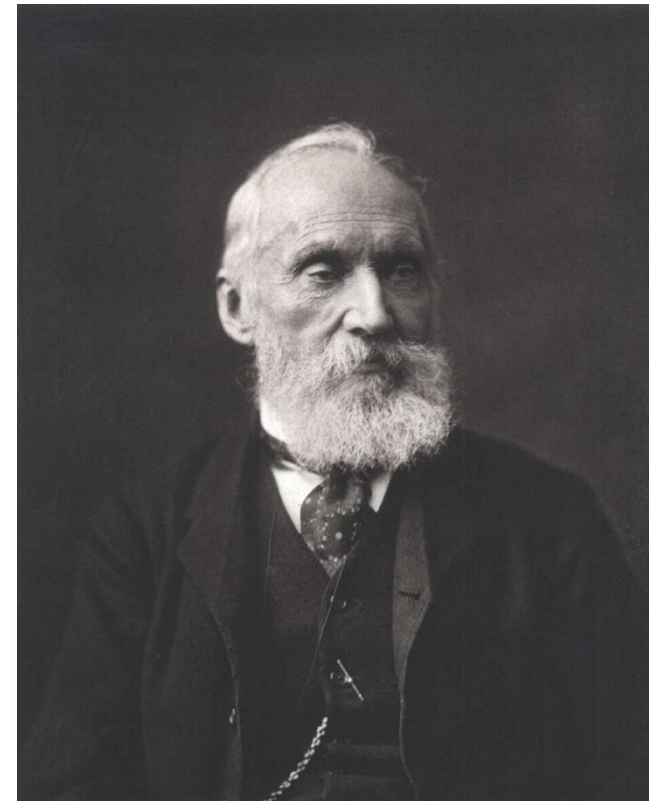
n **Interpolerende instrument**

(inspireret af florentinske vig termometre – Galilæo / Santorio ca. 1615)

Kviksølv termometer – fikspunktskalibreret og ”justeret”

n **Matematik**

relativ udvidelse af kviksølv/ glas som funktion af temperatur er lineær



Historiske temperaturskalaer (CIPM)



TEKNOLOGISK
INSTITUT

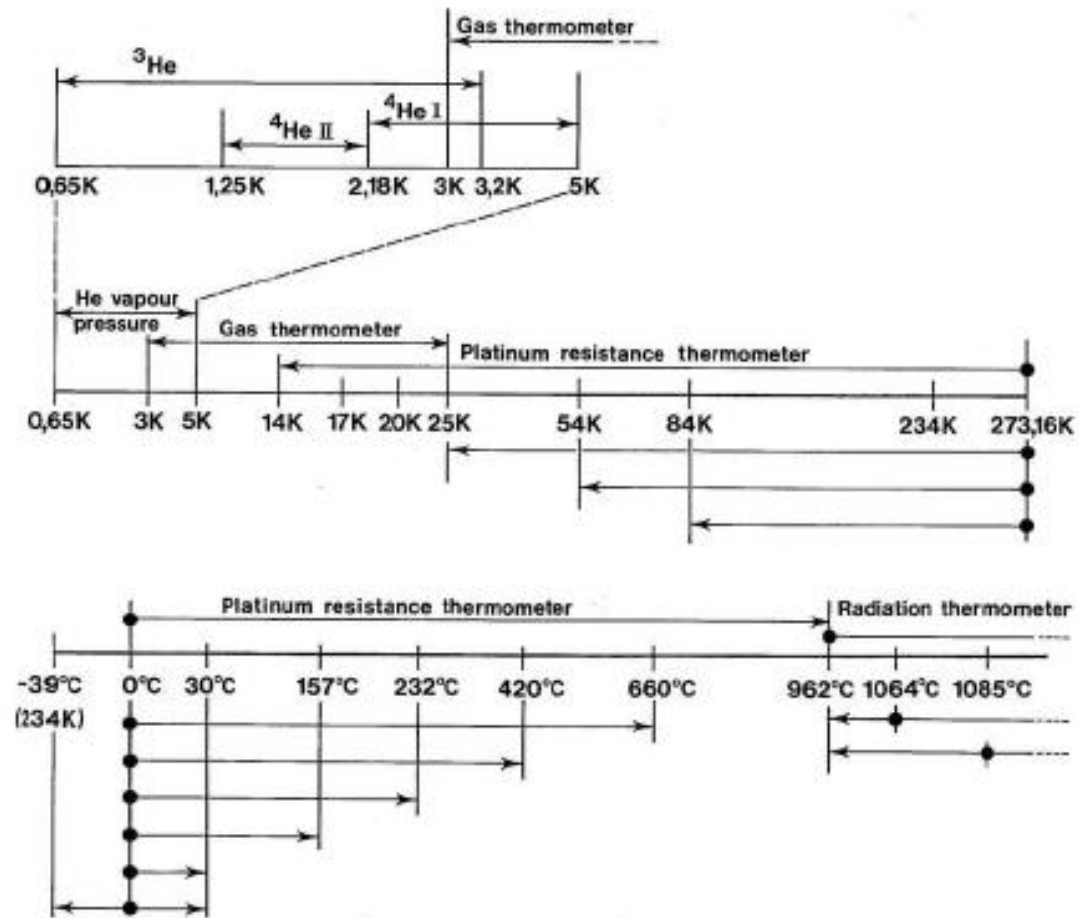
- n 1889 – Normal Hydrogen Scale (-25 ° C til 100 ° C)
termodynamisk skala
Fikspunkter: H₂O FP, H₂O BP, S BP
baseret på Gastermometer
- n 1927 – ITS 27 (-193 ° C - ???)
Fikspunkter: fra O₂ BP til Au FP (approximerer termodynamisk temperatur)
baseret på (S)PRT til 630 ° C, TC (S) fra 630 ° C til 1064 ° C, Pyrometer herover
- n 1948 – IPTS 48 (-183 ° C - ???)
Småændringer i forhold til 1927 skalaen: fx ingen ekstrapolation med PRT, Plancks lov i stedet for Wiens forskydningslov
- n 1960 – IPTS 48
Vands tripel punkt udskifter is smeltepunkt
- n 1968 – IPTS 68 (-259 ° C til ???)
6 nye fikspunkter
Matematikken for interpolationen kompliceres
- n 1975 – EPT 75 (0,5 K til 30 K)
Formål: at formindske usikkerheder pga. termodynamisk metode ved lave temperaturer
- n **1990 – ITS 90 (-272,5 ° C til ???)**
14 fikspunkter – vands tripelpunkt bliver definerende fikspunkt
For at måle hele området kræves: helium damptryk- og gastermometre, SPRT'er og strålingstermometre
Mere kompliceret matematik
- n 2000 – PLTS-2000 (Provisional Low Temperature Scale from 0.9 mK to 1 K)
- n 2005 – CIPM ændrer temperaturskalaens status fra at være en standard til at være implementering af "*mise en pratique*" for Kelvin (og åbner dermed op for alternativer)
- n 2007 – Vands tripelpunkts definition ændres
- n 2011 – Det besluttes at gå efter termodynamisk definition
- n ??? – Ny skala (eller "*mise en pratique*") på trapperne - måske

ITS 90

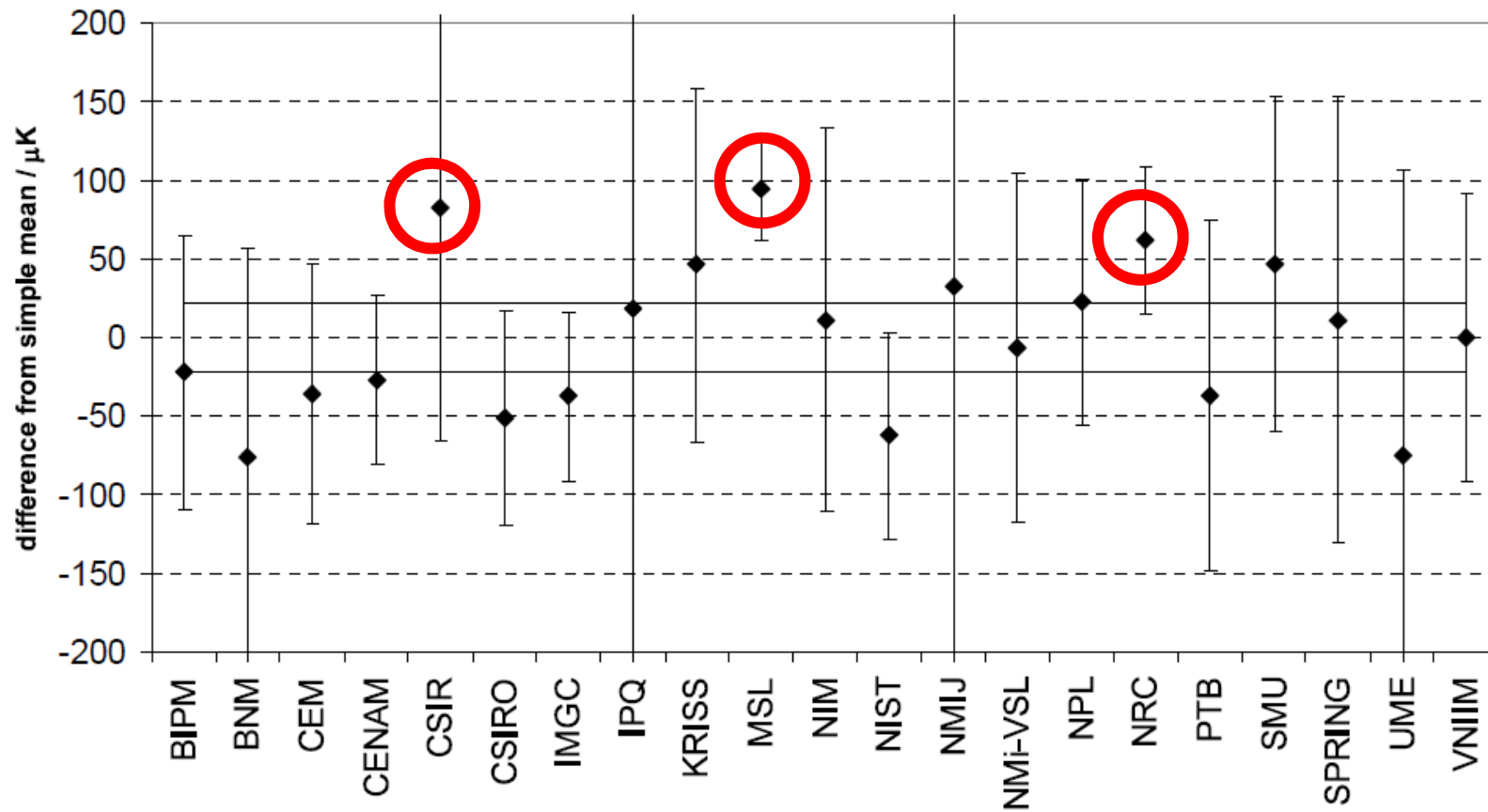

 TEKNOLOGISK
INSTITUT

Number	Temperature		Sub- stance ^{1.7}	State ^{1.8}	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$			
1	3 to 5	-270,15 to -268,15	He	vp	
2	13,8033	-259,3467	e-H ₂	tp	0,001 190 07
3	≈ 17	≈ -256,15	e-H ₂ (or He)	vp (or gp)	(0,002 296 46) ^{1.9}
4	≈ 20,3	≈ -252,85	e-H ₂ (or He)	vp (or gp)	(0,004 235 36) ^{1.9}
5	24,5561	-248,5939	Ne	tp	0,008 449 74
6	54,3584	-218,7916	O ₂	tp	0,091 718 04
7	83,8058	-189,3442	Ar	tp	0,215 859 75
8	234,3156	-38,8344	Hg	tp	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H ₂ O	tp	1,000 000 00
10	302,9146	29,7646	Ga	mp	1,118 138 89
11	429,7485	156,5985	In	fp	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn	fp	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn	fp	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al	fp	3,376 008 60
15	1234,93	961,78	Ag	fp	4,286 420 53
16	1337,33	1064,18	Au	fp	
17	1357,77	1084,62	Cu	fp	

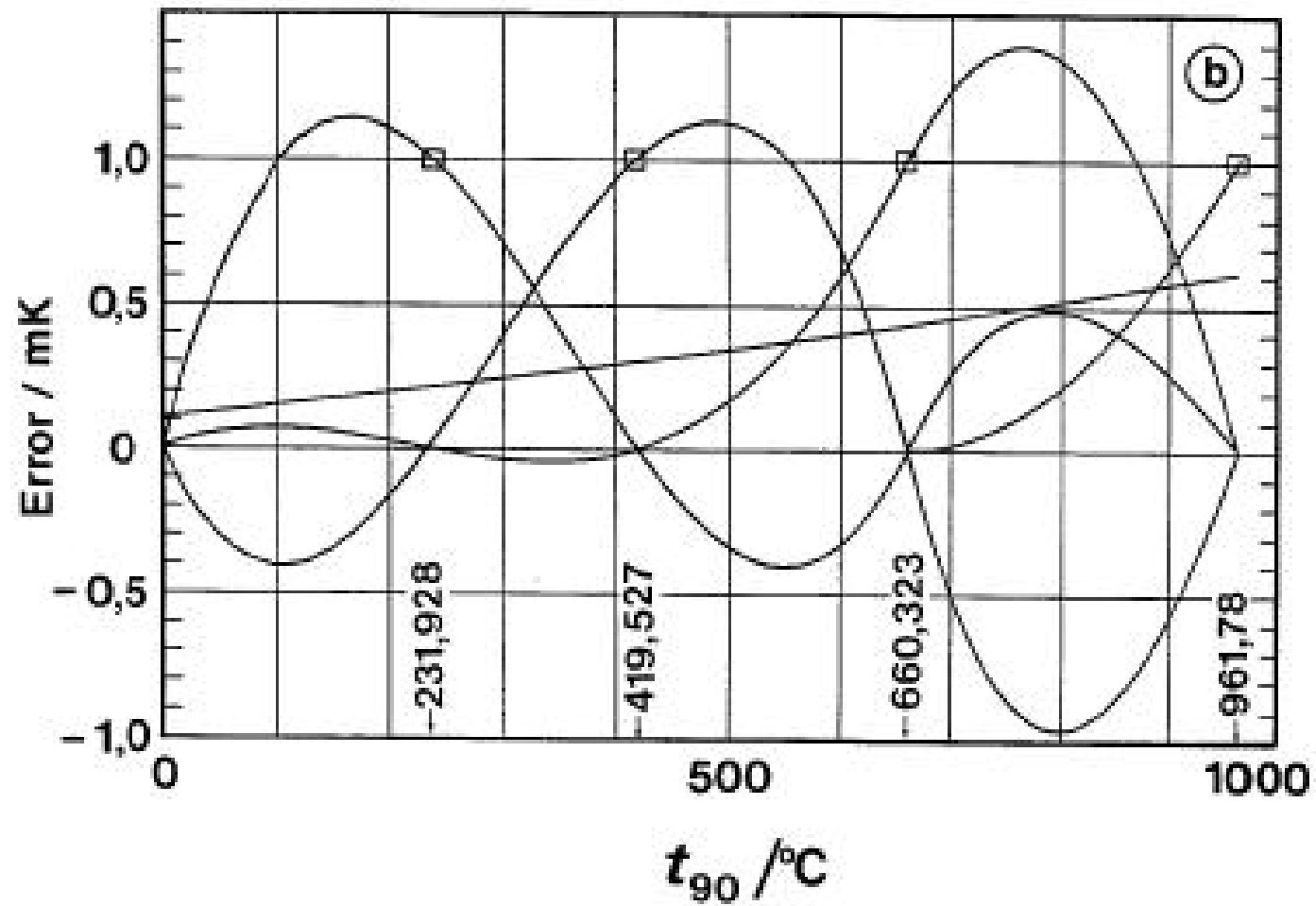
ITS 90



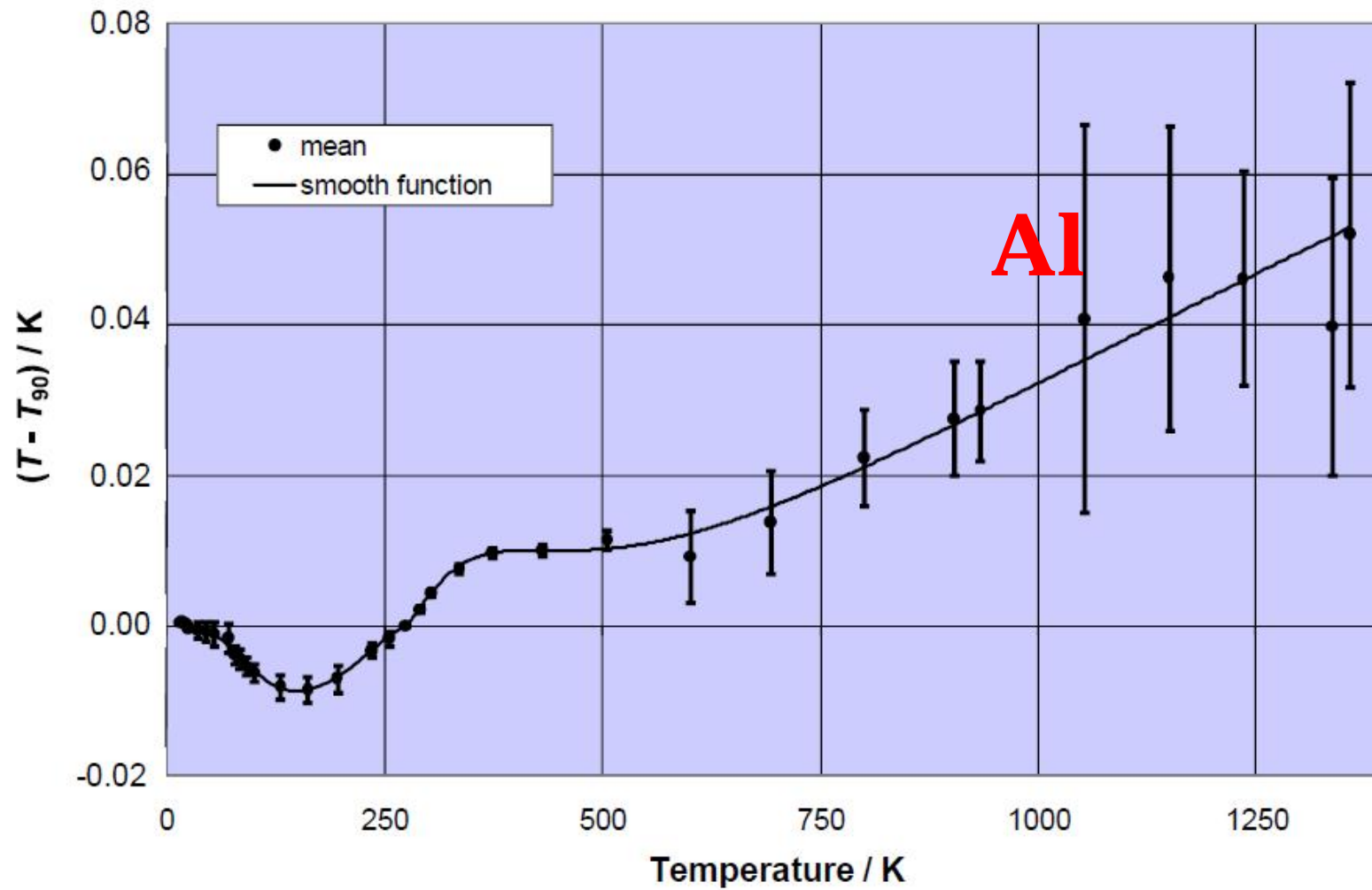
Problem: kender vi usikkerheden?



Problem: kender vi usikkerheden?



Problem: Fastlæggelse af fikspunktstemperatur



Usikkerhed ITS 90 fixpunkter

Fikspunkt	T / °C	U (T90 – bedst) / mK	U(T) / mK
Al	660	0,6	50
Zn	420	0,2	13
Sn	232	0,2	10
In	156	0,2	6
Ga	30	0,1	2
H ₂ O	0,01	0,05	1
Hg	-39	0,1	3
Ar	-189	0,2	3

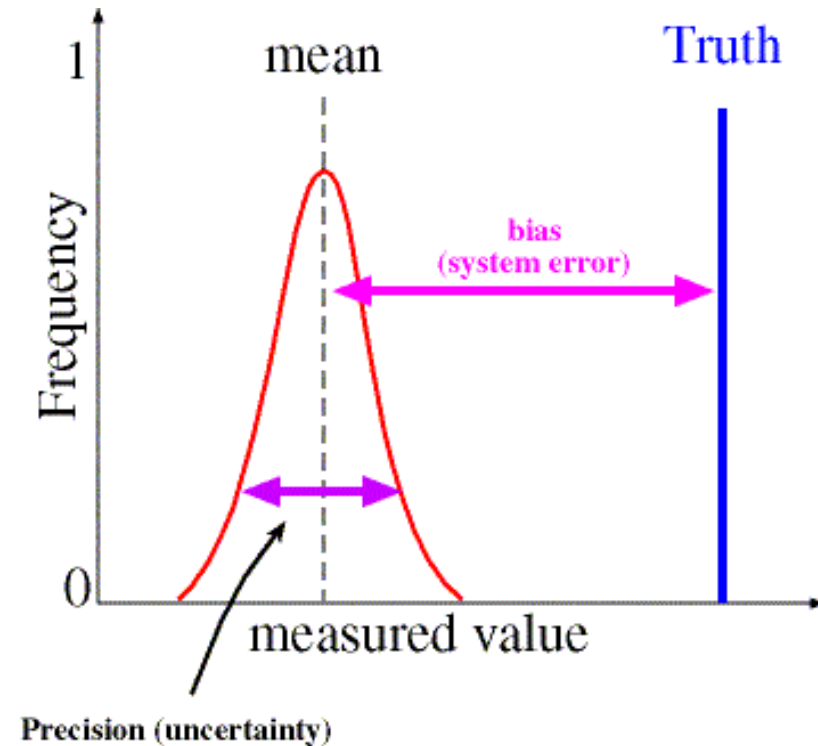
Dvs. i praksis ingen forskel mht. til industriel måling og fordelene ved at indføre en ny definition vurderes langt større end ulemperne ved den forøgede usikkerhed

Hvorfor skifte?

- n Den teknologiske udvikling af primære termometre gør nu måling af termodynamisk temperatur muligt med samme eller bedre nøjagtighed end ITS 90
- n Termodynamisk temperatur indgår i fysiske og kemiske modeller
- n Vigtig med nøjagtig termodynamisk temperatur fx i klimamodeller og havstrømme
- n Det hele bliver meget enklere hvis vi kan undgå fikspunkterne og SPRT'erne

Hvad kan og vil der ske?

- n Usikkerheden ved termodynamisk temperaturbestemmelse forventes at gå ned
- n Umiddelbart bedre usikkerhed under -250 °C og over 1000 °C
- n Frit valg mellem ITS og Termodynamisk temperatur men med tiden vil ITS forsvinde
- n ITS vil i nær fremtid stadig være aktuel mellem -200 °C og 960 °C , men ved fastlæggelse af boltzmann konstanten vil usikkerhederne umiddelbart stige



Hvad kan og vil der ske?

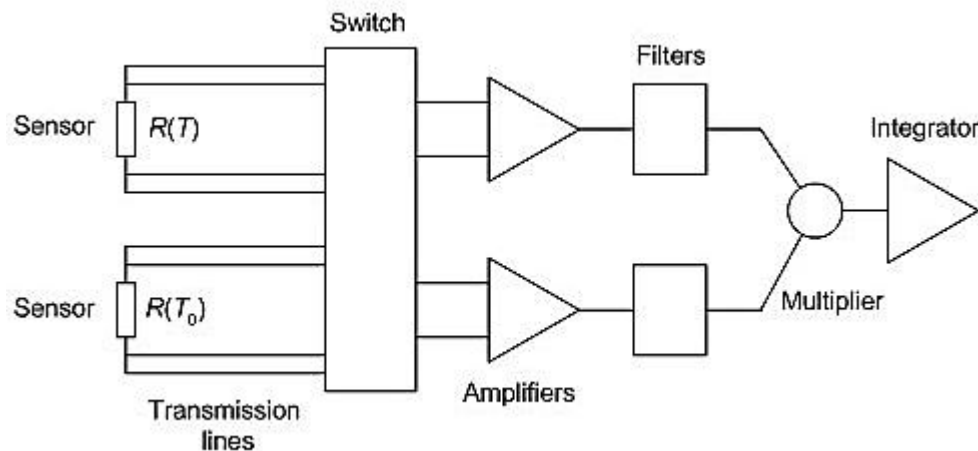
I 2005 blev temperaturskalaens status ændret fra at være en standard til at være en “*mise en pratique*” for Kelvin – hvilket åbner op for mange muligheder specielt mht. til industrien (måske) fx:

- n ligestilling mellem bad og fikspunktskalibrering via termodynamisk instrument
- n frit valg mht. til interpolationsligninger og områder
- n brug af alternative interpolationsinstrumenter fx iPRT'er, TC'er osv.
- n brug af termodynamiske instrumenter direkte

... men stadigvæk med kendt og dokumenteret usikkerhed

Eksempel Støjtermometer

- n I et støjtermometer bestemmes temperaturen fra den termiske støj “Johnson støjen” fra en ohmsk modstand (fx en Pt 100)
- n Støjtermometre er blevet udviklet de sidste 20 år og findes nu kommercielt tilgængelige.
- n Usikkerheden går som $1/\sqrt{N}$ à 10^{10} målinger og 1 TB data for SPRT usikkerheder ved stuetemperatur
- n Ved typisk industriel brug, med højere usikkerheder er måletiden sekunder



$$\overline{V_T^2} = 4kTR\Delta f$$

$$T = T_0 \times \frac{\overline{V_T^2}}{V_{T_0}^2} \times \frac{R(T_0)}{R(T)},$$

Ny temperaturdefinition

Boltzmann konstanten

§ Den termiske energi i mange fysiske love: $E = k_B \cdot T$

§ Energi af foton (lyskvant):

$$E = h \cdot f$$

Planck's konstant

Frekvens

§ Opvarmning ved absorption af n fotoner: $\Delta T = n \cdot h \cdot f / k_B$

§ Hvis k_B og h fastlægges per definition bliver temperatur og tid "ækvivalente"

§ Svarer til ækvivalens mellem tid og længde efter fastlæggelse af lyshastighed $c = 299\,792\,458$ m/s i 1984 ($\lambda = c/f$)

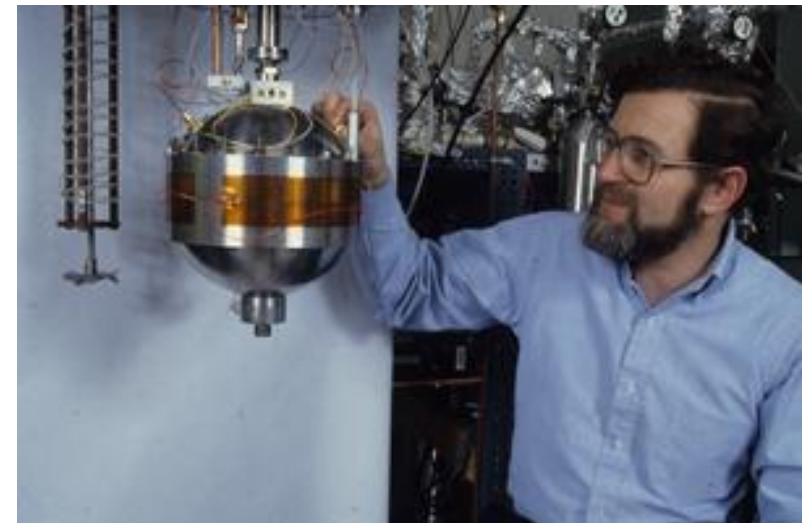
§ Fastlæggelse af h indgår i arbejdet på redefinering af kilogrammet

Boltzmann konstant 1988-2010

- § Målt i 1988 ved NIST.
- § Ét eksperiment, én metode (akustisk gastermometri - Argon)
- § Relativ usikkerhed: $1,7 \cdot 10^{-6}$ (Triplepunktcelle relativ usikkerhed $\sim 2 \cdot 10^{-7}$)

= ———

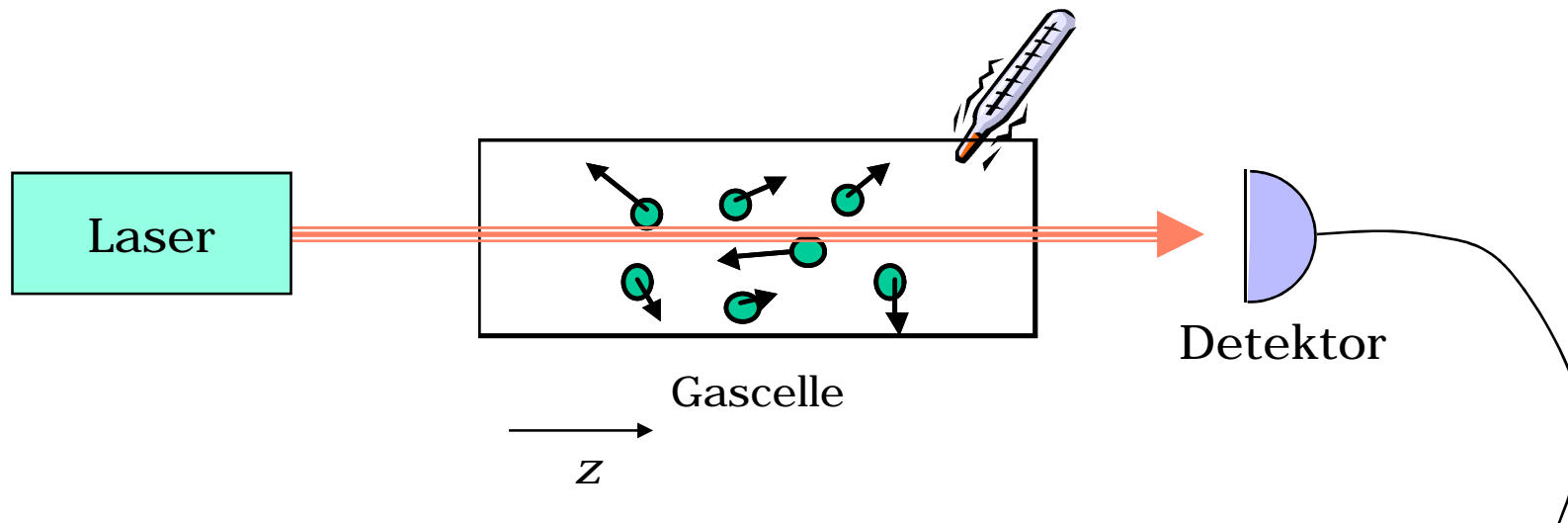
- m : Argon atommasse
- T : Temperatur (vands triplepunkt)
- u_0 : Lydens hastighed i grænsen $P \rightarrow 0$



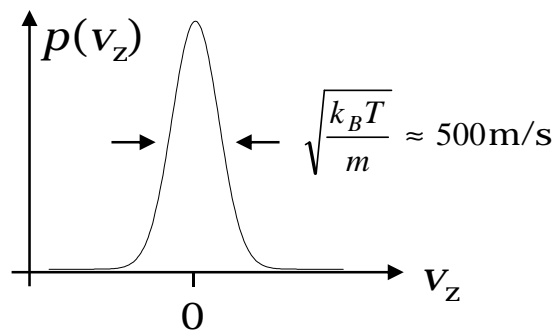
iMERA+ Boltzmann projekt 2008-2011

- § 11 deltagere, 6 europæiske nationer + IRMM
- § 8 eksperimenter, 3 metoder:
 - **Akustisk gastermometri**
 - **Dielektricitetskonstant-gastermometri**
 - **Dopplerforbredningstermometri**
- § Øget troværdighed af k_B værdi før ny definition af temperaturskala

Dopplerforbreddningstermometri



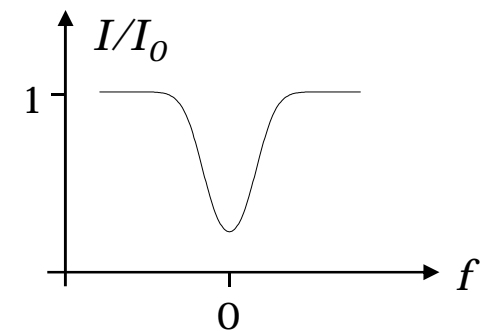
Maxwell hastighedsfordeling:



Doppler skift af lys:

$$f' = f_0 (1 - v_z/c)$$

Laser transmission:



Udfordringer



TEKNOLOGISK
INSTITUT

§ **Laser frekvensstabilitet:** 500 MHz Liniebredde, 1 ppm på k_B
⇒ relativ stabilitet på laserfrekvens $\sim 10^{-12}$!

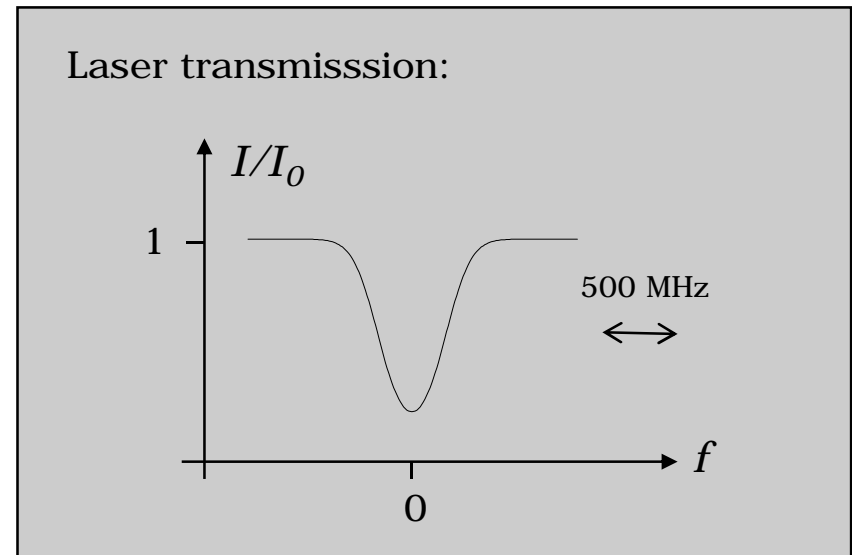
§ **Laser effektstabilitet/detektorer:** *State of the art* er ca 10^{-5}

§ **Gascelle temperaturnøjagtighed:** < 1 ppm (homogenitet/stabilitet)

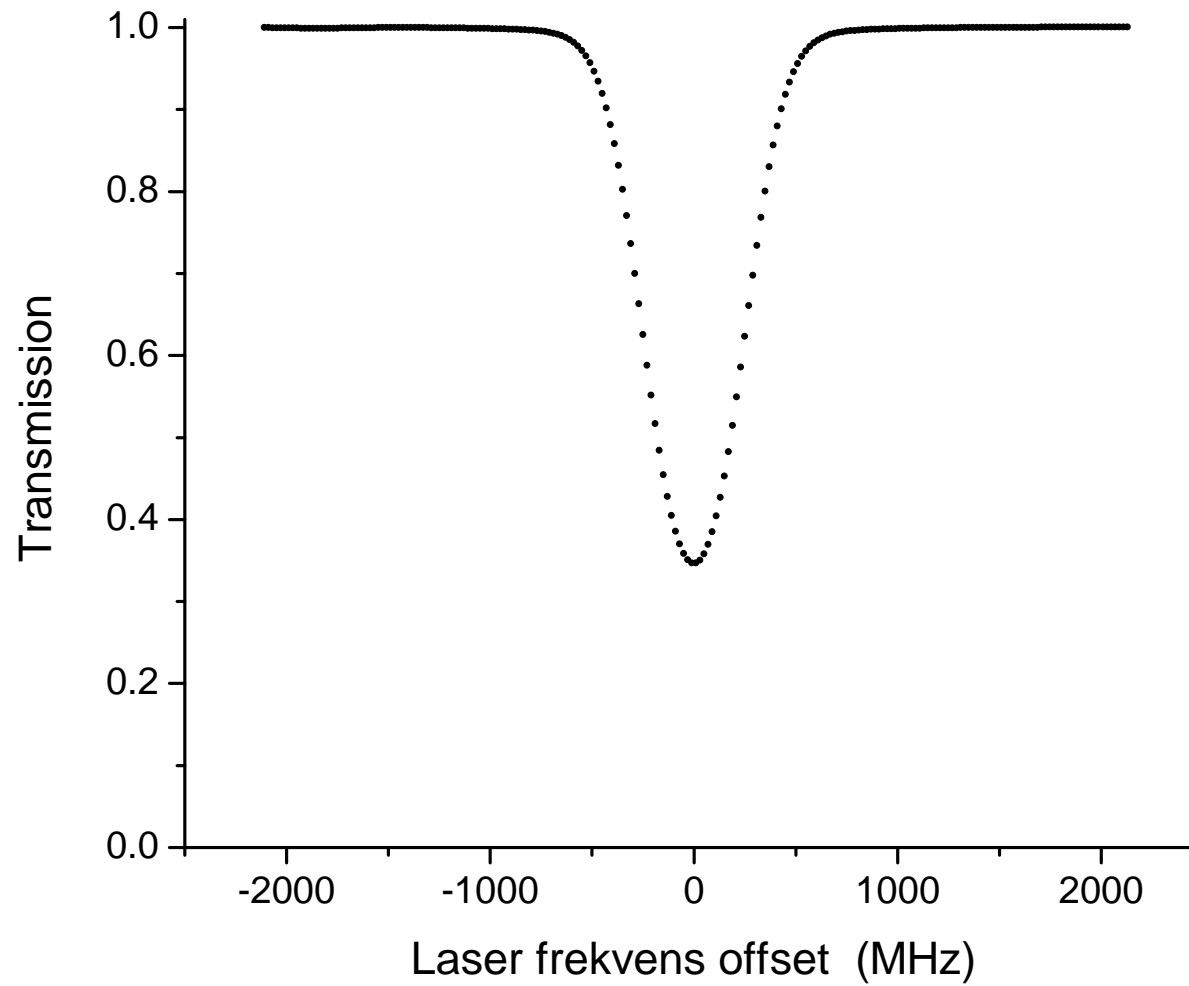
§ **Linieprofil model:**

Linieprofil modificeres af
inter-molekylære kollisioner.

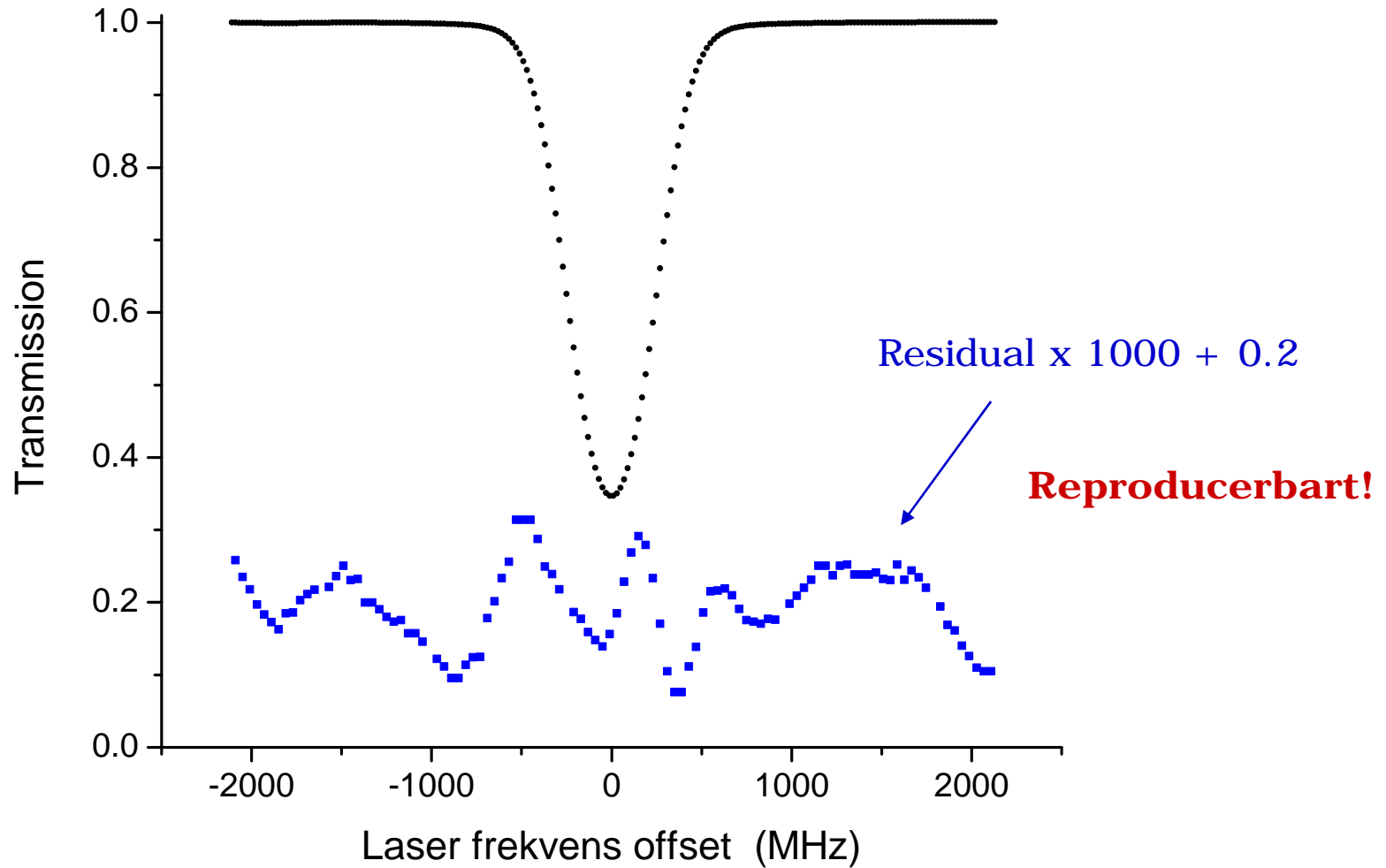
Teori herfor har mange antagelser
og approksimationer !



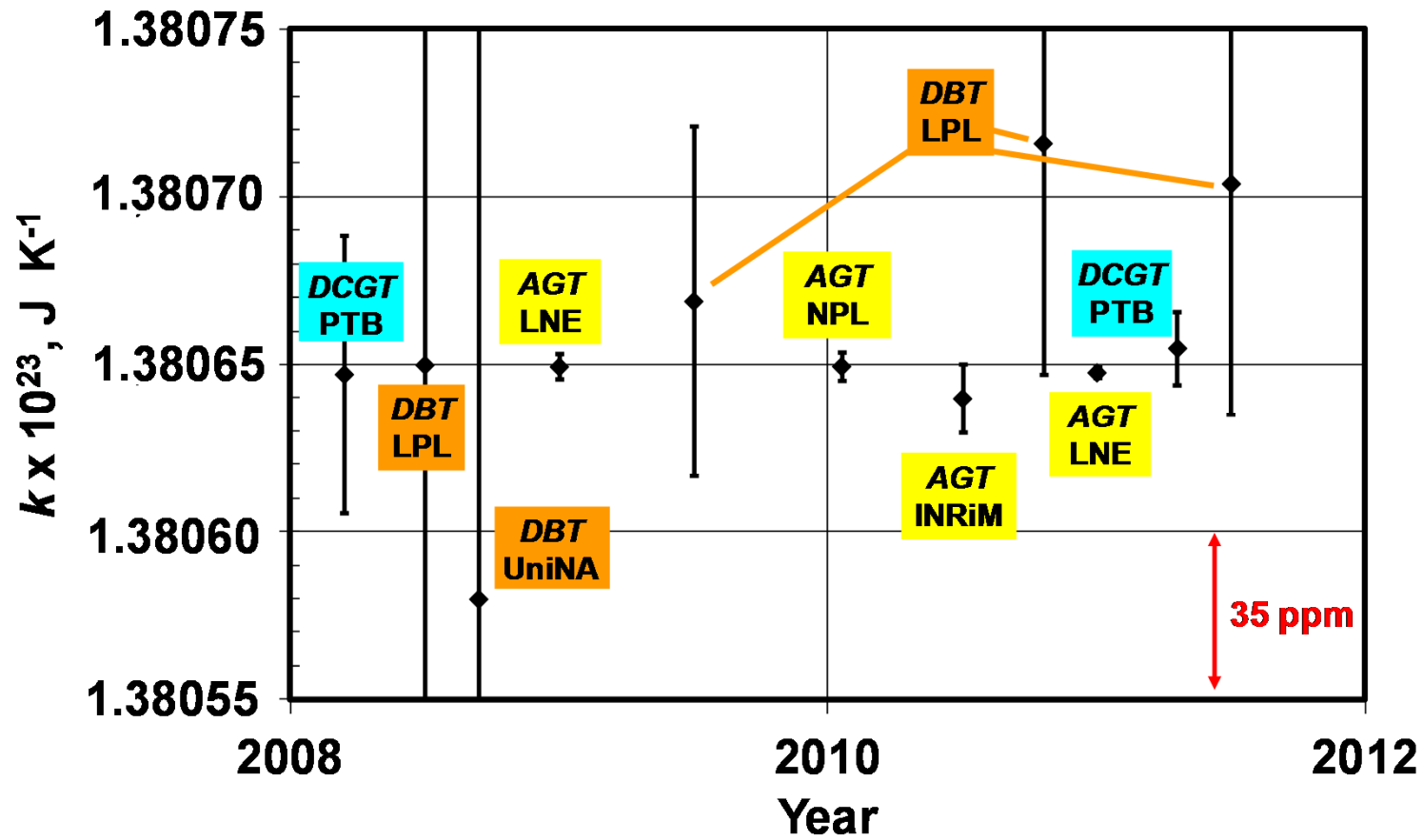
Eksperimentelle data



Eksperimentelle data



Resultater fra projekt



Ny CODATA værdi (2010)

