

# ZÁKLADNÍ TERMODYNAMICKÉ VELIČINY A JEJICH MĚŘENÍ

*Pavel Svoboda*

Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta,  
Katedra fyziky kondenzovaných látek, Ke Karlovu 5, 121 16 Praha 2





# Poděkování:

Práce je součástí projektu GAČR 108/10/1006



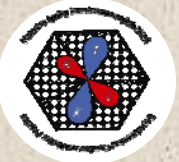
# Pojmy:

- *Veličiny*
- *měření*
- *jednotky*



## Připomínka:

*Měřením rozpadu radioaktivního uhlíku v organické nečistotě na podrážkách Cimrmanových bot, zjistil doc. Vozáb, že Cimrman přišel do Liptákova na podzim roku 1906 plus minus 200 let.*

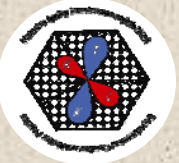


# Veličiny:

Leonard Euler, Algebra, 1765:



- *Veličinou rozumíme vše to, co se může zvětšovat nebo zmenšovat, nebo to, k čemu můžeme něco přidat či od toho něco ubrat.*
- *Existují veličiny různého druhu, jejichž studiem se zabývají různé oblasti vědy. Každá oblast vědy má své charakteristické veličiny.*
- *Měření je srovnání dané veličiny s vybranou veličinou téhož druhu (jednotkou).*



# ELEMENTS OF ALGEBRA,

BY

LEONARD EULER,

TRANSLATED FROM THE FRENCH;

*by Francis Horner*

WITH THE

*Jean*  
NOTES OF M. BERNOULLI, &c.

AND THE

*Comte de*  
ADDITIONS OF M. DE LA GRANGE.

---

THIRD EDITION,

CAREFULLY REVISED AND CORRECTED.

---

BY THE REV. JOHN HEWLETT, B.D. F.A.S. &c.

TO WHICH IS PREFIXED

A Memoir of the Life and Character of Euler,

BY THE LATE

FRANCIS HORNER, ESQ., M. P.

---

L  
C  
LONDON:

PRINTED FOR LONGMAN, HURST, REES, ORME, AND CO.  
PATERNOSTER-ROW.

1822.



## ALGEBRA.

## PART I.

*Containing the Analysis of Determinate Quantities.*

## SECTION I.

*Of the different Methods of calculating Simple Quantities.*

## CHAP. I.

*Of Mathematics in general.*

## ARTICLE I.

**W**HATEVER is capable of increase or diminution, is called *magnitude*, or *quantity*.

A sum of money therefore is a quantity, since we may increase it or diminish it. It is the same with a weight, and other things of this nature.

2. From this definition, it is evident, that the different kinds of magnitude must be so various, as to render it difficult to enumerate them: and this is the origin of the different branches of the Mathematics, each being employed on a particular kind of magnitude. Mathematics, in general, is the *science of quantity*; or, the science which investigates the means of measuring quantity.

3. Now, we cannot measure or determine any quantity, except by considering some other quantity of the same kind as known, and pointing out their mutual relation. If it were proposed, for example, to determine the quantity of a sum of money, we should take some known piece of money,

as a louis, a crown, a ducat, or some other coin, and shew how many of these pieces are contained in the given sum. In the same manner, if it were proposed to determine the quantity of a weight, we should take a certain known weight; for example, a pound, an ounce, &c. and then shew how many times one of these weights is contained in that which we are endeavouring to ascertain. If we wished to measure any length or extension, we should make use of some known length, such as a foot.

4. So that the determination, or the measure of magnitude of all kinds, is reduced to this: fix at pleasure upon any one known magnitude of the same species with that which is to be determined, and consider it as the *measure* or *unit*; then, determine the proportion of the proposed magnitude to this known measure. This proportion is always expressed by numbers; so that a number is nothing but the proportion of one magnitude to another arbitrarily assumed as the unit.

5. From this it appears, that all magnitudes may be expressed by numbers; and that the foundation of all the Mathematical Sciences must be laid in a complete treatise on the science of Numbers, and in an accurate examination of the different possible methods of calculation.

This fundamental part of mathematics is called *Analysis*, or *Algebra* \*.

6. In Algebra then we consider only numbers, which represent quantities, without regarding the different kinds of quantity. These are the subjects of other branches of the mathematics.

7. Arithmetic treats of numbers in particular, and is the *science of numbers properly so called*; but this science extends only to certain methods of calculation which occur in common practice: Algebra, on the contrary, comprehends in general all the cases that can exist in the doctrine and calculation of numbers.

\* Several mathematical writers make a distinction between *Analysis* and *Algebra*. By the term *Analysis*, they understand the method of determining those general rules, which assist the understanding in all mathematical investigations; and by *Algebra*, the instrument which this method employs for accomplishing that end. This is the definition given by M. Bezout in the preface to his Algebra. F. T.



## Veličiny:

*Veličinou rozumíme objektivní vlastnost, kterou lze kvalitativně odlišit a kvantitativně popsat.*

- *extenzivní* (kvantitativní, obecně **aditivní** – hmotnost, délka, objem, el. náboj, teplo apod.)
- *intenzivní* (kvalitativní, **neaditivní**, *stavové* – teplota, tlak, el. napětí apod.)
- *protenzivní* (stále plynoucí – čas)





# Veličiny:

## ***Základní:***

Určené dohodou

Dnes akceptovaná dohoda je poplatná technické praxi

System základních veličin:

Délka

Hmotnost

Čas

Teplota

Elektrický proud

Svítivost

Látkové množství

## ***Odvozené:***

všechny ostatní

měly by se dát ze základních veličin odvodit.



## Měření:

- Máme **dohodnutý** systém základních veličin
- Chceme popsat objektivní realitu
- Je nutno veličiny kvantifikovat
- Určit násobnost dané veličiny vůči její – opět **dohodnuté** – části
- ***Tuto část prohlásíme za jednotku***

$$X = \nu \cdot U$$

$X$  je libovolná veličina

$U$  je její jednotka (unit)

$\nu$  označuje hodnotu – násobnost veličiny

Mars Climate Orbiter

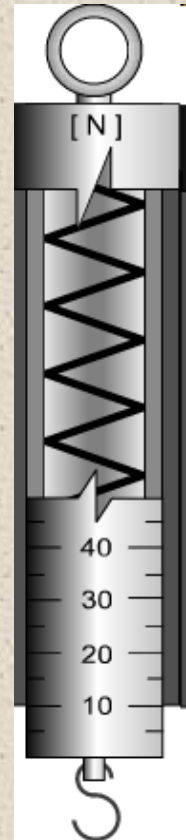


*The peer review preliminary findings indicate that one team used **English units** (e.g., inches, feet and pounds) while the other used **metric units** for a key spacecraft operation. M\$ 655.2...*



## Měření:

- *extenzivní* – měříme přímo srovnáním s etalonem
- požadavek aditivity  $\Rightarrow$  *lineární škála*
- *Veškerá měření se snažíme převést na měření délky*
- *př.: měření hmotnosti - vážení*



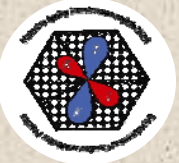


*Etalon mohu vytvořit pouze pro veličinu extenzivní*

jeden kilogram

jeden metr

Tyto etalony byly také vytvořeny a uloženy v mezinárodním ústavu pro míry a váhy (Sèvres u Paříže).



## Jednotky:

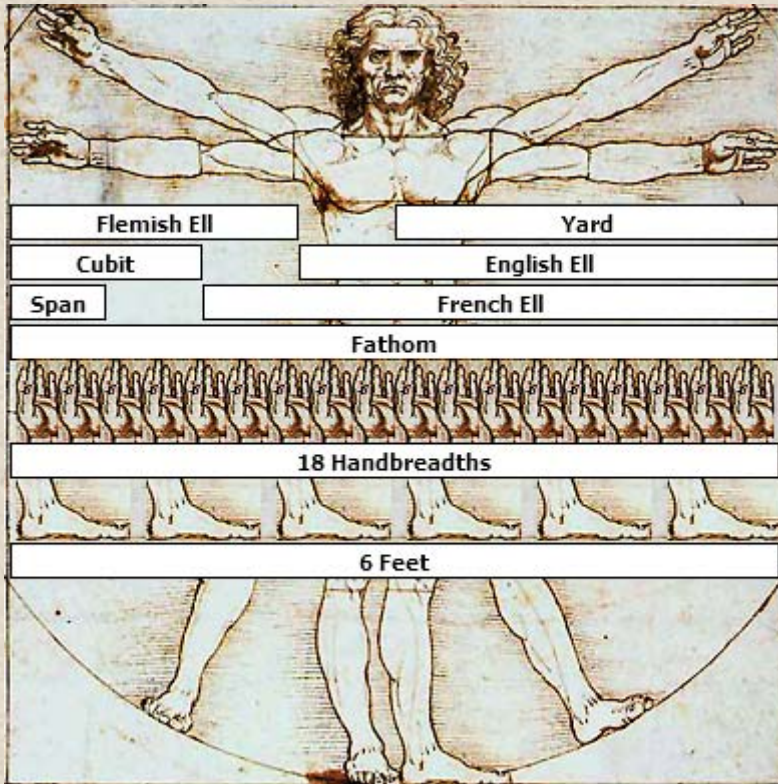
- *užívané etalony extenzivních veličin*
- *metr*
- *kilogram*





# Měření délky:

## *Vývoj etalonů:*



Dřevěný  
egyptský loket





# Měření hmotnosti:

## Vývoj etalonů:



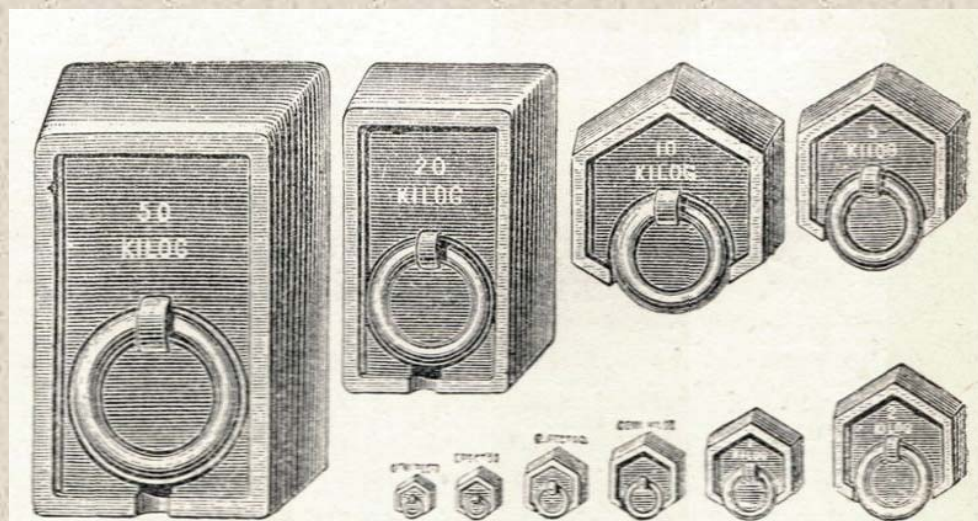
*Hematitová závaží ve tvaru kachen. Mezopotámie, asi 1700 př.n.l.*



*Rohovník obecný - karát*



*Talent*



*Série de Poids en fonte.*

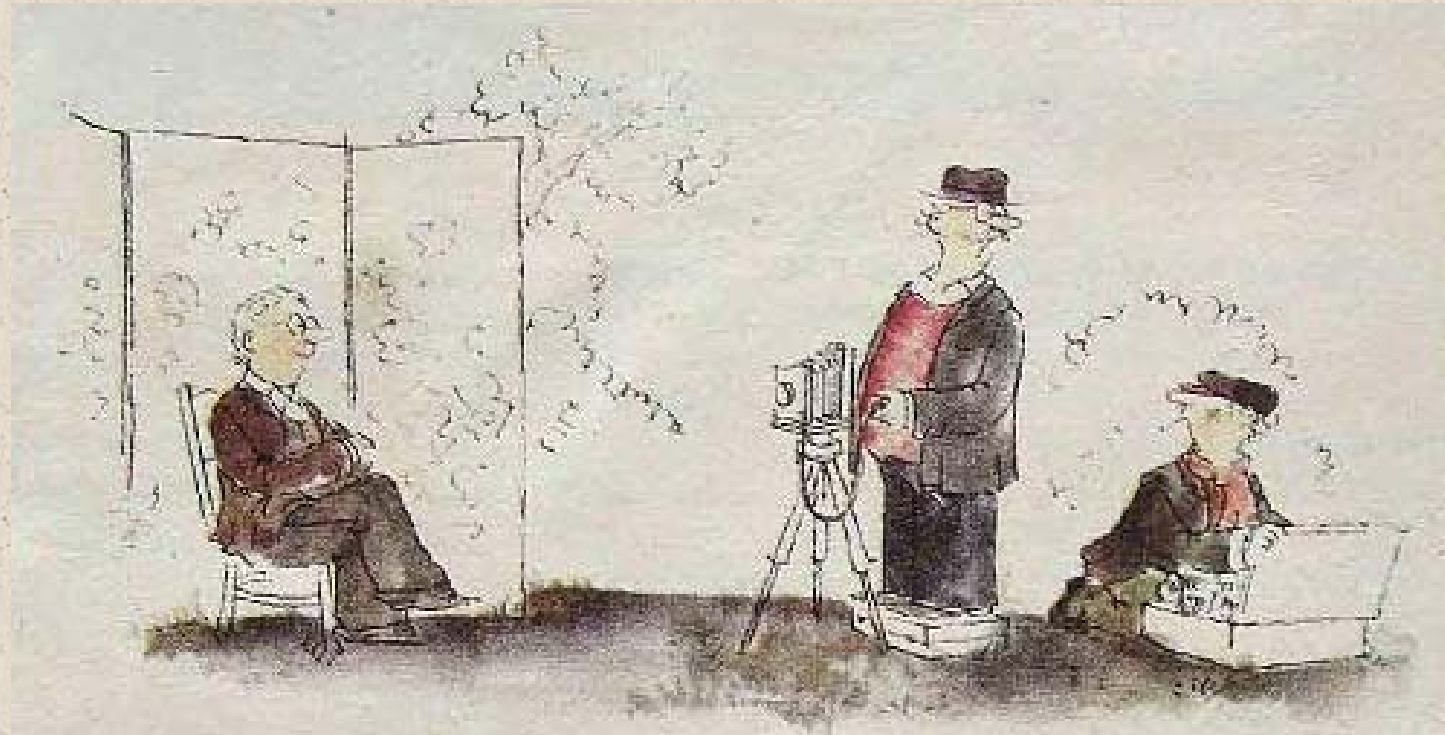


*Trojská unce*



## *Problém* – nemáme etalony:

- *intenzivní* (teplota, tlak, el. napětí apod.)
- *protenzivní* (čas)



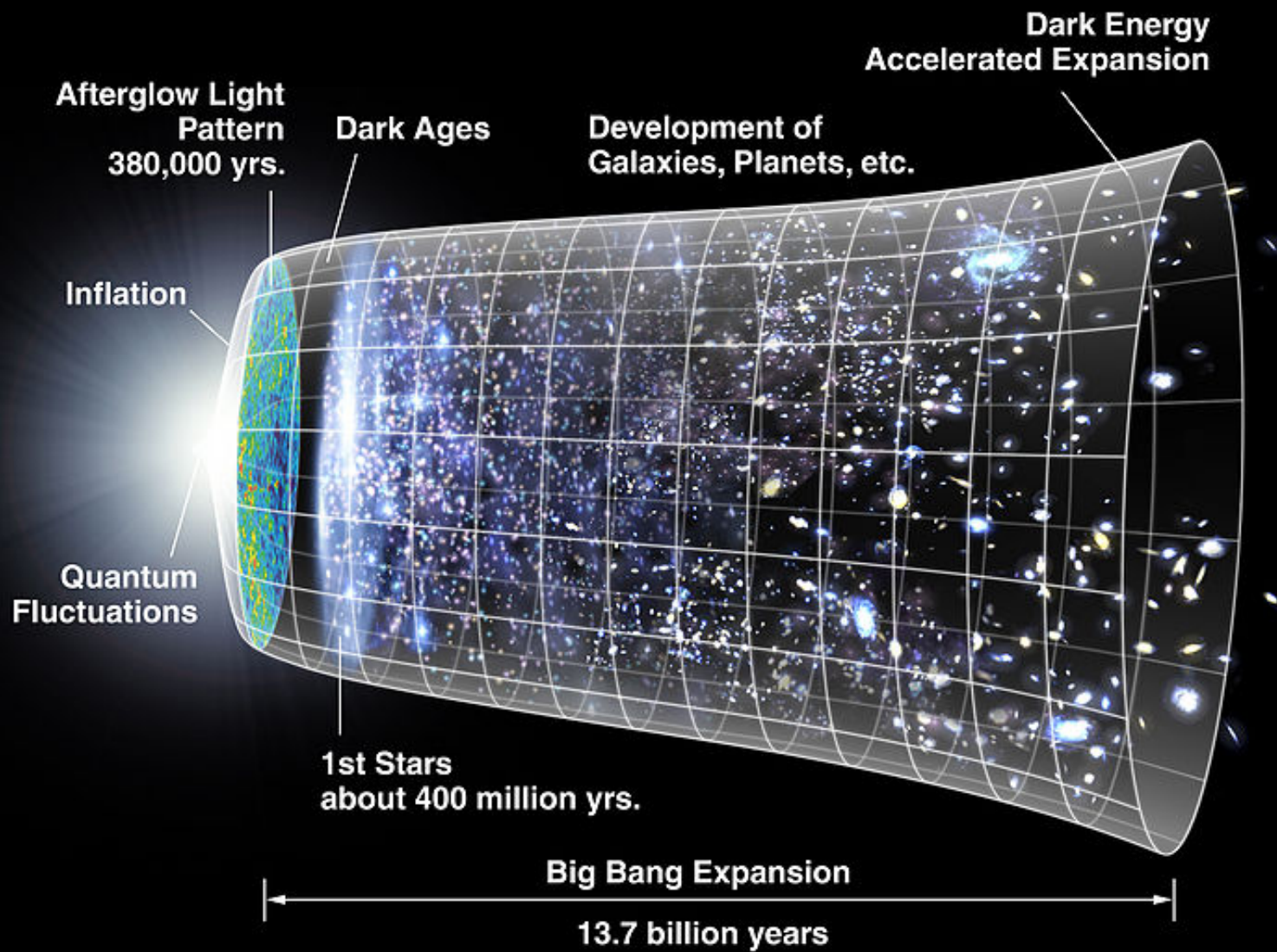
Vladimír Renčín

„Položte vedle něho nenápadně krabičku zápalek pro srovnání, aby si lidi udělali představu, jak velký je to blbec . . .“





**Čas**

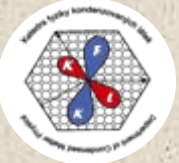


*Historie času (a prostoru)*



# Měření času:





# Měření času:

Periodicita dějů

Astronomie

Slunce

den

rovnodennost

slunovraty

Měsíc

fáze

příliv

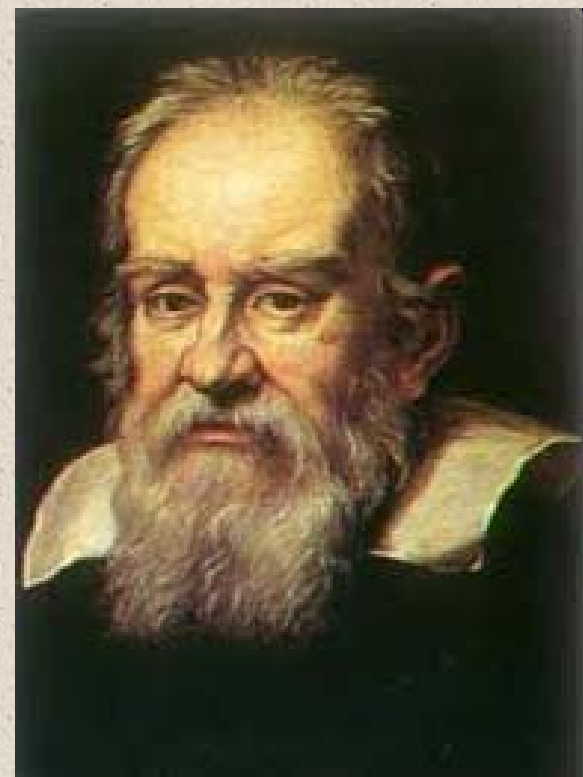
Mechanika

kyvadlo

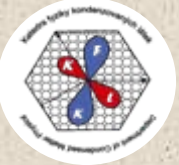
proudění tekutin

Biologie

tep

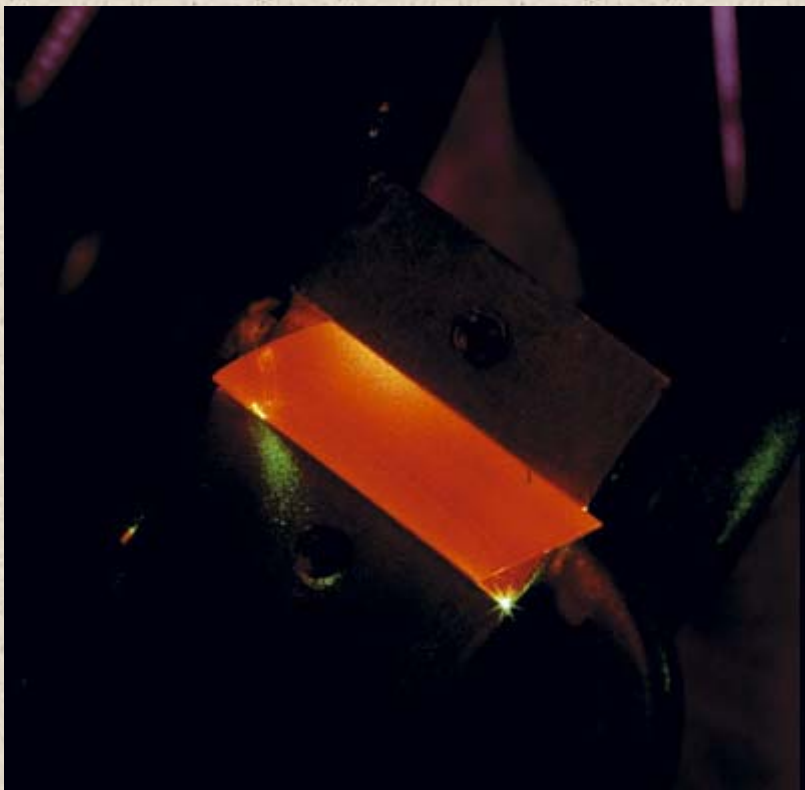
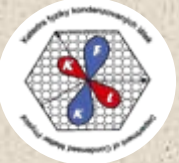


*Galileo Galilei*

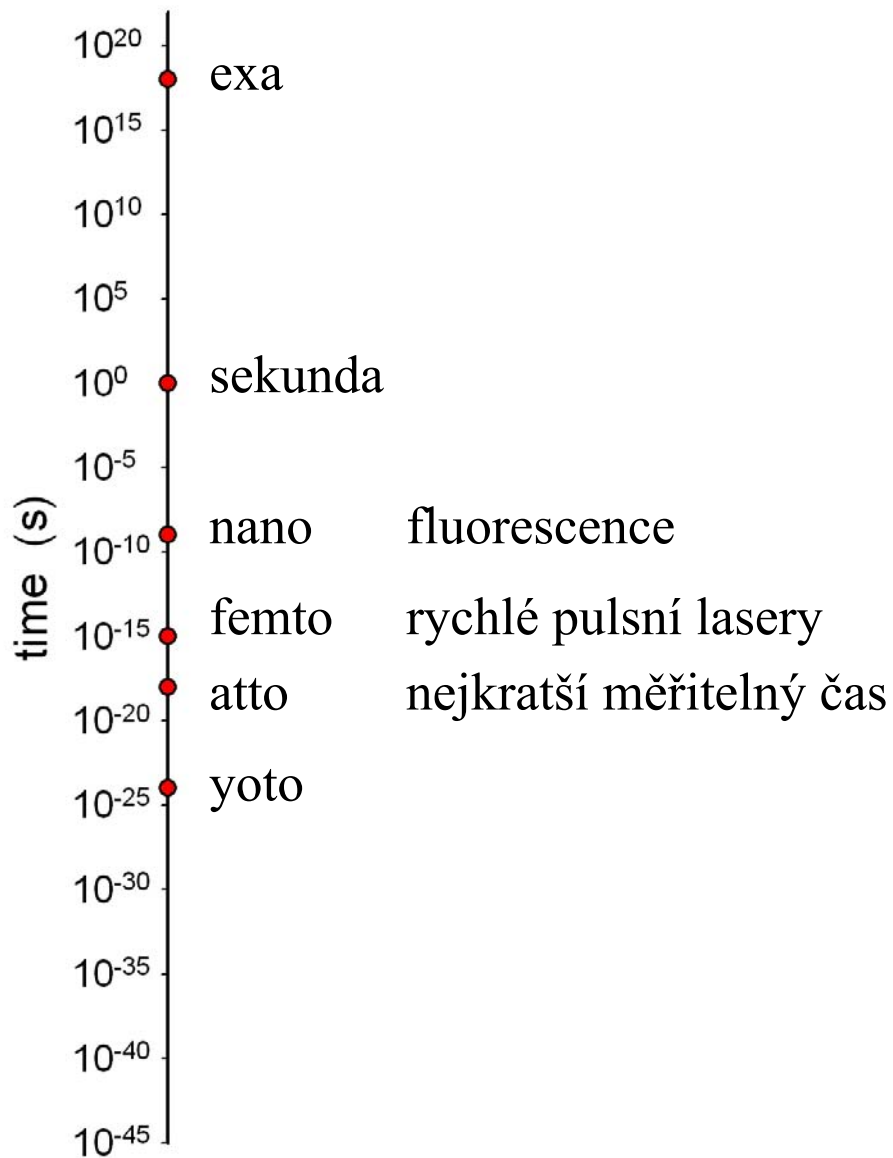


# Měření času:



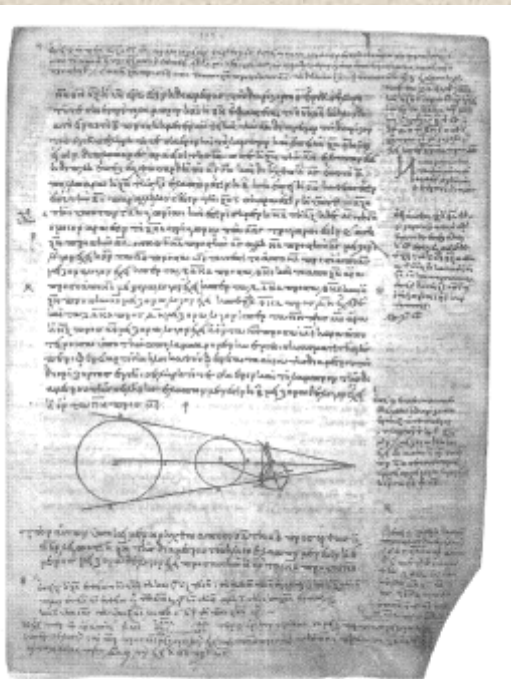


Detail krystalu safíru s příměsí titanu (Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) buzený spojitým zářením argonového laseru. Podobné uspořádání je srdcem dnešních *femtosekundových laserů* (snímek z KCHFO MFF UK v Praze).

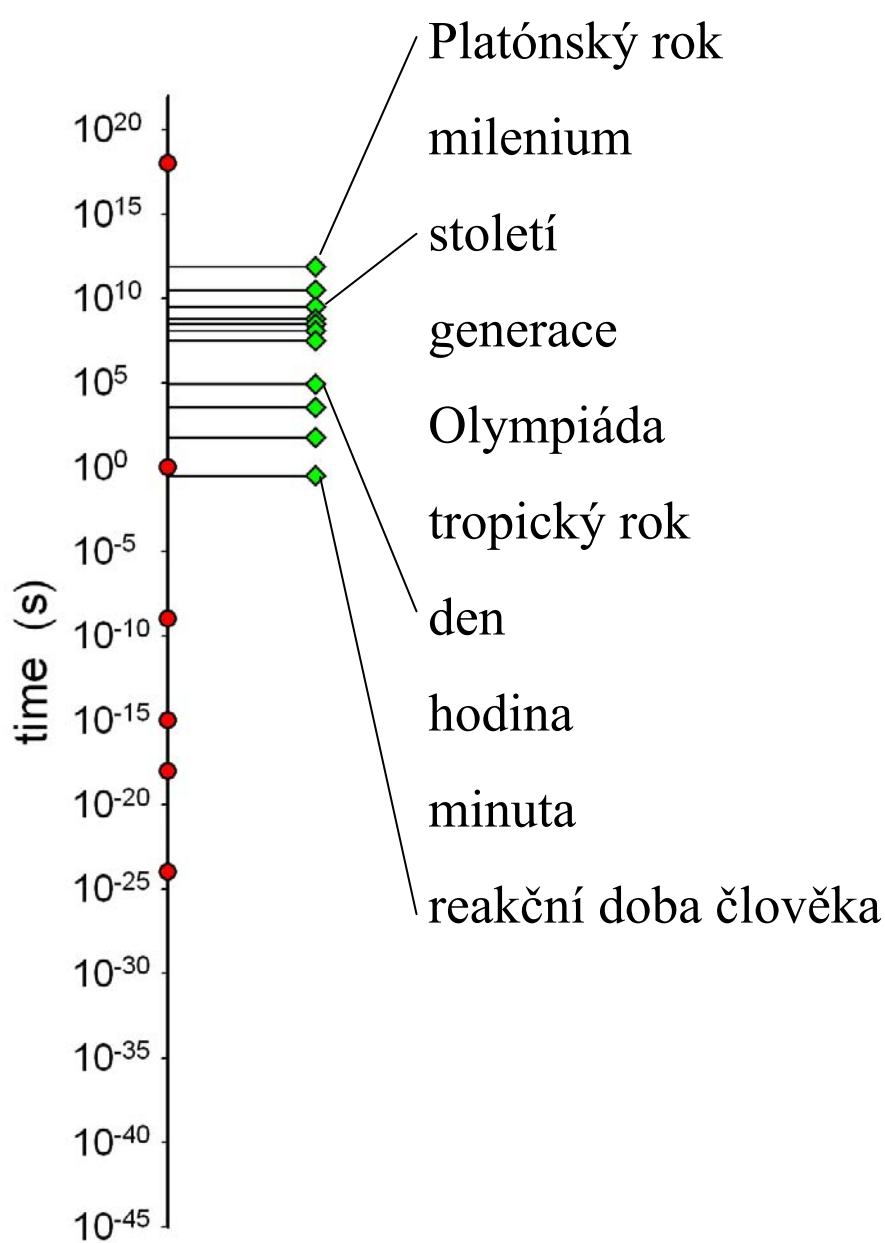


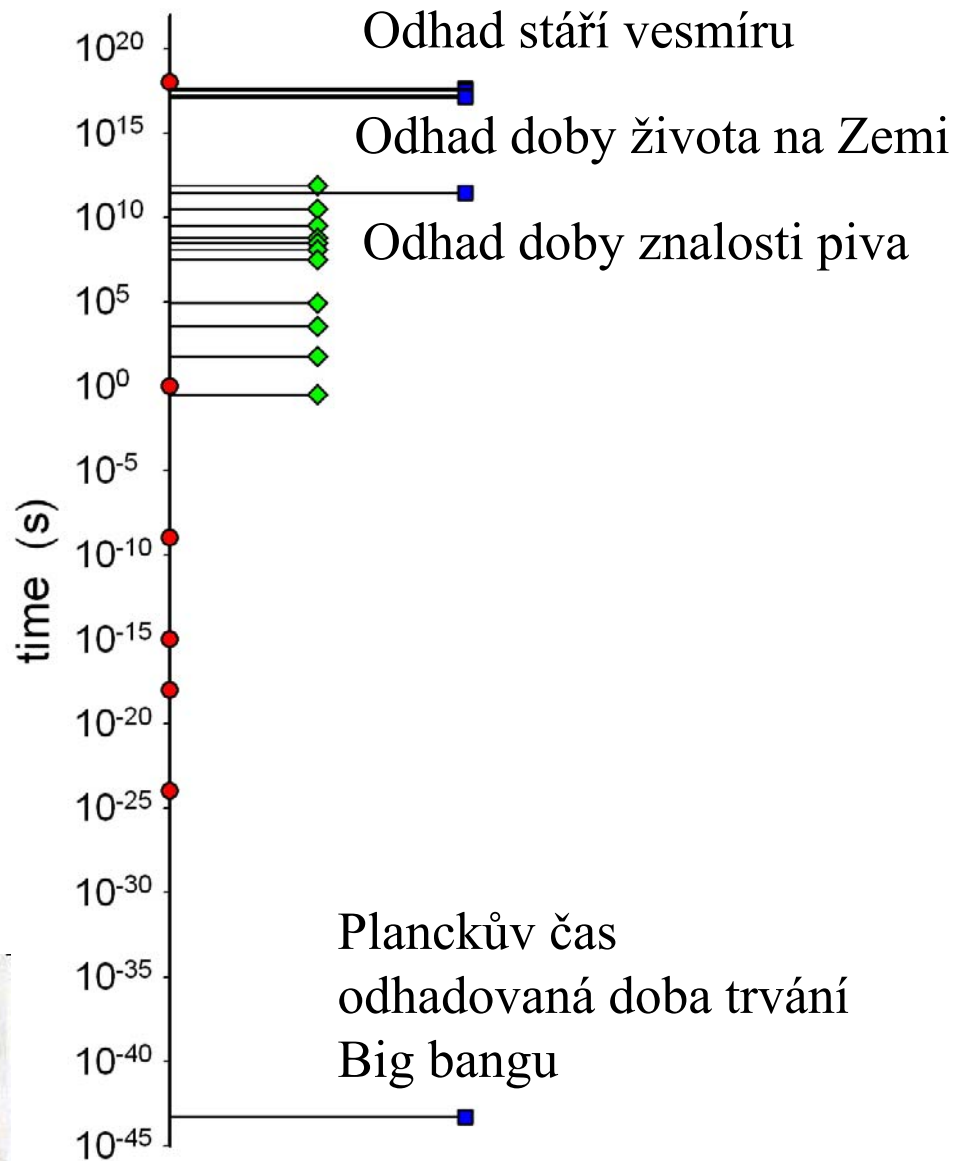
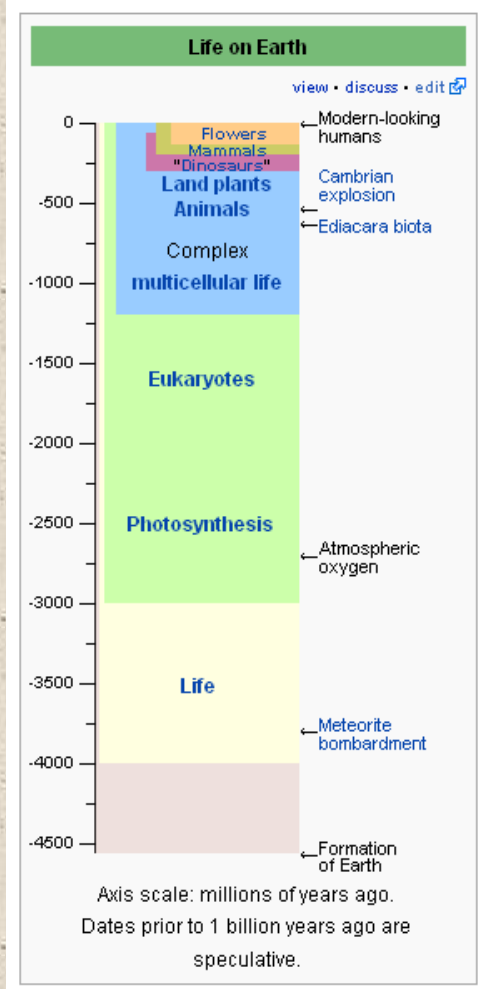
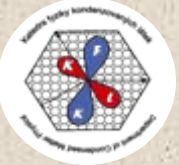


Hipparchos z Nikaie,  
nejsvědomitější řecký astronom

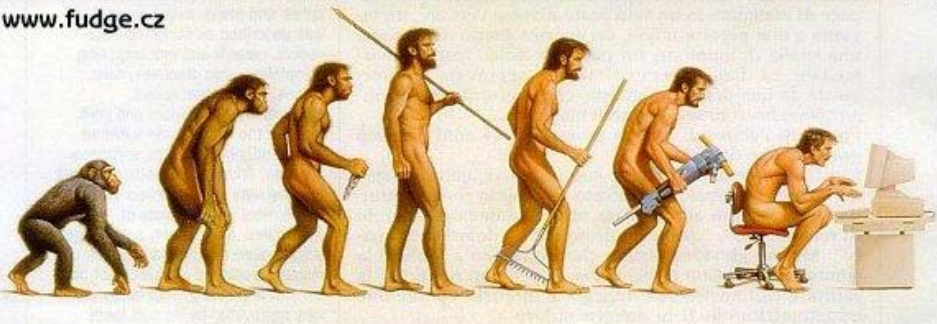


Rukopis Aristarchova spisu  
o vzdálenostech Slunce a Měsíce

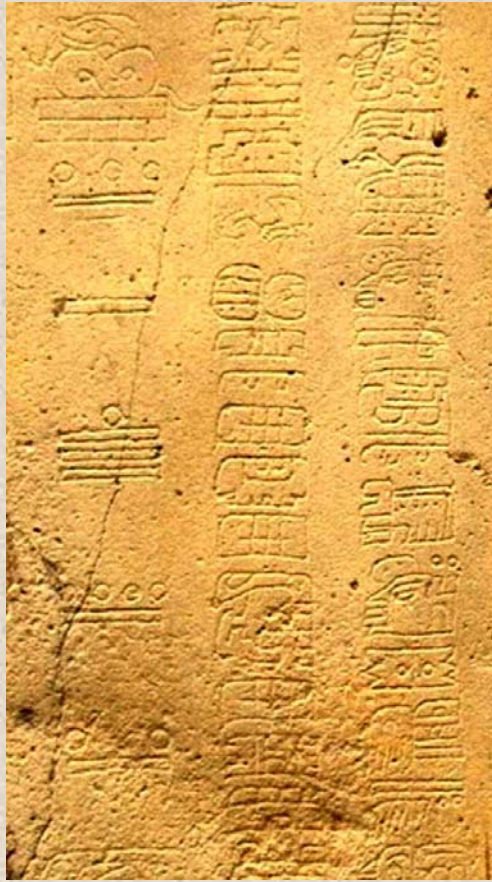




www.fudge.cz





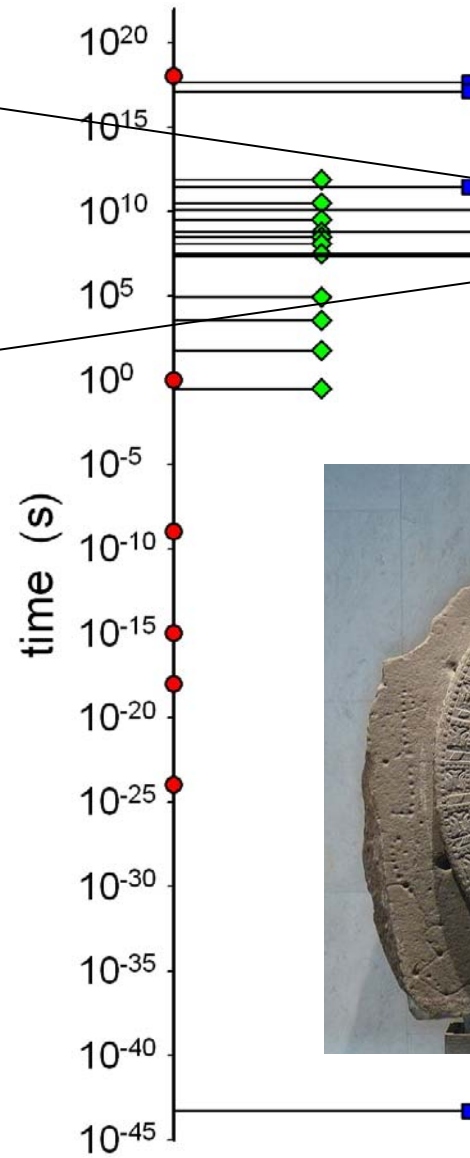


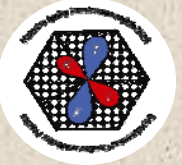
Bak Tun

Katun

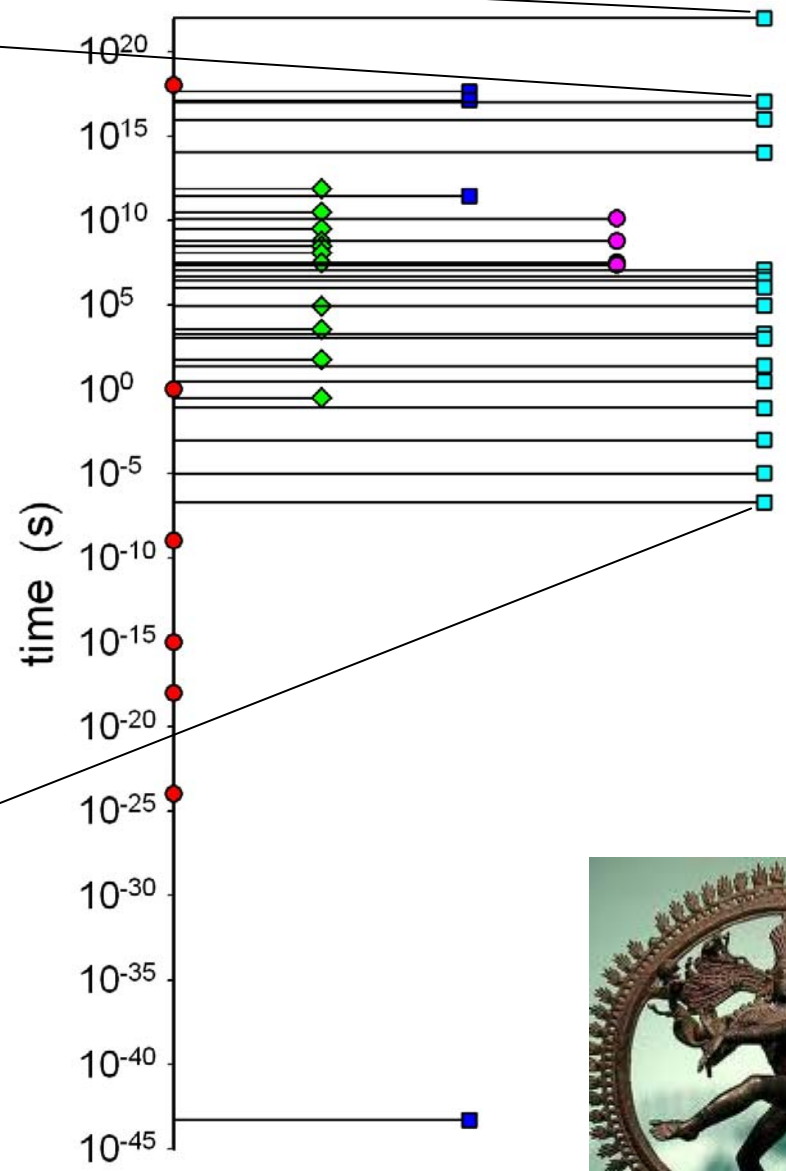
Haab

Tzolkin





- Brahmūv cyklus
- Brahmūv den
- Manvantara
- Mahayuga
- Aayan
- Ruthu
- Masa
- Paksha
- Nakshatra ahoratram
- Muhurta
- Ghati
- Vighati
- Paramanu
- Leekshaka
- Lava
- Renu
- Truti





# Jednotky:

➤ *extenzivní veličiny:*

➤ *metr*

*vzdálenost, jakou urazí světlo ve vakuu za  $1/299792458$  s*

➤ *kilogram*

*etalon*

## *Čas*

*1 sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia  $^{133}\text{Cs}$ .*



# Etalony



Etalony – vytvořeny a uloženy v mezinárodním ústavu pro míry a váhy.

Národní kopie – co nejpřesnější, uloženy v národních ústavech.

❖ Chyba etalonu

❖ Chyba měření  $\Rightarrow$

$$X = (v \pm \delta v) \cdot (U \pm \delta U)$$

kde  $\delta v$  označuje nepřesnost srovnávacího procesu, tedy měření a  $\delta U$  označuje chybu etalonu





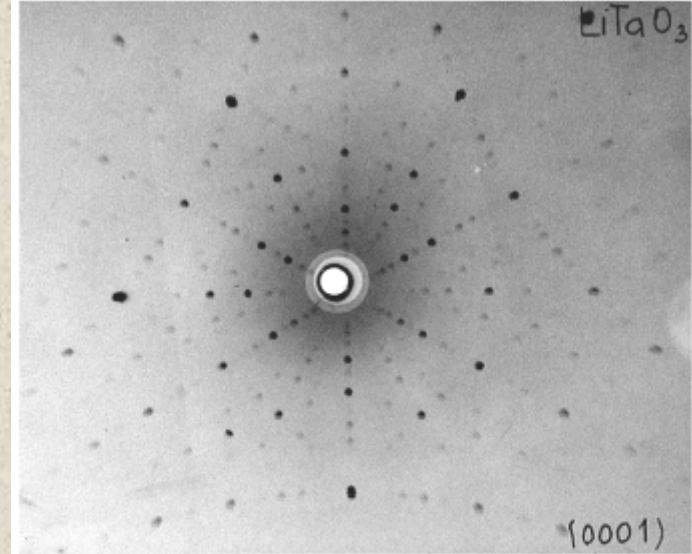
# Etalony

$$X = (\nu \pm \delta\nu) \cdot (U \pm \delta U)$$

$X$  je hodnota veličiny, určená daným procesem (s nějakou chybou srovnávacího procesu) pomocí daných etalonů (s určitou chybou oproti dohodnuté jednotce).

Etalon prohlášen za absolutně přesný:

$$(X \pm \delta X) = (\nu \pm \delta\nu) \cdot U$$



**LiTaO<sub>3</sub>, romboedrická  
struktura, snímek podle  
skutečné trojčetné osy.  
(podle Studničky)**





# Připomínka:

## *Intenzivní veličiny:*

- měříme nepřímou, pomocí veličin extenzivních,
- srovnáním s *dohodnutou* jednotkou příslušné extenzivní veličiny (obvykle délky)
- za pomoci *dohodnutých* empirických zákonitostí.

## *intenzivní veličiny popisují stav hmoty*

- nutno vytvořit stupnici stavů
- tyto stavy pojmenovat (ohodnotit)
- jednotlivým stavům přiřadit hodnoty veličiny extenzivní
- jednoznačné přiřazení – kalibrace



# Teplota



# Teplota

*Teplota*, (temperature – z lat. *temperare* – míchat)

Mísení vína s vodou

- Regulace teploty při vaření piva
- Starověký Egypt
- Odpařování vody – ochlazování

Klaudios Galenos – tabulka teploty krve a *charakteru* v závislosti na zeměpisné šířce

PROBLEMA I.

Ordinis et latitudinis latitudinis latitudinis	Ordinis et latitudinis latitudinis latitudinis	Temperatura partium superiorum latitudinis	Temperatura partium inferiorum latitudinis	Temperatura partium inferiorum latitudinis	Temperatura partium inferiorum latitudinis
1	+	11	20	30	40
		11	26	36	46
		10	34	44	54
2	-	9	24	34	44
		8	28	38	48
		7	32	42	52
3	-	6	28	38	48
		5	30	40	50
		4	34	44	54
4	-	4	32	42	52
		3	36	46	56
		2	40	50	60
5	-	1	44	54	64
		0	48	58	68
		0	52	62	72
6	-	1	48	58	68
		2	52	62	72
		3	56	66	76
7	-	4	60	70	80
		5	64	74	84
		6	68	78	88
8	-	6	72	82	92
		7	76	86	96
		8	80	90	100
9	-	8	84	94	104
		9	88	98	108
		10	92	102	112
10	-	10	96	106	116
		11	100	110	120
		12	104	114	124





# Teplota – teploměry

Hérón Alexandrijský

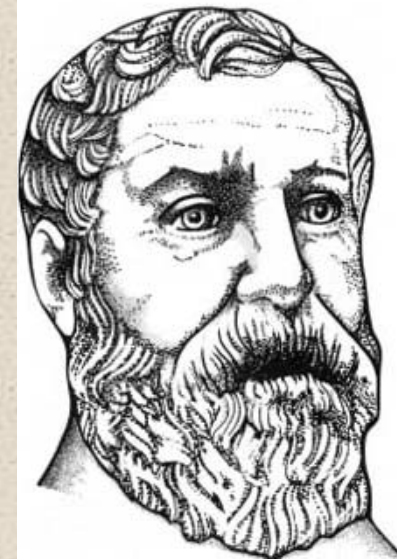
– první termoskop – 1. století n.l.

Galileo Galilei

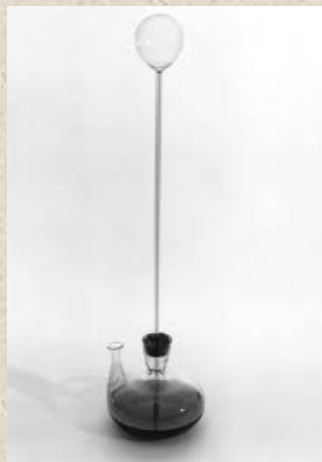
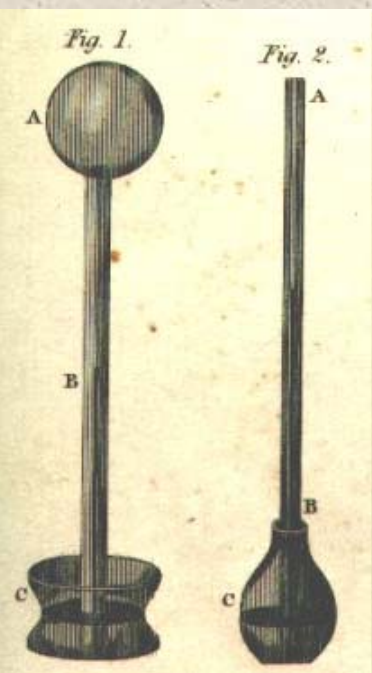
– termoskop – na základě Hérónových zápisků.

Teploměrné trubice

– převod změny objemu na změnu délky



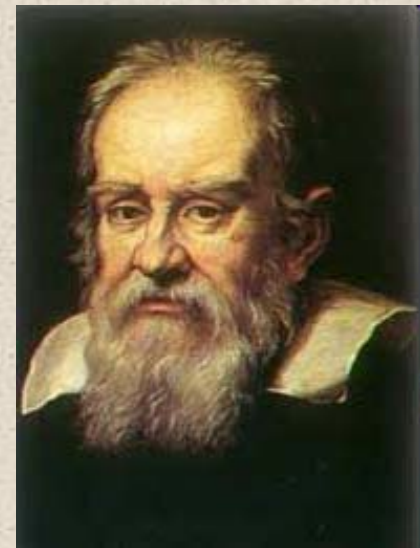
*Hérón Alexandrijský*



*Termoskop si můžete snadno postavit*

*On the Left, A Galileo Thermoscope (thermometer)*

*On the Right, A Florentine Thermometer*




*Galileo Galilei*



# Měření teploty

Kvantitativní měření teploty – stupnice stavů:

- ***Teplota tajícího ledu*** – dostatečně stabilní
  - R. Boyle 1664 
- druhý bod
  - teplota tání másla
  - teplota v podpaží zdravého muže...
- První normalizace – D. G. Fahrenheit
  - základní bod – chladicí směs ledu a salmiaku: 0 (-17,778 °C).
  - bod tání ledu: 4
  - teplota zdravého lidského těla: 12

Stupnice příliš hrubá, rozdělil každou jednotku na 8 částí,  
- stupně

Tedy: tání ledu: 32°F

teplota zdravého lidského těla: 96°F.





## Anders Celsius

Teplota tání ledu: 100

Teplota varu vody za normálního tlaku: 0

tento teplotní interval tak rozdělil na 100 dílů



Carl Linnaeus (Carl von Linné):

1745 obrátil Celsiovu stupnici a velikost dílků

⇒

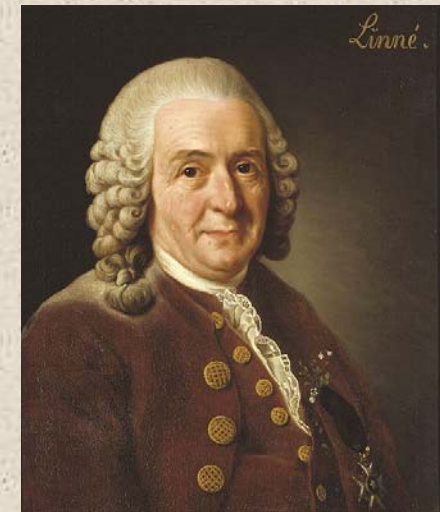
Celsiova teplotní stupnice

teplota  $t$

značka °C.

Měření - délka (výška) rtuťového sloupce za příslušné teploty  $t$   
prohlášena jako lineární:

$$l_t = l_0 \cdot (1 + \alpha t)$$





# Plynový teploměr

***Teplotní roztažnost či rozpínavost různých plynů je téměř stejná:***

obsahuje konstantu 273,15 v Celsiově stupnici.

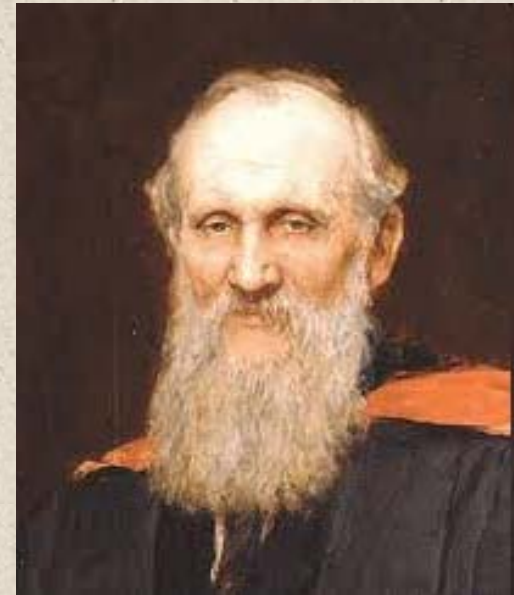
Plynový teploměr, naplněný ideálním plynem, by měnil svůj objem dle vztahu:

$$V_t = V_0 \cdot \left(1 + 1/273,15 \cdot t\right)$$

⇒ při teplotě  $-273,15^{\circ}\text{C}$  by dosáhl nulového objemu

William Thompson, - lord Kelvin

- termodynamická teplota
- absolutní nulu
- $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

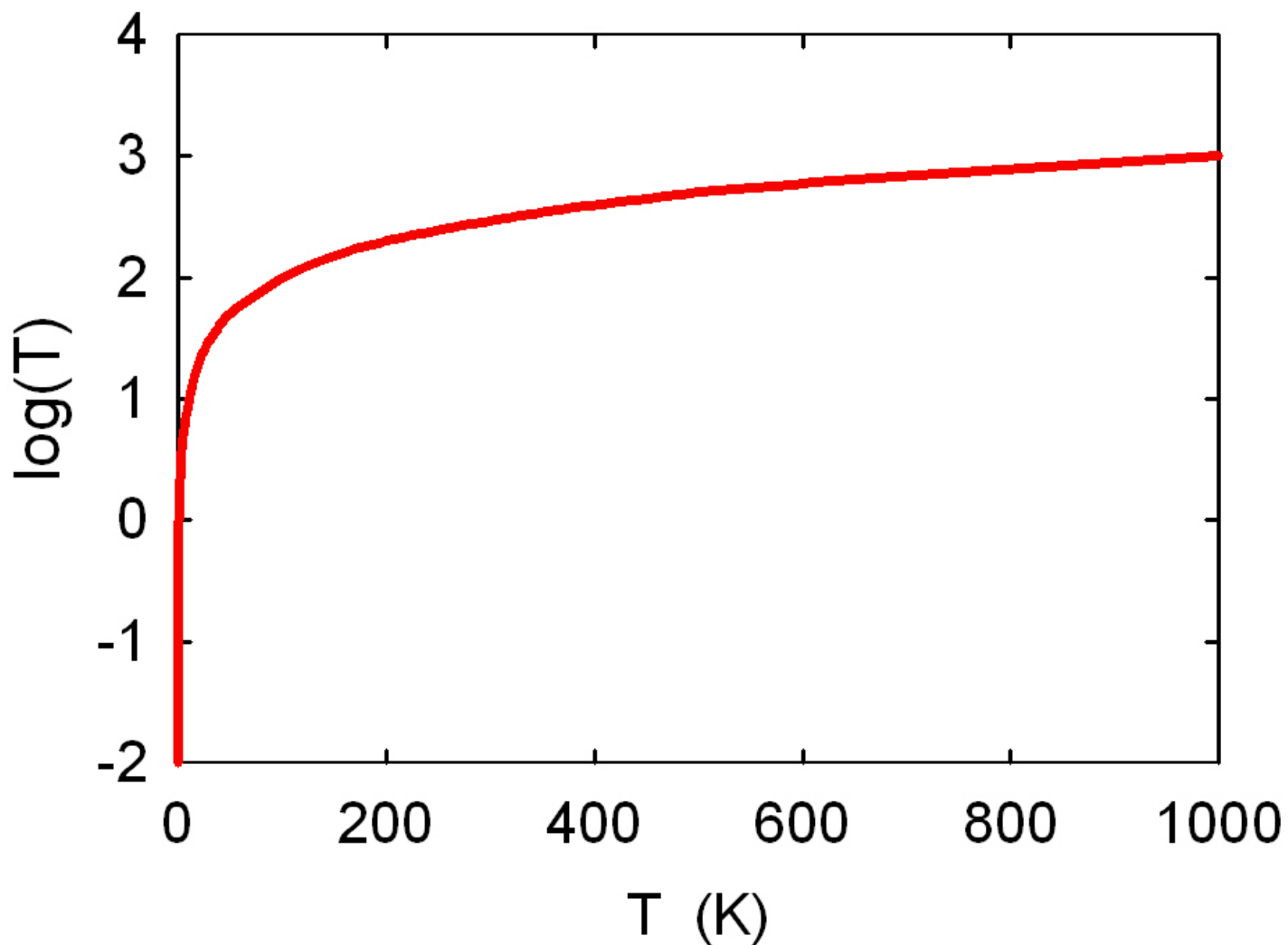
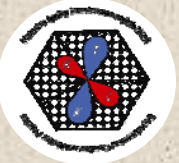




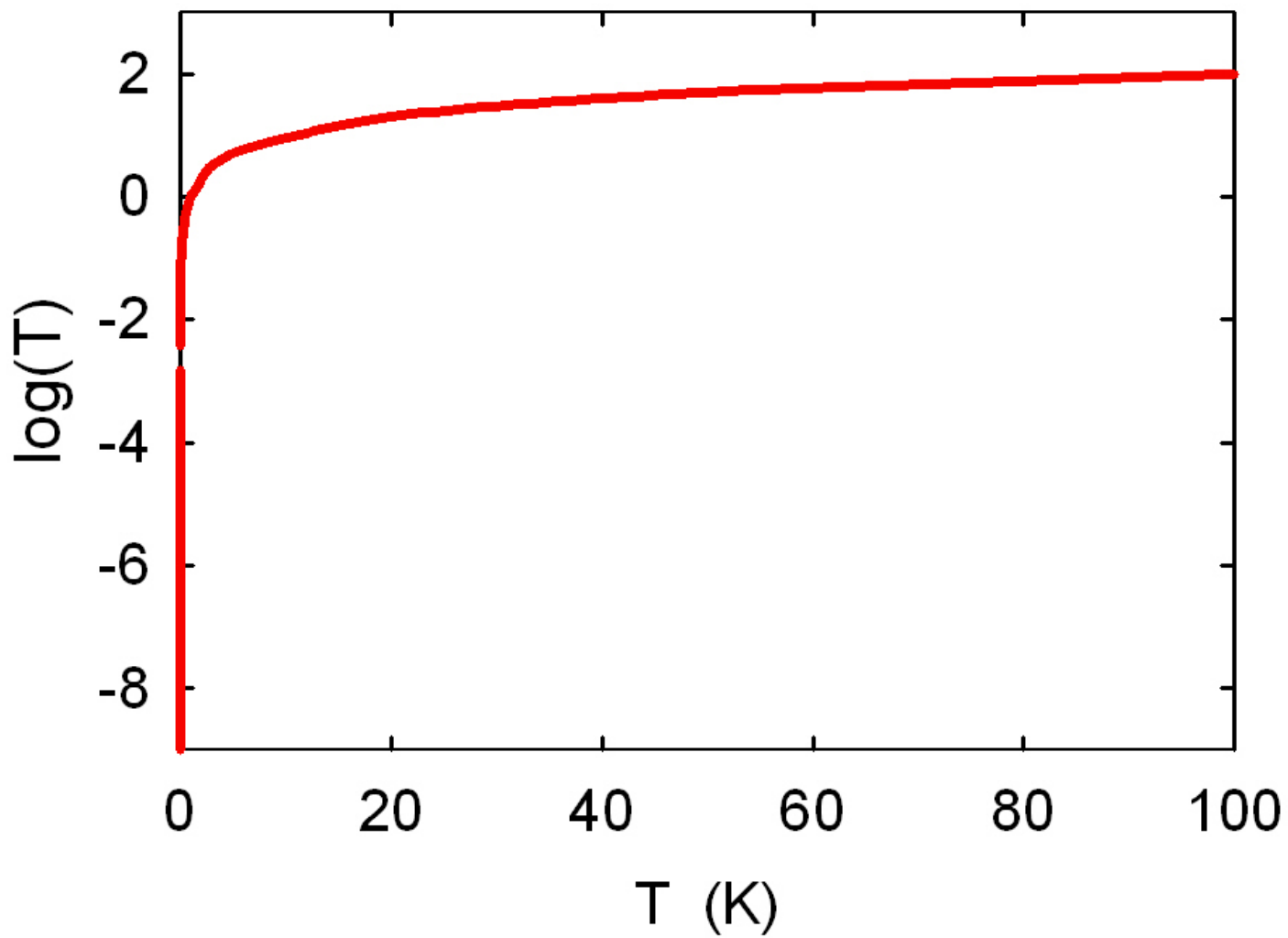
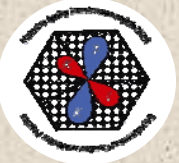
# Teplota

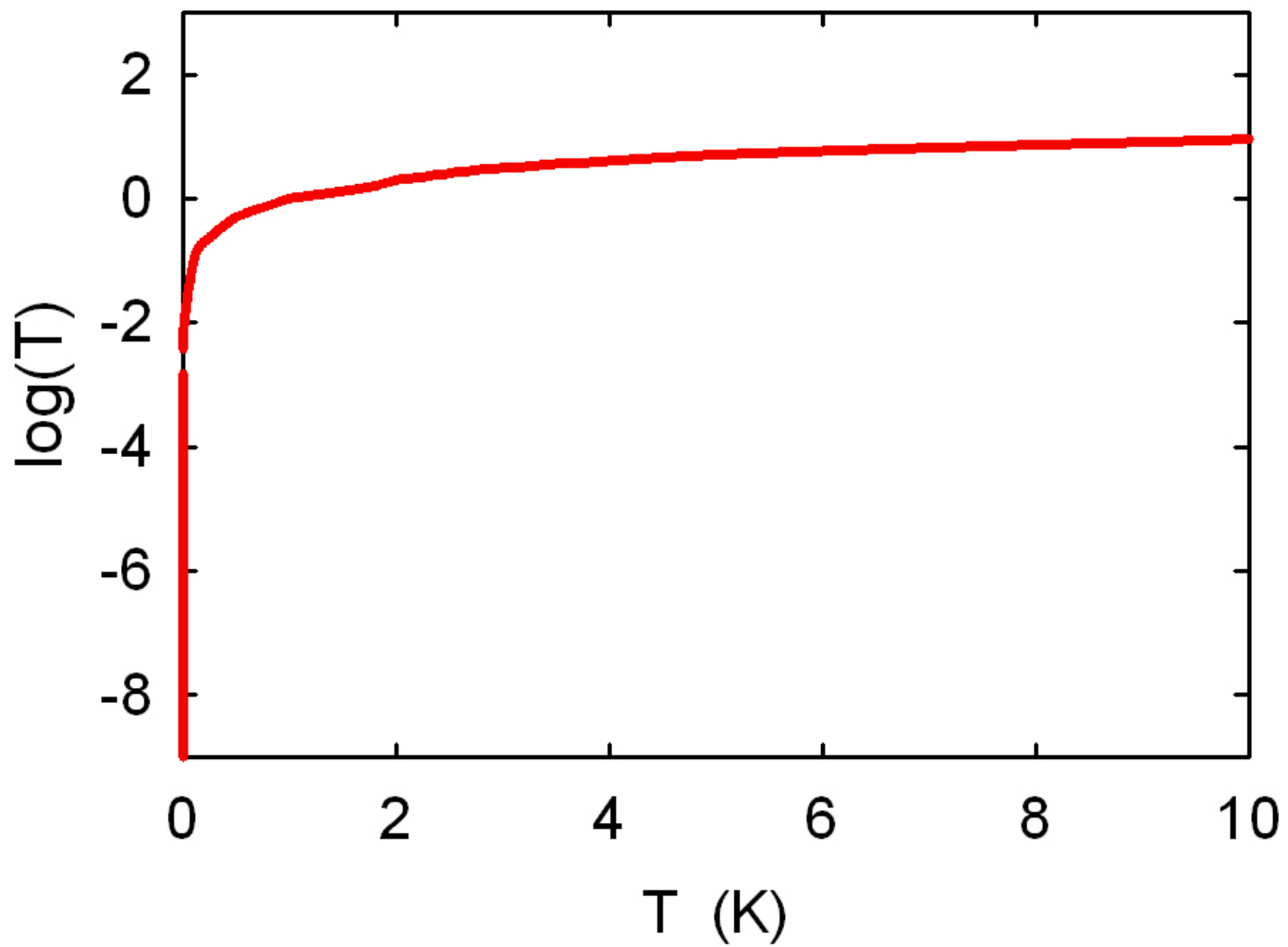
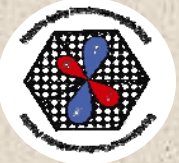
Kelvin jeden čas uvažoval zavést termodynamickou teplotu jako nelineární – **logaritmickou**

- Lépe by vyjadřovala energetickou náročnost změny teploty
- Zejména v oblasti fyziky nízkých teplot
- Faktická nedosažitelnost absolutní nuly – logaritmus nuly je  $-\infty$
- *Tedy pro dosažení nulové teploty je třeba odebrat systému nekonečné množství energie.*

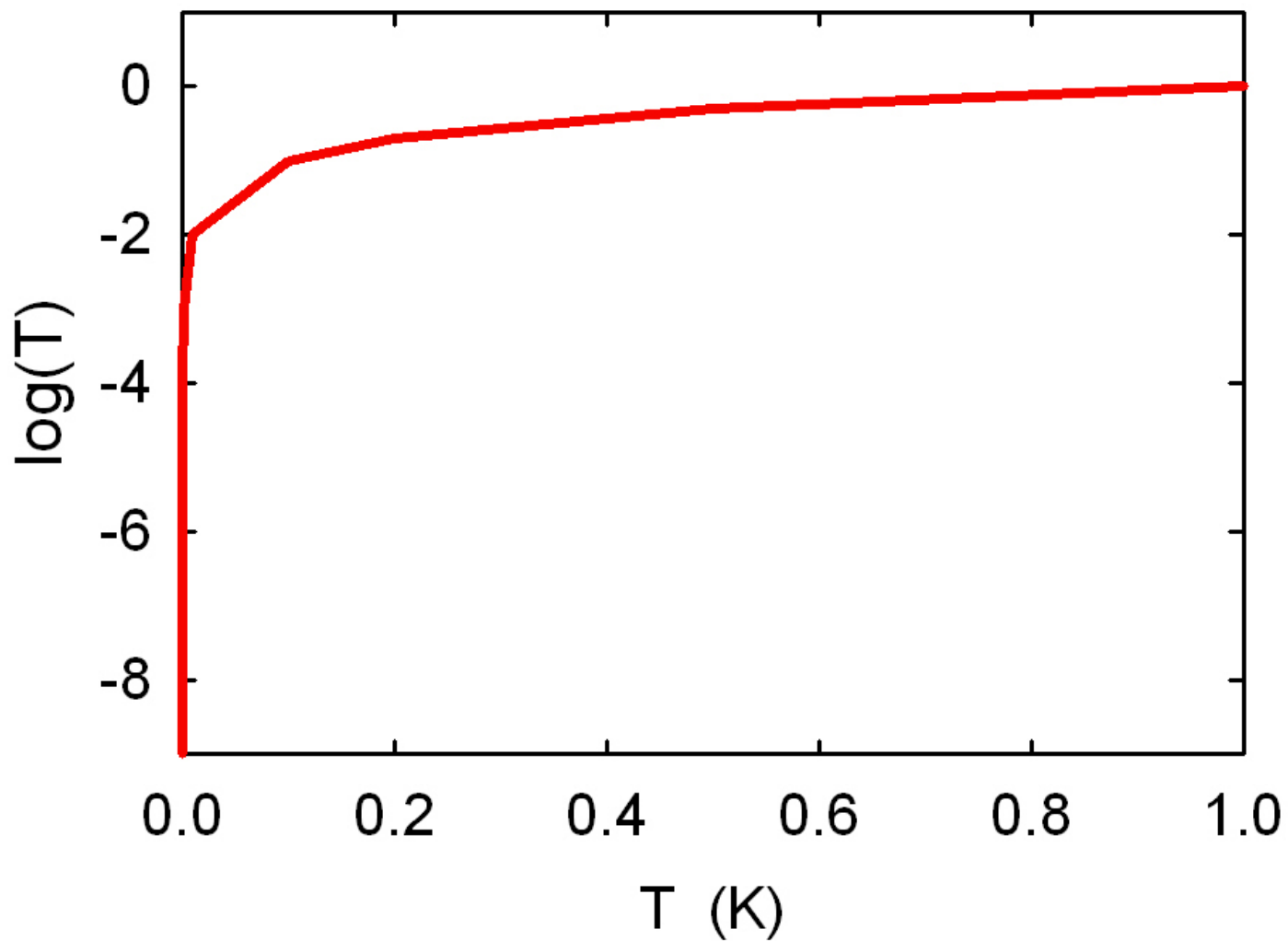


*Zákon třetí: „Nedojdeš nikdá pořádku úplného, leč jen v potu tváře se tomuto blížiti smíš“.*











## ***proces srovnávání – měření***

Jak je možné, že stavová veličina charakteristická pro jednu látku je srovnatelná se stavovou veličinou, ač téhož charakteru, látky druhé? A projeví se na velikosti veličiny jiné?

### ***Nultá věta termodynamiky***

*Teplota je veličina, která nabývá stejné hodnoty ve dvou systémech ve vzájemném tepelném kontaktu, u nichž nedochází k žádnému přenosu tepla.*

Základ termometrie – tranzitivnost:

***Je-li systém A v tepelné rovnováze se systémem B a ten je v tepelné rovnováze se systémem C, je systém A v tepelné rovnováze se systémem C.***



Nejen teplota, ale jakákoli intenzivní termodynamická veličina, je *měřitelná a měřená* jen na základě *dohodnuté stupnice* kalibrované pomocí dohodnutých „pevných bodů“ *a interpolace intervalu* pomocí dohodnutých vztahů *s omezenou platností, s konečnou přesností, v omezeném intervalu.*



**Všechno je JINAK!**



**Děkuji za pozornost**