

Fakulta elektrotechnická

Katedra technologií a měření

KET/+MET

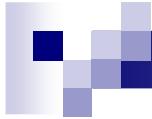
9. přednáška

**Etalonáž a měření teploty,
Etalonáž a měření elektrických veličin (I.)**

15 Etalonáž a měření teploty

- **teplota**
- = kvantitativní fyzikální skalární veličina,
- stav termodynamické rovnováhy; tj. stav, kdy v izolované soustavě neprobíhají makroskopické změny.
- bývá charakterizován termodynamickou teplotou.
- Měří se nepřímo, pomocí jiných fyzikálních veličin (např. roztažnost)

- **teplo**
- = kvantitativní fyzikální veličina, popisující termodynamický děj jako posloupnost stavů.
- Teplo popisuje změny vnitřní energie související s pohybem částic dané soustavy (odpovídá energii, kdy nastává tepelná výměna)
- Jednotky – jako u energie, práce (obor kalorimetrie)



15.1 Historie

- **Galileo Galilei** (17. stol., profesor, univerzita v Padově)
Vzduchový termoskop (30 cm dlouhá skleněná trubička s baňkou, bez stupnice, na principu změny objemu vzduchu v baňce, otevřený konec do nádobky s obarvenou vodou; při oteplení hladina v baňce klesala)
- **Otto von Guericke** a **Gaspar Schott**
termoskop - uzavřený systém s 2 baňkami, spojovací trubice ve tvaru U
- **Jean Rey** - 1631 teploměr vodou plněný
- **Ferdinand II. Toskánský** – 1641 lihový teploměr

- **Robert Boyle** (Angličan, 1664 definoval zákl.bod stupnice – tající led)
- **Christian Huygens** (1629 Haag– 1695 Haag)
 - r. 1665 objevil stálost teplotního stavu vařící se vody při 1013 hPa a definoval bod varu vody
 - r. 1688 - teploměr plněný Hg
- **Gabriel Daniel Fahrenheit** (1686 Gdańsk – 1736)
 - r. 1724 nové základní body (prům.teplota lid.těla 96 °F): počátek stupnice – směs vody, ledu a salmoniaku; závislost bodu varu na atmosférickém tlaku a určil tání ledu 32 °F a var vody 212 °F;
 - jako první vytvořil teplotní stupnici

- **René Antoine de Réaumur** (Francouz, 1683 – 1757)
r. 1730 - stupeň teploty odpovídá 0,001 změny objemu teploměrné látky (směs lihu a vody) z teploty tajícího ledu na teplotu varu lihu, později vody;
teplotní interval 80° ($80^{\circ}\text{R} = 100^{\circ}\text{C}$)
- **Andres Celsius** (Švéd 1701 – 1744)
r. 1742 – teplotní stupnice (mrznoucí voda 100°C a bod varu vody 0°C), lihový teploměr
- **Carl von Linné**
žák a spolupracovník Celsia, r. 1745 obrátil značení mezi bodem tuhnutí a varem vody,
autor stále používané stupnice

- Thomson, sir William lord Kelvin of Largs
(1824 -1907, 1892 povýšen do šlechtického stavu)
zabýval se fyzikální oblastí termodynamiky, především Carnotovým cyklem;

poprvé použil termín absolutní teplota

- r. 1852 - termodynamická stupnice začíná 0 K a končí trojným bodem vody,
- dělení na 273,15 dílků, jsou úměrné záporné převrácené hodnotě teplotní rozpínavosti ideálního plynu

$$\gamma = 0,003\ 660\ 99\ \text{K}^{-1}$$

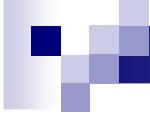
15.2 Etalony teploty

15.2.1 Primární etalon

- plynový teploměr
- rozpínavost ideálního plynu Gay-Lussacův vzorec

$$p = p_0 (1 + \gamma T)$$

$$T = -\left(\frac{1}{\gamma}\right) = -\left(\frac{1}{0,00366099}\right) = -273,15$$



stupnice

- r. 1927 – Mezinárodní stupnice EIT-27
- r. 1948 – Mezinárodní praktická teplotní stupnice EIPT-48
- r. 1968 – Mezinárodní praktická teplotní stupnice EIPT-68
- r. 1976 – Prozatímní teplotní stupnice EPT-76 zpřesnění pro (0,5-30)K
- Ke zpřesňování stupnice dochází cca každých 20 let, viz přehled

Prodleva		Mezinárodní teplotní stupnice z roku:					
		1927	1948	(1960)	1968	(1975)	1990
Vodík	T				-259,34	-259,34	-259,3467
Vodík	V				-252,87	-252,87	
Neon	T				-248,595	-248,589	-248,5939
Dusík	T				-210,002	-210,004	
Kyslík	T				-218,789	-218,789	-218,7916
Argon	T					-189,352	-189,3442
Kyslík	V	-182,97	-182,97	-182,97	-182,962	-182,962	
CO ₂	subl.	-78,5	-78,5	-78,5	-78,476	-78,476	
Rtuť	T	-38,87	-38,87	-38,87	-38,862	-38,841	-38,8344
Voda	M,F	0	0	0	0	0	
Voda	T			0,01	0,01	0,01	0,01
Galium	M						29,7646
Voda	V	100	100	100	100	100	
Kys. benzoová	T		122,36	122,37	122,37	122,37	
Indium	F			156,61	156,634	156,634	156,5985
Naftalen	V	217,96	218,0	218,0			
Cín	F	231,85	231,9	231,91	231,9681	231,9681	231,928
Vizmut					271,442	271,442	
Benzofenon	V	305,9	305,9	305,9			
Kadmium	F	320,9	320,9	321,03	321,108	321,108	
Olovo	F	327,3	327,3	327,3	327,502	327,502	
Rtuť	V	356,58	356,58	356,66	356,66		
Zinek	F	419,45	419,5	419,505	419,58	419,58	419,527
Síra	V	444,6	444,6	444,6	444,674	444,674	
Cu-Al	eut.				548,23	548,26	
Antimon	F	630,5	630,5	630,5	630,74		
Hliník	F		660,1	660,1	660,37		660,323
Stříbro	F	960,5	960,8	960,8	961,93		961,78
Zlato	F	1063	1063	1063	1064,43		1064,18
Měď	F	1083	1083	1083	1084,5		1084,62
Níkl	F		1453	1453	1455		
Kobalt	F		1492	1492	1494		
Paladium	F	1555	1552	1552	1554		
Platina	F		1769	1769	1772		
Rhodium	F		1960	1960	1963		
Iridium	F		2443	2443	2447		
Niob	M						
Molybden	M						
Wolfram	M		3380	3380	3387		
Čistota platiny: R_{100}/R_0		1,390	1,391	1,392	1,3925		
Konstanta c_2 (mm·K)		14,32	14,38	14,38	14,388	14,388	14,388

Poznámka: Označení prodlev: V – var; T – trojný bod; M, F – tání, tuhnutí; eut. – eutektikum

- r. 1989 – Mezinárodní teplotní stupnice EIT-90 (FJ) nebo-li ITS-90 (AJ)

- zrušeno rozlišení mezi praktickou a termodynamickou stupnicí
- spodní mez stupnice - absolutní nula (0 K)
- horní mez stupnice – nebyla stanovena (nemůže být), z praktického hlediska je zavedena jako druhá mez - bod tání ledu (trojný bod)
- stupnice má stejnou šířku stupňů jako Celsiova
- $0 \text{ } ^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ $0 \text{ K až } 0 \text{ } ^\circ\text{C} = 0 \text{ K až } 273,15 \text{ K}$
- přesná teplota trojného bodu vody

$$0,01 \text{ } ^\circ\text{C} = 273,16 \text{ K}$$

Tab. 5 Přehled pevných teplotních bodů ITS 90

Číslo	Teplota K	Teplota °C	Látka	Stav	W _r
1	3 až 5	- 270,15 až - 268,15	He helium	V	0,001 190 07
2	13,8033	- 259,346 7	e-H ₂ e-vodík	T	
3	≈ 17	≈ - 256,15	e-H ₂ (nebo) He	V (nebo) G	
4	≈ 20,3	≈ - 252,85	e-H ₂ (nebo) He	V (nebo) G	
5	24,5561	- 248,593 9	Ne neon	T	0,008 449 74
6	54,3584	- 218,791 6	O ₂ kyslík	T	0,091 718 04
7	83,8058	- 189,344 2	Ar argon	T	0,215 859 75
8	231,3156	- 38,8344	Hg rtut'	T	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H ₂ O voda	T	1,000 000 00
10	302,9146	29,761 6	Ga gallium	M	1,118 138 89
11	429,7485	156,598 5	In indium	F	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn cín	F	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn zinek	F	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al hliník	F	3,376 008 60
15	1234,93	961,78	Ag stříbro	F	4,286 420 53
16	1337,33	1 064,18	Au zlato	F	
17	1357,77	1 084,62	Cu měď	F	

Stav pevných bodů

V	bod tlaku par
G	bod plynového teploměru
T	trojný bod
M	bod tání
F	bod tuhnutí
Eutektikum	struktura vznikající při současném tuhnutí 2 fází, např. kovy ve slitině
W	konstanta poměru odporů odporového teploměru u vody při 0,01 °C $W = 1,000\ 000\ 00$!!

15.2.2 Stupnice ITS-90

- 17 pevně definovaných bodů – viz tabulka
 ^3He , ^4He , H_2 , $e\text{-H}_2$, Ne , O_2 , Ar , Hg , H_2O , Ga , In , Sn , Zn ,
 Al , Ag , Au , Cu – a interpolace mezi nimi

základní rozsahy ITS-90

- rozsah 0,65 K až 5,0 K –
 T_{90} definována tlakem par ^3He a ^4He
- rozsah 3,0 K až 24,5561 K (trojný bod Ne) –
 T_{90} je definována plynovým teploměrem pomocí pevných
bodů a zvl. interpolačních postupů

- nejběžnější rozsah 13,8033 K (trojný bod H) - 961,78 °C (bod tuhnutí Ag):

T_{90} je definována pomocí Pt-odporových teploměrů (kalibrovaných na určitých pevných teplotních bodech)

- nad 961,78 °C:

T_{90} definováno pomocí 1 teplotního bodu (bod tuhnutí Ag) a Planckova radiačního zákona

podrozsahy ITS-90 pod 0 °C

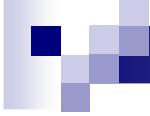
- jsou zabezpečovány Pt- odporovými teploměry
- interpolace se provádí polynomem 15. řádu:
- interval 13,8033 K (trojný bod H₂) až 273,16 K (trojný bod H₂O)
- interval 24,5561 K (trojný bod Ne) až 273,16 K
- interval 54,3584 K (trojný bod O₂) až 273,16 K
- interval 83,8058 K (trojný bod Ar) až 273,16 K

podrozsahy ITS-90 nad 0 °C

- interpolace se provádí polynomem 9. řádu:
- interval 0 °C až 961,78 °C (bod tuhnutí Ag)
- interval 0 °C až 660,3210 °C (bod tuhnutí Al)
- interval 0 °C až 419,527 °C (bod tuhnutí Zn)
- interval 0 °C až 231,928 °C (bod tuhnutí Sn)
- interval 0 °C až 156,5985 °C (bod tuhnutí In)
- interval 0 °C až 29,7646 °C (bod tuhnutí Ga)

15.2.3 Státní etalon

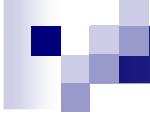
- Tj. realizace teplotní stupnice v rozsahu (-196°C až $1084,62^{\circ}\text{C}$) souborem vybraných definičních bodů stupnice ITS-90
- Realizace umožňuje kalibrovat odporové teploměry (OT) a termoelektrické články (TC)
- OT: porovnání bodů Ar, Hg-Zn, Al, Ag
- TC: porovnání bodů Ag, Cu
- odporové Pt-teploměry (průměr Pt drátku nejvýše 7,8 mm, délka je nejméně 440 mm) slouží k definici teploty v oblasti mezi pevnými body (viz podrozsahy ITS-90 pod 0°C)



definiční body ITS-90

- sleduje se obvykle **bod tuhnutí kovu**
- **Realizace:**
- kovy jsou umístěny ve válcovém grafitovém kelímku, v jeho ose je teploměr, vložený do křemenné zkumavky
- Hg – nerezová kyveta, Ga - teflonová
- Nad kyvetou je izolační keramika a křemenná vata
- Kelímek je obložen křemennou vatou a umístěn do křemenného obalu a ochranné trubice
- **Čistota materiálu je min. 99,9999 % (tzv. 6N)**

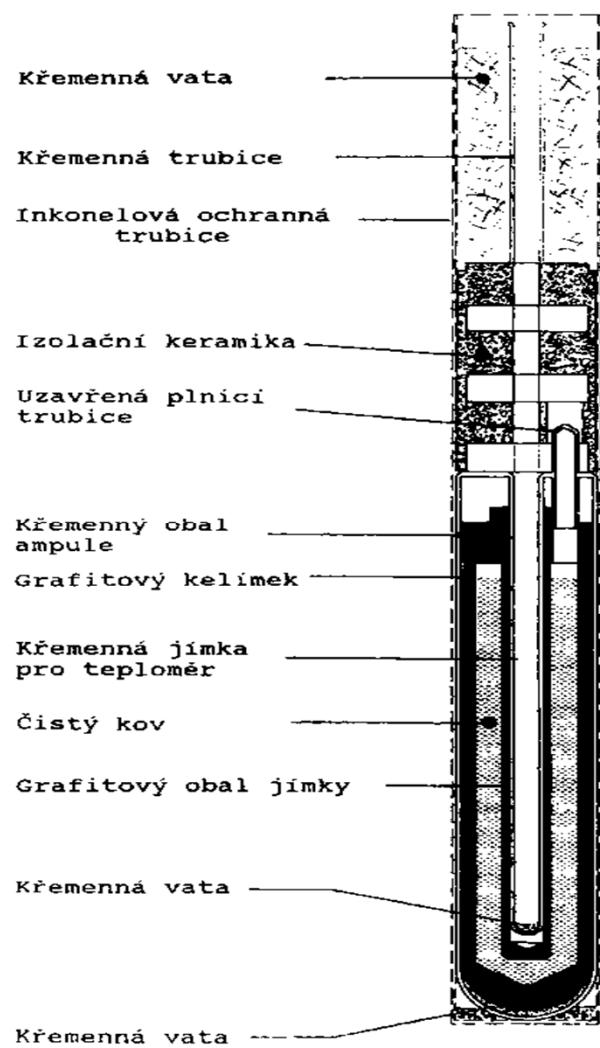
- proti dřívější stupnici ITS-68 se definice stupnice ITS-90 rozšířila od 0,65 K až do nejvyšších praktických měřitelných teplot využitím Planckova radiačního zákona (viz základní rozsahy ITS-90)



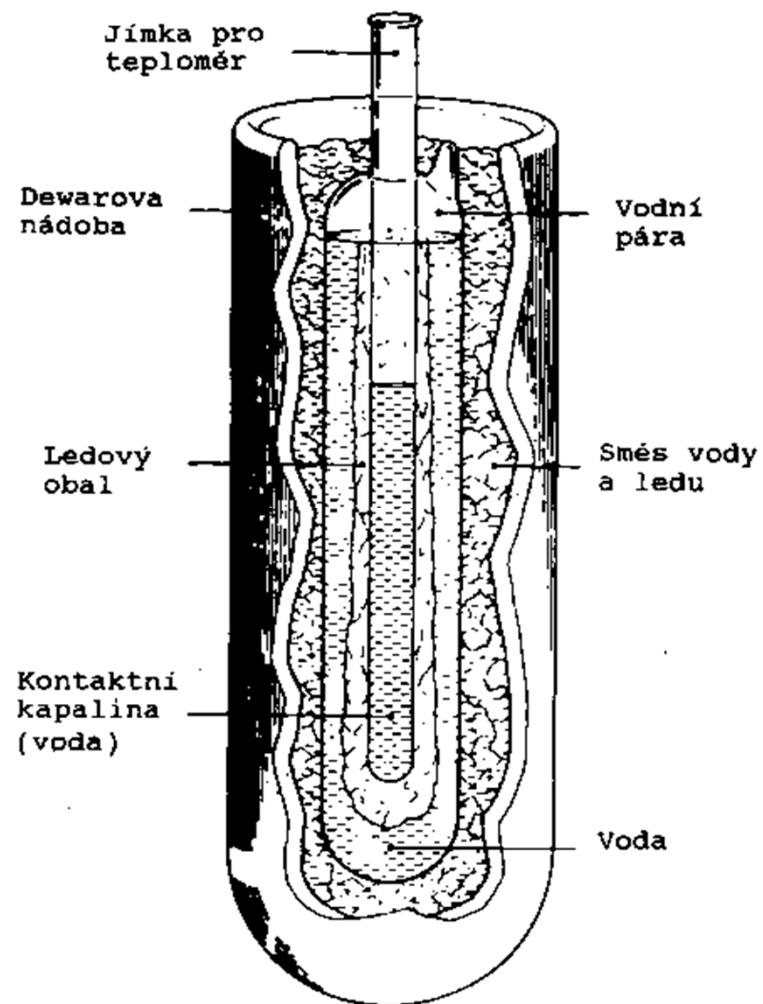
trojný bod vody

- teplota a tlak, při nichž existují 3 skupenství vody:
- Realizace ve skleněných válcových kyvetách, v jejichž ose je jímka pro teploměr
- Při výrobě je z kyvety odčerpán vzduch
- V kyvetě - voda, vodní pára a kolem jímky na teploměr krystalky ledu
- teplota rovnováhy všech tří skupenství je $0,0100\text{ }^{\circ}\text{C}$ s opakovatelností lepší než $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tento trojný bod platí při tlaku $0,101\text{ }325\text{ MPa}$

Úprava definičních bodů a trojnitého bodu vody



9.



ČMI etalonáž ITS-90



přepočty stupnic

$$t_C = T_K - 273,15 \quad ({}^0C \leftrightarrow K)$$

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32 \quad ({}^0F \leftrightarrow {}^0C)$$

$$0 {}^\circ C = 32 {}^\circ F ; \quad 100 {}^\circ C = 180 + 32 = 212 {}^\circ F$$

$$t_R = 0,8 t_C \quad ({}^0R \leftrightarrow {}^0C)$$

$$0 {}^\circ C = 0 {}^\circ R ; \quad 100 {}^\circ C = 80 {}^\circ R$$

16 Etalonáž a měření el. veličin (I.)

16.1 Etalonáž el. proudu

- 1 ampér
= stálý el. proud, který při průchodu dvěma přímými vodiči zanedbatelného průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1m vyvolá mezi nimi sílu $2 \cdot 10^{-7}$ N/m délky vodiče
- el. proud je jedinou el. veličinou, jejíž jednotka patří mezi základní jednotky soustavy SI
- některé laboratoře uchovávají jednotky elektrického proudu nepřímo - prostřednictvím jednotky el. napětí a odporu

- přesná měření se zpravidla provádějí nepřímo:
měří se úbytek napětí vytvořený průchodem měřeného
proudů odporovým etalonem vhodné velikosti
- jednotka el. proudu je laboratoří definována

$$A_{lab} = \frac{V_{lab}}{\Omega_{lab}}$$

kde V_{lab} a Ω_{lab} –

jednotky el. napětí a odporu uchovávané v dané
laboratoři prostřednictvím etalonů

- převodní koeficient

(převod mezi proudem laboratoře $A_{lab.}$ a proudem SI)

$$K = \frac{A_{lab}}{A_{SI}}$$

- koeficient lze určit 2 způsoby:

a) *měřením na proudových vahách* –

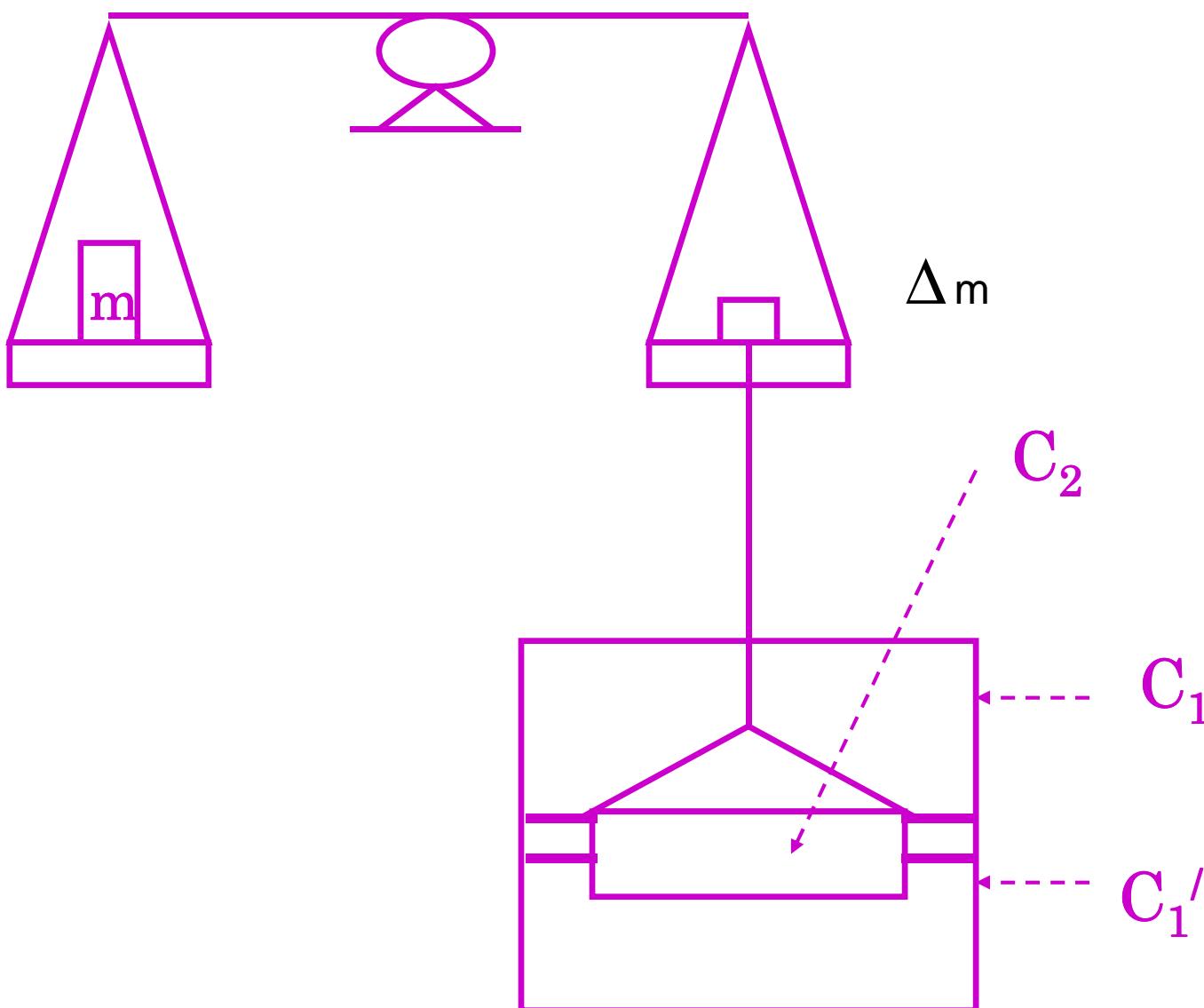
hodnota proudu A_{SI} je určuje ze silových účinků
(podle definice)

b) *atomovým měřením* –

dvojí měření gyromagnetického poměru protonu v silném
a slabém magnetickém poli

16.1.1 Měření na proudových vahách

- Cívkový systém tvoří:
 - 2 jednovrstvé stejně velké pevné cívky C_1 a C_1' a
 - 1 jednovrstvá pohyblivá cívka C_2 zavěšená na vahadle
- obě pevné cívky jsou navinuty ve stejném smyslu, ale proud jimi prochází v opačném směru
- silové účinky na C_2 se sčítají, v důsledku symetrie uspořádání je silový účinek cívky C_1 na cívku C_2 stejný jako účinek cívky C_1'



- síla F_{12} působící ve směru osy z mezi cívkami C_1 a C_2 (derivace energie W mg.pole systému C_1 a C_2 podle z):

$$F_{12} = \frac{\partial W}{\partial z} = I_1 I_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial z} \sigma$$

kde I_1 a I_2 ... proudy procházející cívkami

M_{12} ... vzájemná indukčnost,

k výpočtu se uplatní Neumannův vzorec

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \int \int \frac{\partial \sigma_1 \partial \sigma_2}{a_{12}}$$

9. σ_1 a σ_2 ... proud. elementy ve vzdálenosti a_{12}

- při výpočtu se obě cívky nahrazují šroubovicemi totožnými se středními proudovými vlákny ve vinutí
- protéká-li všemi cívkami stejný proud I (což je splněno), platí

$$F_{12} = f_{12} I^2$$

kde f_{12} ... jednotková síla působící mezi
cívkami C_1 a C_2

Když cívkami protéká **jednotkový proud**

$$f_{12} = \frac{\partial M_{12}}{\partial z}$$

- při měření se komutátor.přepínačem volí takový smysl proudu v cívce C_2 , aby tato cívka byla působením C_1 a C'_1 byla tažena dolů
- váhy se vyrovnají,
- změní se smysl proudu v cívce C_2 a
- provede se nové nastavení rovnovážného stavu přidáním hmotnosti závaží na pravou misku o Δm
- změna ΔF v silovém působení mezi cívkami vah je pak rovna změně v silovém působení závaží na pravé misce:

$$\Delta F = 4 f_{12} I^2 = \Delta mg$$

- z toho plyne **hodnota proudu**:

$$I_{SI} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta mg}{f_{12}}}$$

kde g ... tíhové zrychlení v místě měření

- Stanovení hodnoty f_{12} :
- 1. k přesnému výpočtu hodnoty f_{12} je nutné znát rozměry i tvar všech cívek a jejich vzájemné pozice
- 2. určení hodnoty f_{12} z geometrických rozměrů cívek se nahradí experimentem:

- Provede se měření, kdy cívkou C_2 , kterou neprochází proud, pohybujeme ve vertikálním směru známou rychlostí „ v “
- indukované napětí:

$$u(t) = 2I \frac{\partial M_{12}}{\partial t} = 2I \frac{\partial M_{12}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = 2Iv \frac{\partial M_{12}}{\partial z}$$

kde I ... hodnota proudu, který prochází pevnými cívkami a při průchodu odporovým etalonem vytvoří úbytek $U = RI$

- rovnovážná poloha vah je dána:

$$u(t) = U$$

$$f_{12} = \frac{\partial M_{12}}{\partial z} = \frac{R}{2\nu}$$

16.1.2 Měření gyromagnetického poměru protonu v silném a slabém magnetickém poli

- gyromagnetický poměr protonu je definován

$$\gamma_P = \frac{2\mu_P}{h}$$

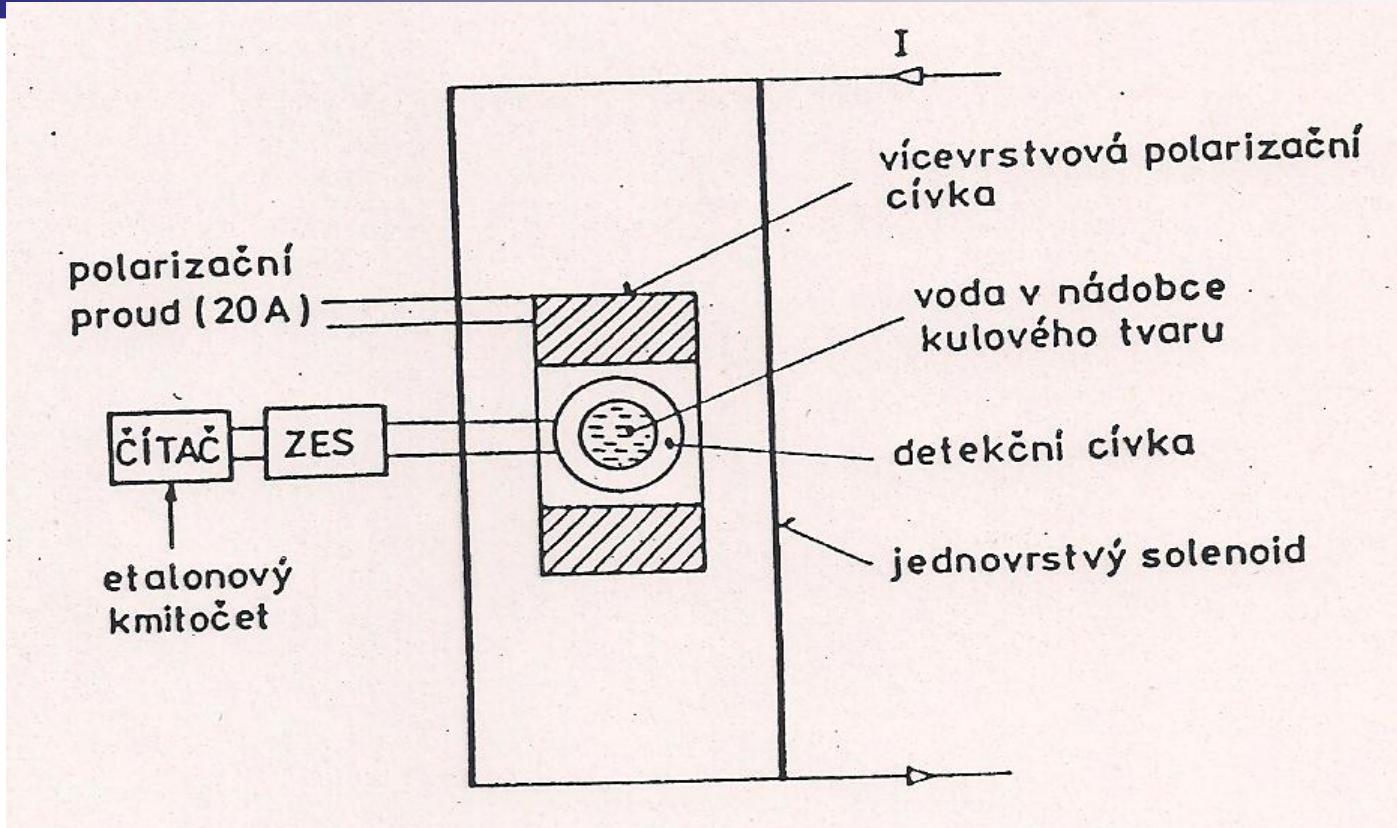
kde μ_P ... magnetický moment protonu
h ... Planckova konstanta



- k měření gyromagnetického poměru protonu se používají dvě metody:

měření ve slabém magnetickém poli (B cca 10^{-3} T)

- indukce B je srovnatelná s B geomagnetického pole Země
- kmitočet má hodnotu cca 50 Hz
- při měření ve slabém mag. poli se indukce B známé hodnoty vytváří průchodem známého proudu solenoidem známých rozměrů



Měření gyromagnetického poměru protonu - Vigoureuxova metoda

Polarizace protonů se provádí polarizační cívkou, která je i s nádobkou s vodou umístěna uvnitř solenoidu. Polarizační cívkou procházejí krátké impulsy. Orientace nádobky je taková, aby směr mg. momentů protonů ve vodě byl kolmý ke směru mg. indukce B ve středu solenoidu.

- gyromagnetický poměr ve slabém mag. poli :

$$\gamma_{P1} = \frac{\omega_1}{B_1} = \frac{\omega_1}{\mu_0 K_1 I_1}$$

kde B_1 ... magnetická indukce v solenoidu

ω_1 ... odpovídající úhlový kmitočet napětí
indukovaného do detekční cívky

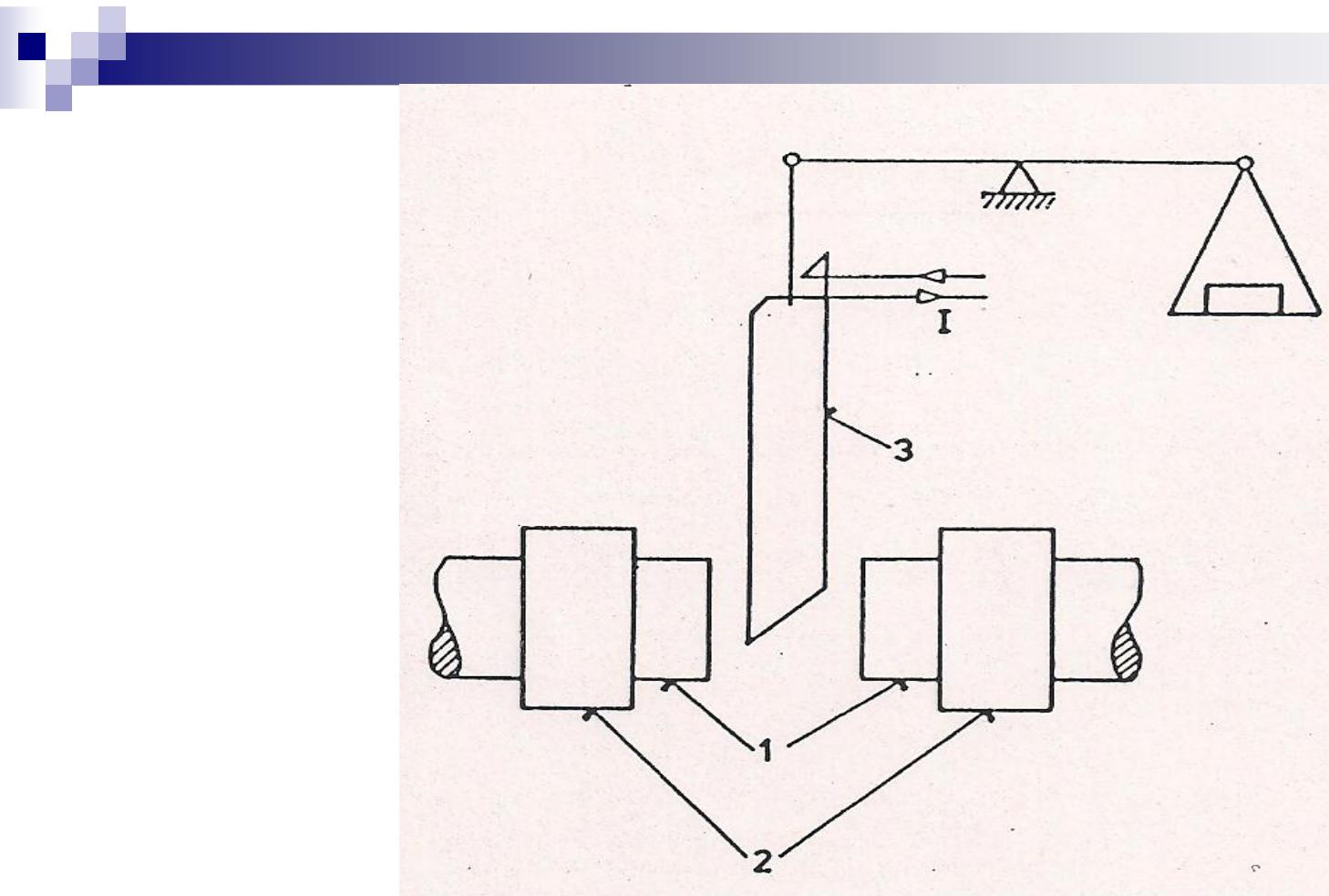
K_1 ... součinitel závisející na rozměrech solenoidu

I_1 ... proud solenoidem

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m ... permeabilita vakua

měření ve silném magnetickém poli ($B = 0,5$ T)

- indukce B je řádově 1000-krát větší než geomag. pole Země, cca 0,5 T
- kmitočet f řádově několik MHz
- v silném mag. poli se potřebná indukce B tvoří pomocí elektromagnetu
- ke stanovení její hodnoty se měří síla F působící na cívku známých rozměrů, zavěšenou v poli elektromagnetu a kterou prochází známý proud I
- Obvykle se používá cívka obdélníkového tvaru, její vertikální rozměr je mnohokrát větší než horizontální



Měření indukce B magnetického pole mezi pólovými nástavci elektromagnetu (silné magnetické pole):

- 1 – pólové nástavce
- 2 – cívky elektromagnetu
- 3 – měřicí cívka



- ke stanovení její hodnoty se měří **síla F** působící na cívku známých rozměrů, zavěšenou v poli elektromagnetu a kterou prochází známý proud I
- **proud I_2** procházející cívkou zavěšenou na levém vahadle vah vyvolá takové silové působení F na tuto cívku,
že k obnovení rovnováhy vah je potřeba zvýšit hmotnost závaží na pravé straně o hodnotu **m**

$$F = mg = I_2 K_2' B_2$$

- pro hodnotu gyromagnetického poměru v silném mag. poli

$$\gamma_{P_2} = \frac{\omega_2}{B_2} = \frac{\omega_2 K'_2 I_2}{g m} = \frac{\omega_2 I_2}{K_2}$$

kde B_2 ... indukce v prostoru mezi pólovými nástavci elektromagnetu

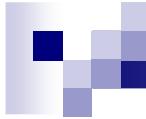
ω_2 ... úhl. kmitočet, při němž dochází k maximálnímu pohlcování vf energie pole budící cívky vzorkem (nádobka s vodou, kde jsou volné protony)

K'_2 ... úměrný síle, která působí na zavěšenou cívku v případě:

kdy jí prochází jednotkový proud a její spodní část je umístěna v prostoru s jednotkovou magnetickou indukcí B

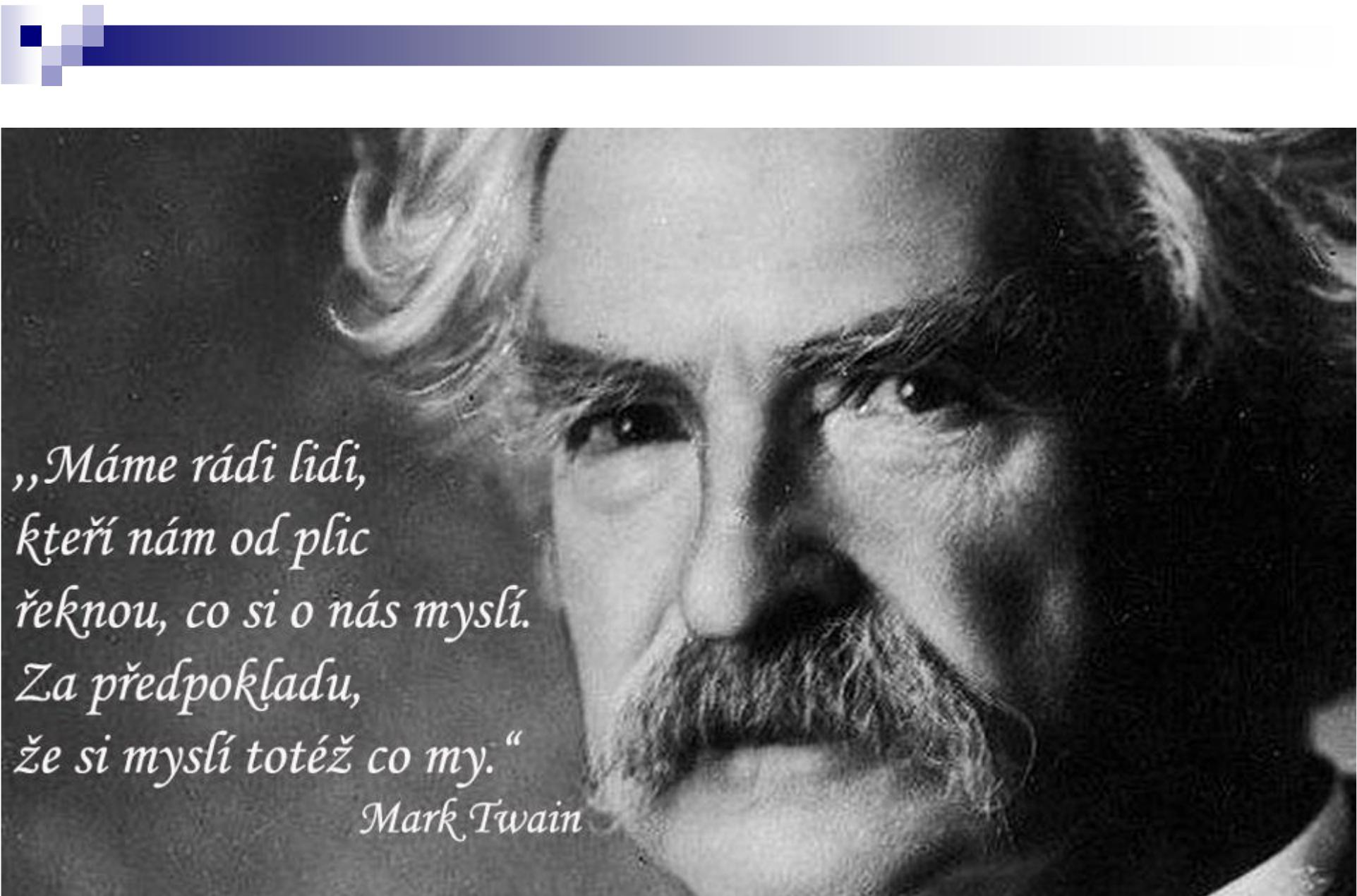
- převodní koeficient
(převod mezi proudem laboratoře $A_{lab.}$ a proudem A_{SI})
- po matematických úpravách má **výsledný výraz pro převodní koeficient K** (atomovým měřením) tvar:

$$K = \sqrt{\frac{\gamma_{P_1}}{\gamma_{P_2}}}$$



Konec 9. přednášky

DĚKUJI
ZA
POZORNOST



*„Máme rádi lidí,
kteří nám od plic
řeknou, co si o nás myslí.
Za předpokladu,
že si myslí totéž co my.“*

Mark Twain