

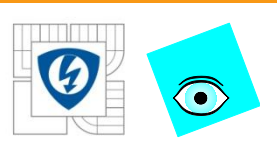


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Metrologie hmotnosti

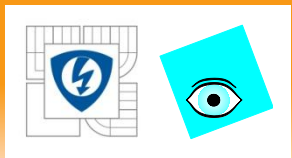
Mgr. Jaroslav Zůda

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



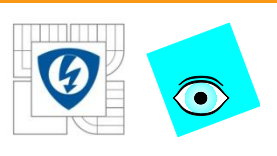
Obsah

- Historie hmotnosti
- Primární metrologie v ČR
- Budoucnost hmotnosti
- Měření hmotnosti
- Přenos jednotky hmotnosti na díly a násobky



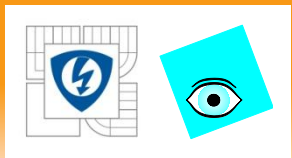
Historie hmotnosti - starověk

- Patří mezi vůbec první veličiny, které se člověk pokoušel změřit
- První etalony v Egyptě a na Středním východě
- V oblasti hmotnosti používané „velká hmotnost“ a „malá hmotnost“
- Veličina pro hmotnost byla též veličinou pro objem
- Kvůli nepřesné návaznosti mohly panovat rozdíly mezi městy



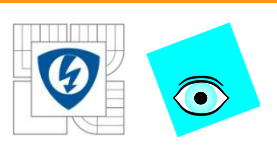
Historie hmotnosti - Francie

- Nový systém měr a vah založen 1793
- Definice hmotnosti přes definici délky
 - Etalon odpovídal hmotnosti 1 dm^3 vody za daných podmínek
 - Vyroben archivní prototyp
 - Potenciální potíže při zpřesnění měření vedly k definici hmotnosti přes archivní prototyp



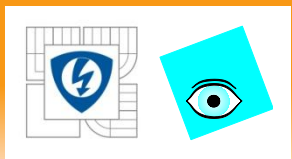
Historie hmotnosti – Metrický systém

- 1869 – svolání mezinárodní konference
- Výběr kovu pro výrobu etalonů – nakonec slitina 90 % platiny a 10 % iridia
 - Stálost, stejnorodost, tvrdost, dobrý lesk
- Rozdíl mezi skutečnou hodnotou a teorií
 - Jako základ se vzala hmotnost archivního prototypu
- Etalon ve tvaru válce s výškou rovnou průměru podstavy



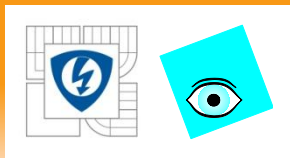
Historie hmotnosti – metrický systém

- Výroba slitiny
 - Společnost Johnson, Matthey a spol.
 - Přes 30 taveb
 - Poslední tavenba 13. 5. 1874, celkově 250 kg
- 1883 – jeden ze tří kusů vybrán jako mezinárodní prototyp
- 1899 – již vyrobeno 43 prototypů, 6 v BIPM jako pracovní etalony, ostatní jako národní etalony signatářům metrické konvence



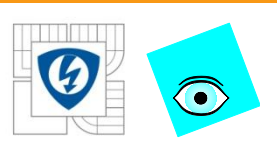
Historie hmotnosti – metrický systém

- 1889 – definitivně schválen mezinárodní prototyp kilogramu
- 1903 – jednotka hmotnosti definována pomocí mezinárodního prototypu kilogramu
- 1928 – 1974 – vyrobeno dalších 23 etalonů
- 1992 – ukončení posledního porovnání mezinárodního prototypu a oficiálních kopií



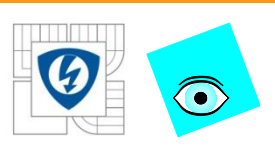
Historie hmotnosti - Československo

- 1928 – Československá republika získává prototyp č. 41
- 1968 – státní etalon převezen z Prahy do Bratislavy na pracoviště hmotnosti ČSMÚ
- 1981 – ČSSR získává další prototyp, č. 65
- 1993 – rozdělení Československa, vznik ČMI
- Oba prototypy zůstaly v Bratislavě na základě „územního principu“



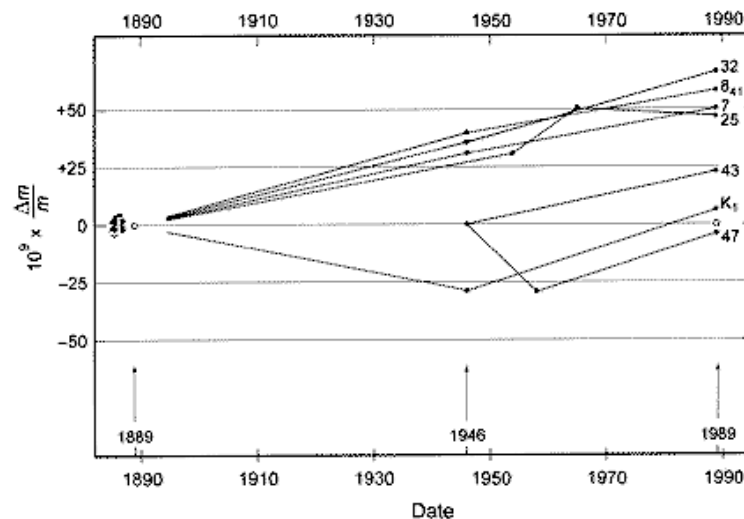
Historie hmotnosti – Česká republika

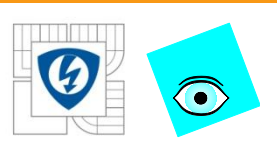
- 1994 – vybudována laboratoř hmotnosti v Brně
- 1995 – návaznost etalonů pro ČR na Švýcarsko
- 1999 – v dubnu přivezen P_{tlr} prototyp č. 67
- 2000 – prototyp č. 67 oficiálně vyhlášen státním etalonem hmotnosti
 - Hmotnost – $1 \text{ kg} + 0,165 \text{ mg}$
- 2010 – pravidelná kalibrace v BIPM
 - Hmotnost – $1 \text{ kg} + 0,188 \text{ mg}$



Budoucnost hmotnosti – historické důvody

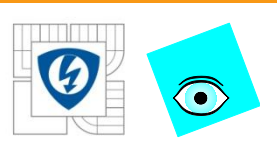
- 1988 – 1992 – třetí verifikace prototypů hmotnosti
 - Porovnání mezinárodního prototypu, oficiálních kopií a několika státních etalonů
- Vzrůst hodnoty hmotnosti o přibližně 50 mg





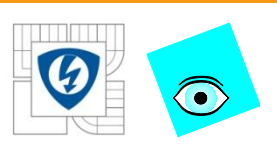
Budoucnost hmotnosti - požadavky

- Obecný směr v SI – definice přes konstantu
 - Délka – rychlost světla
 - Čas – přechod mezi dvěma hladinami v atomu Cesia
- Možnosti pro další veličiny
 - Elektrický proud – elektrický náboj
 - Teplota – Boltzmannova konstanta
 - Hmotnost – Planckova nebo Avogadrova konstanta



Budoucnost hmotnosti – projekt Avogadro

- Vztah jednotky hmotnosti a Avogadrovy konstanty
 - Již z definice Avogadrovy konstanty
 - Počet atomů ve 12 g čistého ^{12}C
- Pro praxi zvolen křemík
 - Relativně snadná výroba
 - Monokrystal velkých rozměrů

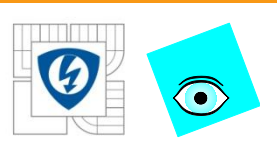


Budoucnost hmotnosti – projekt Avogadro

- Vztah pro výpočet hmotnosti

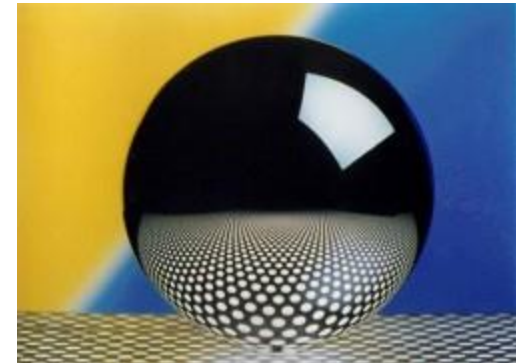
$$- M = \frac{M_{Si} V n}{N_A a^3}$$

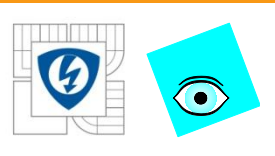
- M_{Si} – molární hmotnost křemíku
- V – objem objektu
- n – počet atomů v jedné buňce krystalu
- a – mřížkový parametr
- N_A – Avogadrova konstanta



Budoucnost hmotnosti – projekt Avogadro

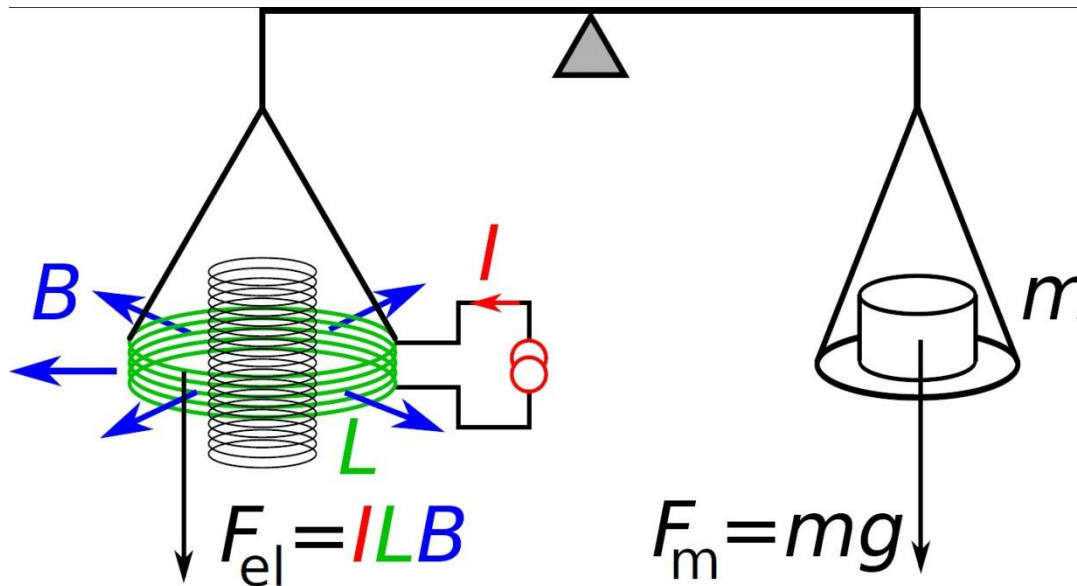
- Poměrně jednoduchá rovnice
- Molární hmotnost
 - Nutné přesně určit složení
 - Nebo dokonale čistý křemík
- Objem
 - Velmi přesné koule
 - Průměr 93,6 mm, drsnost 50 nm
- Nejlepší výsledek – $N_A = 6,02214082(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
 - Relativní nejistota 3×10^{-8} , požadavek 2×10^{-8}

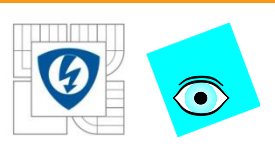




Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

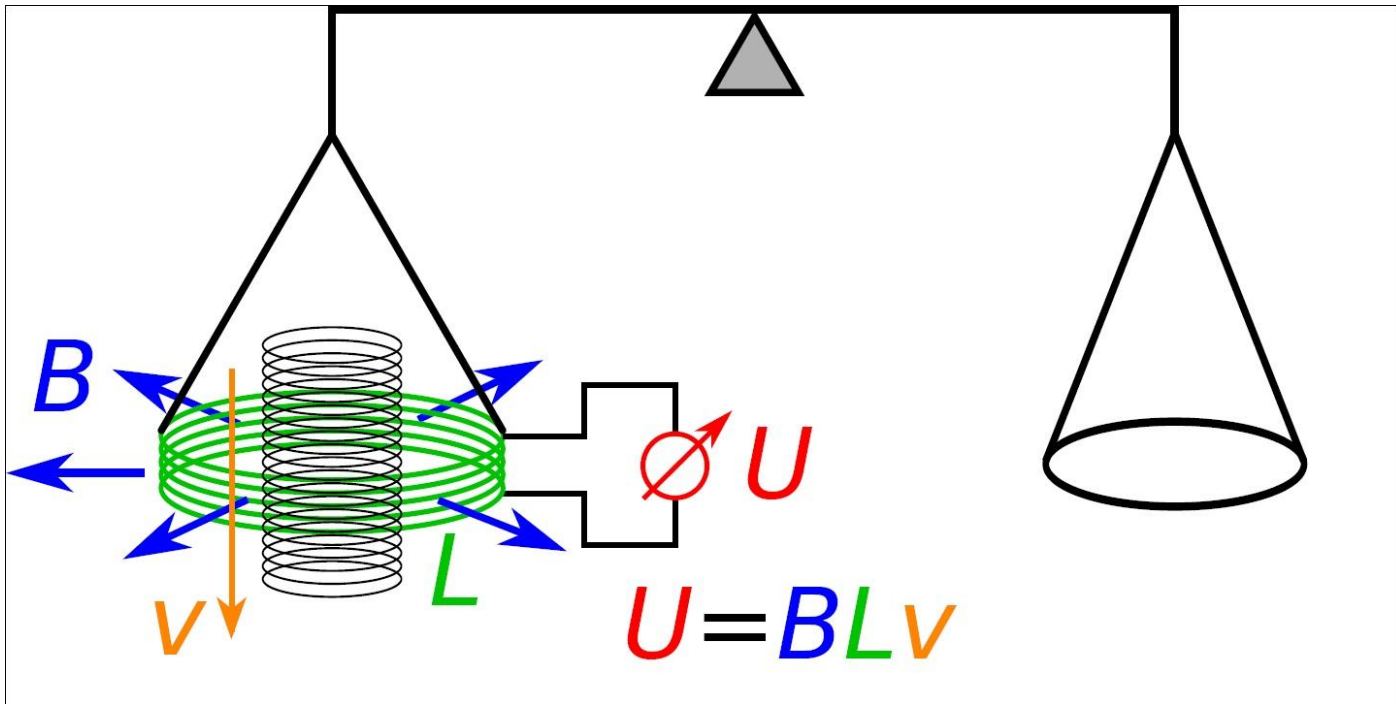
- Porovnání tíhové a elektromagnetické síly
- Statická část
 - Jen měření hmotnosti

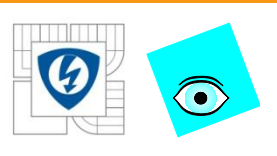




Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

- Dynamická část
 - Probíhá bez závaží





Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

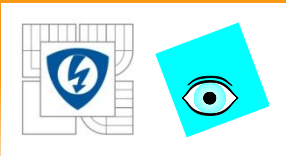
- Po srovnání vztahů

- $UI = mgv$

- Odtud název „Výkonové váhy (Watt balance)“
 - Planckova konstanta ukryta v napětí a proudu

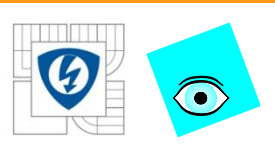
- Úplný vztah

- $m = \frac{h}{4gv} K_{J-90}^2 R_{K-90} UI$



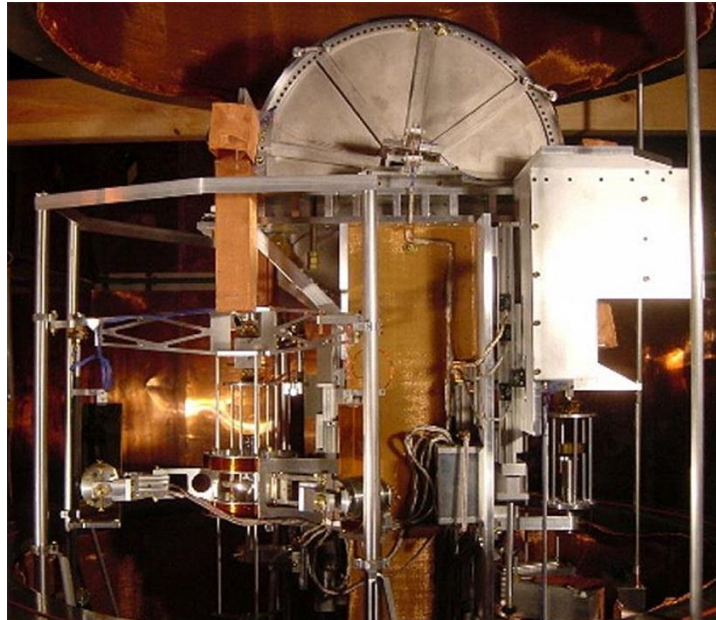
Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

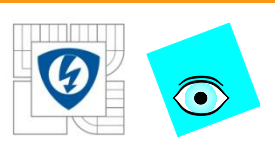
- Měření napětí a odporu
 - Kvantový Hallův a Josephsonův jev
 - Viz dřívější přednáška
- Tíhové zrychlení
 - Absolutní gravimetr
 - Měření zrychlení volného pádu, opravy na slapové jevy apod.
- Rychlost
 - Měření délky a času



Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

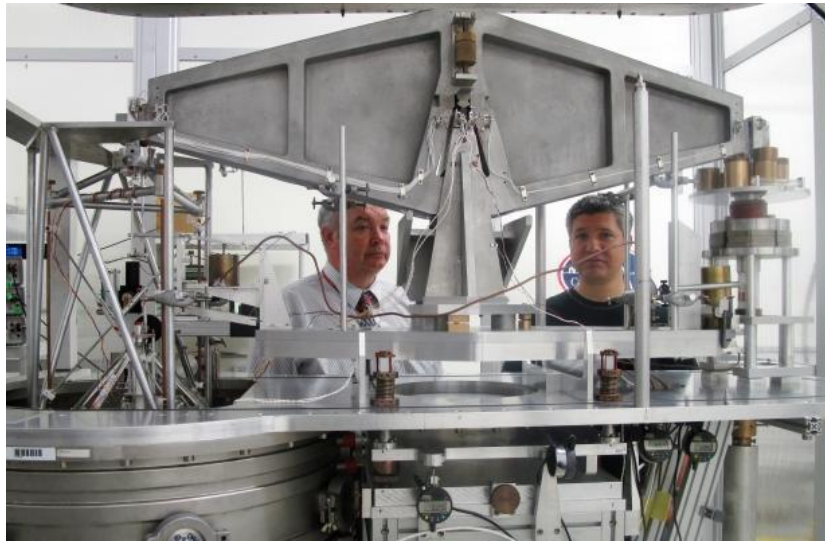
- Aktuální stav
 - NIST (USA) – prozatím nejlepší realizace s relativní nejistotou $3,6 \times 10^{-8}$





Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

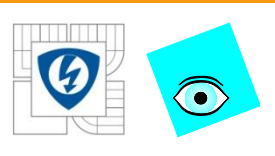
- Aktuální stav
 - NPL (Velká Británie) – publikace relativní nejistoty $1,7 \times 10^{-7}$
 - Experiment ukončen a přestěhován do Kanady



18.6.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

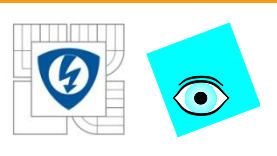




Budoucnost hmotnosti – Výkonové váhy

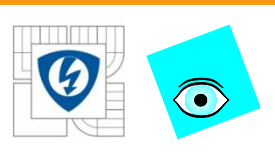
- Aktuální stav
 - BIPM – aktuální relativní nejistota 5×10^{-6}
 - Dynamická část probíhá se závažím





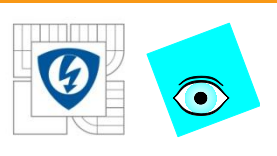
Budoucnost hmotnosti - důsledky

- CGPM 2011 – nová definice jednotky hmotnosti bude na základě Planckovy konstanty
- Základní požadavky před zavedením nové definice
 - Nesmí zůstat nevyřešené rozdíly mezi různými experimenty
 - Relativní nejistota nejlepšího měření je 2×10^{-8}
 - Alespoň tři další experimenty vykazují relativní nejistotu nanejvýš 5×10^{-8}



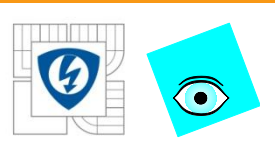
Budoucnost hmotnosti – důsledky

Současný stav		Po zavedení nové definice		
Nejistota v μg		Případ 1 Nejistota v μg	Případ 2 Nejistota v μg	Případ 3 Nejistota v μg
0	Nejlepší realizace jednotky	20	30	50
6	Oficiální kopie BIPM	30	42	71
6	Pracovní etalony BIPM	30	43	71
6	Státní etalony	30	43	71
14	Referenční etalony	32	43	71
25	Pracovní etalony	44	53	77
83	Zákaznická závaží	83	85	100



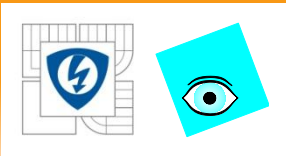
Měření hmotnosti - základy

- Přímé měření hmotnosti
 - „Kouknu se na ukazatel a vidím“
- Porovnání hmotnosti se známým závažím
 - Hmotnost se spočítá z naměřeného rozdílu
 - Přesnější než přímá metoda
 - Měření probíhá na speciálních vahách – komparátorech



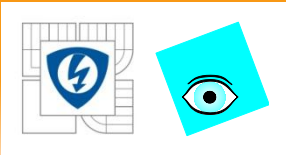
Měření hmotnosti - základy

- Metoda porovnání závaží
 - $\Delta m = m_T - m_R$
 - Index R označuje etalon – referenci
 - Index T označuje neznámé – testované závaží
- Není započtena vztlaková síla
 - Ve skutečnosti tedy
 - $\Delta m = (m_T - \rho_a V_T) - (m_R - \rho_a V_R)$
 - ρ – hustota
 - a - vzduch



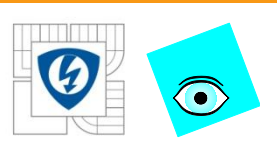
Měření hmotnosti – vakuová a konvenční hmotnost

- Vakuová hmotnost
 - Hmotnost tělesa ve vakuu, tedy bez vztlakové síly
 - Tedy též skutečná hmotnost
- Konvenční hmotnost
 - Udává se jako výsledek kalibrace závaží
 - Skutečná hmotnost redukována na určité podmínky
 - $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$
 - $T_a = 20 \text{ °C}$
 - $\rho_R = 8000 \text{ kg/m}^3$



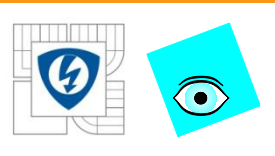
Měření hmotnosti - vakuová a konvenční hmotnost

- Převod mezi vakuovou a konvenční hmotností
 - $m_{C_T} = \frac{m_T(\rho_T - 1,2)}{0,99985\rho_T}$
- Konvenční hmotnost se pak již téměř neliší od skutečného měření ve vzduchu
 - Podmínka – hustota vzduchu se neliší o více než 10 %
 - Splněno dobře až do nadmořské výšky zhruba 1000 m
 - Výhodná při běžných kalibracích, při velmi přesných měřeních již ne



Měření hmotnosti – hustota prostředí

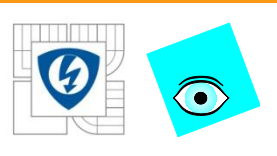
- Hustota prostředí
 - Jeden z parametrů pro výpočet hmotnosti
 - Určí se z rovnice
 - $\rho_a = \frac{0,34848p - 0,009h_r \exp(0,061t)}{273,15 + t}$ - hustota vzduchu
 - Srovnáním s jiným prostředím
 - Přímým měřením



Měření hmotnosti – hustota prostředí

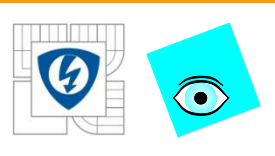
- Přímé měření
 - Mějme dvě závaží o stejné hmotnosti, ale různém objemu
 - $\rho_a = \frac{\Delta m_v - \Delta m_a}{\Delta V}$
 - Lze využít pro měření hustoty libovolného prostředí





Měření hmotnosti – hustota závaží

- Hustota závaží
 - Lze odhadnout – velmi nepřesné
 - Přímé určení
 - Ve vztahu pro výpočet hmotnosti jsou dvě neznámé
 - Hmotnost závaží
 - Hustota závaží
 - Je tedy potřeba další měření
 - Například v jiném prostředí

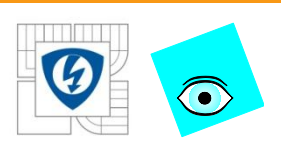


Měření hmotnosti – hustota závaží

- Dvě rovnice o dvou neznámých
 - Obě rovnice popisují měření hmotnosti v různých prostředích
 - Výsledný vztah

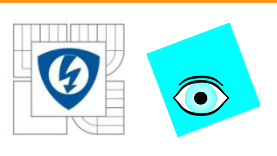
$$\bullet \rho_T = \frac{\rho_2 \Delta m_1 - \rho_1 \Delta m_2 + \frac{m_{CR} \rho_R (\rho_2 - \rho_1)}{\rho_R - 1,2}}{\Delta m_1 - \Delta m_2 + \frac{m_{CR} (\rho_2 - \rho_1)}{\rho_R - 1,2}}$$

- Lze obecně využít pro kombinaci dvou libovolných prostředí o různých hustotách



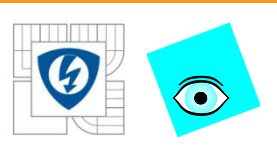
Měření hmotnosti – měření ve vakuu

- Výhody
 - Měření skutečné hmotnosti
 - Absence vnějších rušivých vlivů – změny teploty apod.
 - Velmi přesné měření – typická opakovatelnost 300 ng
- Nevýhody
 - Složitý a poměrně drahý přístroj
 - Změny na povrchu závaží



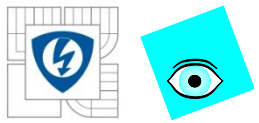
Měření hmotnosti – povrch závaží

- Povrchové jevy
 - Adsorpce, desorpce atd.
 - Nejčastěji vodní páry
 - Způsobují znatelnou změnu hmotnosti
- Gravimetrická kompenzace
 - Měření změny hmotnosti na jednotku povrchu
- Analýza povrchových jevů
 - Optické metody
 - TDS atd.

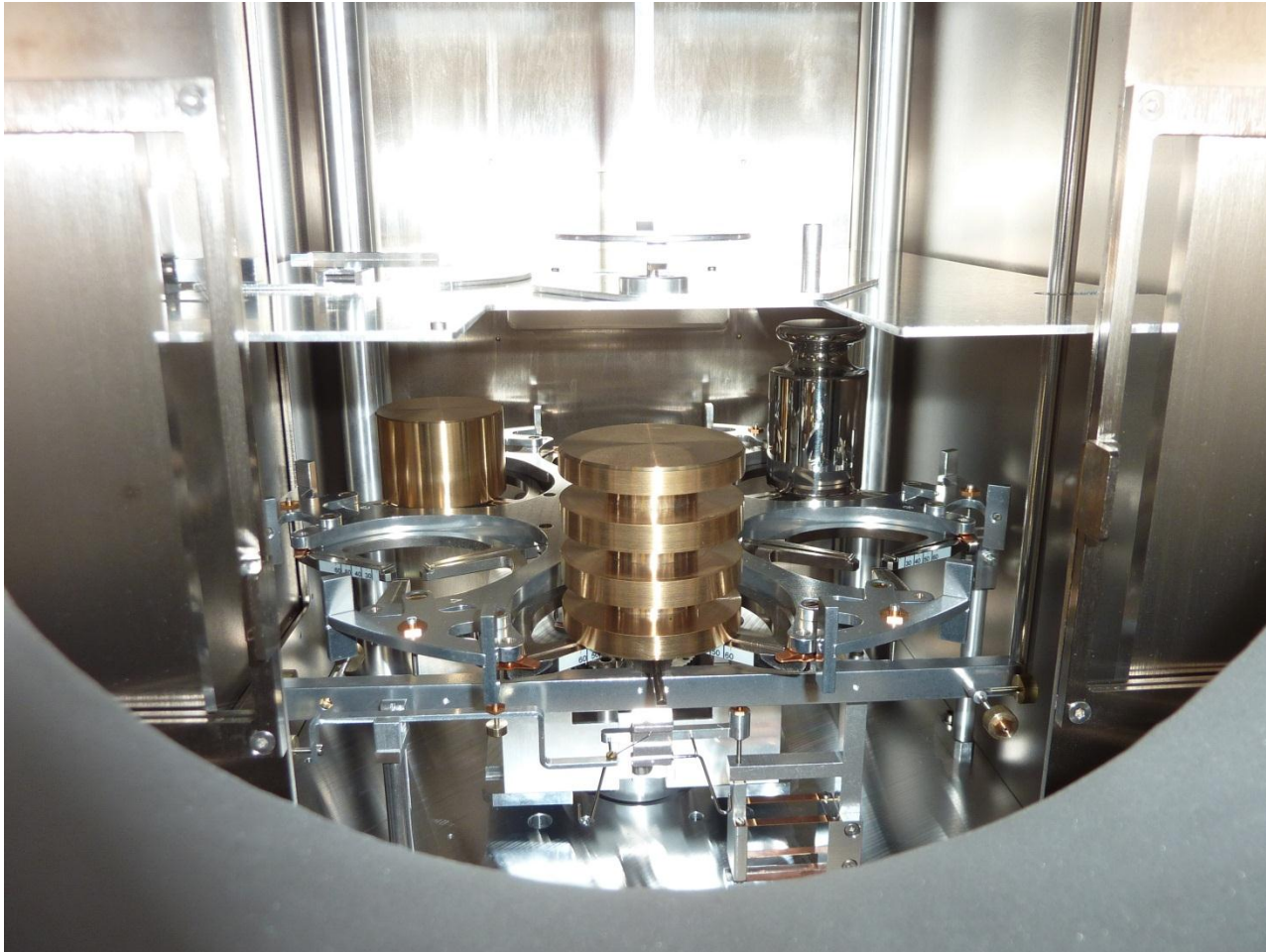


Měření hmotnosti – povrch závaží

- Přímé měření povrchových změn
 - Uvažujme dvě závaží o stejné hmotnosti a objemu, ale různém povrchu
 - Jedno měření ve vzduchu
 - Jedno měření ve vakuu
- Příklad pro závaží z mosazi
 - $\Delta S = 150 \text{ cm}^2$
 - Celková změna $0,0002 \text{ mg/cm}^2$



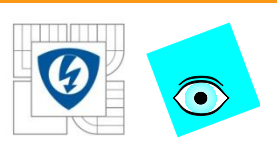
Měření hmotnosti – povrch závaží



18.6.2012

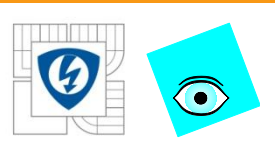
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





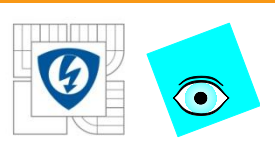
Přenos jednotky hmotnosti

- Návaznost primárních pracovních etalonů na státní etalon
 - Státní etalon – slitina platiny a iridia
 - Pracovní etalony – nerezová ocel
- Kalibrace probíhá ve vzduchu
 - Nutné počítat s konvenčními hodnotami hmotnosti
 - Podmínky prostředí musí být dostatečně stálé po celou dobu měření



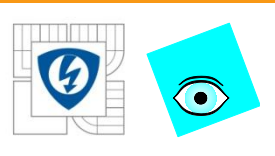
Přenos jednotky hmotnosti

- Typické složení sady závaží
 - Dekády (1; 2; 2; 5) nebo (1; 1; 2; 2; 5; 5)
 - Rozsah 1 mg – 10 kg
- Lze porovnat závaží 1 kg a 500 g + 500 g
 - Poté obě závaží 500 g mezi sebou
 - Získá se tak hmotnost obou 500g závaží
- Analogicky lze postupovat dále



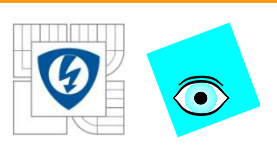
Přenos jednotky hmotnosti

- Specifické podmínky nemusí umožnit snadnou kalibraci
 - Typicky prostorové omezení
 - Například nelze umístit více než 3 závaží na jednu pozici
 - Je nutné využít jiná speciální závaží
- Využije se pak předeterminovaných systémů
 - Řeší se metodou nejmenších čtverců



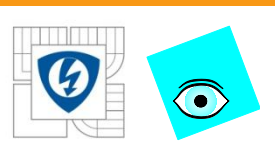
Přenos jednotky hmotnosti

- $\hat{\theta} = (A^T U_W^{-1} A)^{-1} A^T U_W^{-1} W$,
 - Matice A – plán měření, obsahuje tedy jen 0, +1, -1
 - Matice U_W – kovariační matice
 - Vektor W – vektor obsahující výsledky měření společně s hodnotou použitého etalonu
- Každá dekáda se kalibruje zvlášť
 - Jako etalon slouží nejmenší závaží z nejbližší vyšší dekády
 - Např. pro dekádu 10 g – 50 g je etalon 100 g

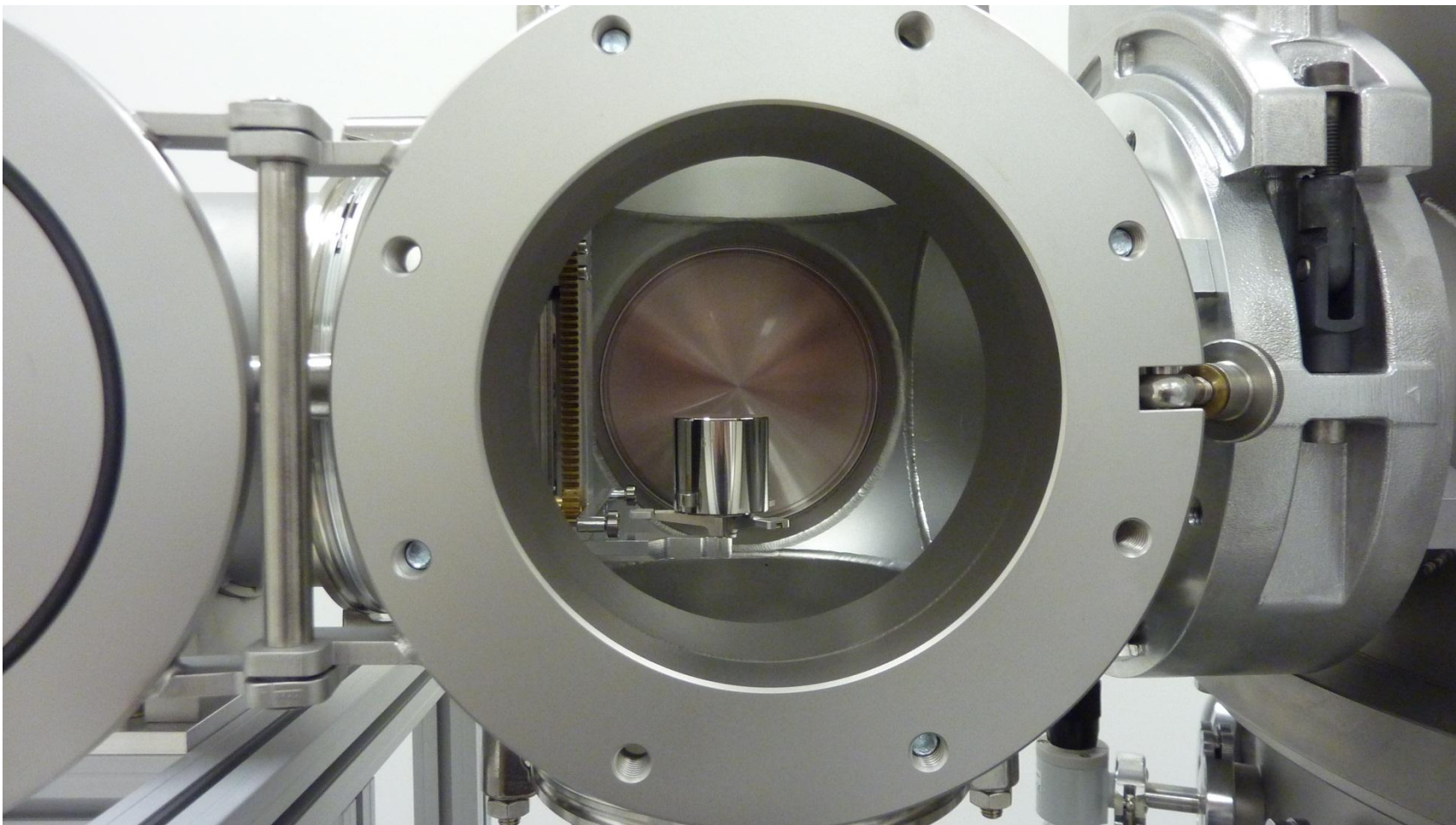


Přenos jednotky hmotnosti

- Typická dekáda obsahuje 12 – 16 měření
 - Pokud je nutné zavést jiná závaží, počet měření se zvýší
- Měření je časově velmi náročné
 - Kalibrace celé sady 1 mg – 10 kg může trvat až 3 měsíce
 - Lze urychlit s použitím speciálních robotických komparátorů



Děkuji za pozornost!



18.6.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

