

Aplikace fyziky v metrologii a činnost Českého metrologického institutu



**RNDr. Pavel Klenovský
generální ředitel ČMI**

AUTOR

Pavel Klenovský

- ❑ **narozen 13.5.1952 v Brně**
- ❑ **Gymnasium Křenová: speciální třída „S“ matematiky a fyziky**
- ❑ **absolvent fyziky pevné fáze z r. 1975**
- ❑ **doktorát: 1976**
- ❑ **od r.1977 v různých organizačních formách státní metrologie**
- ❑ **1993: jmenován ředitelem nově vzniklého Českého metrologického institutu – národního metrologického institutu ČR**
- ❑ **jazyky: anglicky, rusky a částečně německy**

DEFINICE METROLOGIE

METROLOGIE (metrology): nauka o měření

Metrologie x meteorologie



X



ZÁKLADNÍ SFÉRY PŮSOBNOSTI METROLOGIE

HLAVNÍ ÚKOL:

- ❑ žádné měřidlo neměří absolutně přesně, jeho metrologické parametry se vlivem různých faktorů s časem mění, a to jak ve smyslu odchylky od příslušné referenční hodnoty (**chyba**), tak ve smyslu rozptylu hodnot při opakovaných měřeních (**nejistota**)
- ❑ příklad: maximální dovolené chyby u stanovených měřidel, např. radarového rychloměru + 3 km/h do 100 km/h
- ❑ hlavní úkol metrologie: zajištění jednotnosti a správnosti měření v rozsahu daném zamýšleným použitím prostřednictvím různých činností jako je kalibrace, ověřování atd.

ZÁKLADNÍ SFÉRY PŮSOBNOSTI METROLOGIE

NEREGULOVANÁ SFÉRA:

- ❑ hlavními činnostmi jsou kalibrace měřidel a certifikace referenčních materiálů (CRMs) pro zajištění (metrologické) návaznosti výsledků měření
- ❑ má podnikatelský charakter (služby) mimo relativně úzký obor státních etalonů (vrchol pyramidy návaznosti – **tzv. selhání trhu**)

NÁVAZNOST – STÁTNÍ ETALONY

METROLOGICKÁ NÁVAZNOST výsledků měření
(VIM 6.10 + ISO/IEC 17025):

Taková vlastnost výsledku měření nebo hodnota etalonu, že lze prostřednictvím **nepřerušného** řetězce porovnání, u nichž je **vždy stanovena nejistota (kalibrací)**, prokázat jeho vztah ke stanoveným referencím, obvykle k primárnímu etalonu příslušné jednotky SI (státním nebo mezinárodním etalonům).

NÁVAZNOST – STÁTNÍ ETALONY

Existuje významový rozdíl mezi pojmy:

státní etalon x **primární etalon**



X



STÁTNÍ ETALON (VIM 6.3):

Etalon stanovený rozhodnutím státu k tomu, aby v dané zemi sloužil jako základ pro přiřazování hodnot jiným etalonům předmětné veličiny. Státní etalony České republiky definují nebo reprodukují hodnoty měřicích jednotek na nejvyšší metrologické úrovni v České republice a jsou základem jednotnosti a přesnosti měření na území celého státu. Státní etalony slouží k realizaci jednotek jednotlivých veličin a jejich přenosu z mezinárodních etalonů na etalony nižších řádů v rámci systému metrologické návaznosti měření a měřidel na území ČR.

NÁVAZNOST – STÁTNÍ ETALONY

PRIMÁRNÍ ETALON (VIM 6.4):

Etalon, který je široce uznáván nebo konstruován tak, že má nejvyšší metrologické kvality a jehož hodnota je akceptována bez vztahu k jiným etalonům téže veličiny.

ZÁKLADNÍ SFÉRY PŮSOBNOSTI METROLOGIE

REGULOVANÁ SFÉRA:

- a) Etalon, Legální kontrola měřidel – výkonné činnosti charakteru posuzování shody jako schvalování typu, prvotní a následné ověřování měřidel**
- b) Metrologický dozor**
- c) Úřední měření**
- Ingerence státu → legislativa**

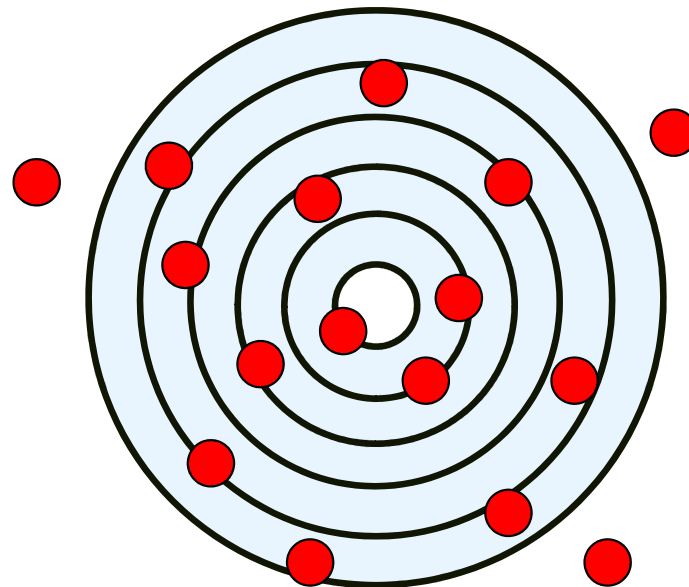
VYJADŘOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

- ❑ **Měření ve fyzice, technice:**
naměřená hodnota + chyba
(pro vyjádření blízkosti naměřené a „správné“ hodnoty včetně variability této hodnoty se vystačí s jedním pojmem)
- ❑ **Měření v metrologii:**
rozdíl mezi naměřenou či indikovanou a „pravou“ („správnou“) hodnotou + nejistota stanovení této pravé hodnoty (tohoto rozdílu)
- ❑ **Nejistota:**
kvantifikuje stupeň pochybnosti o platnosti výsledku měření

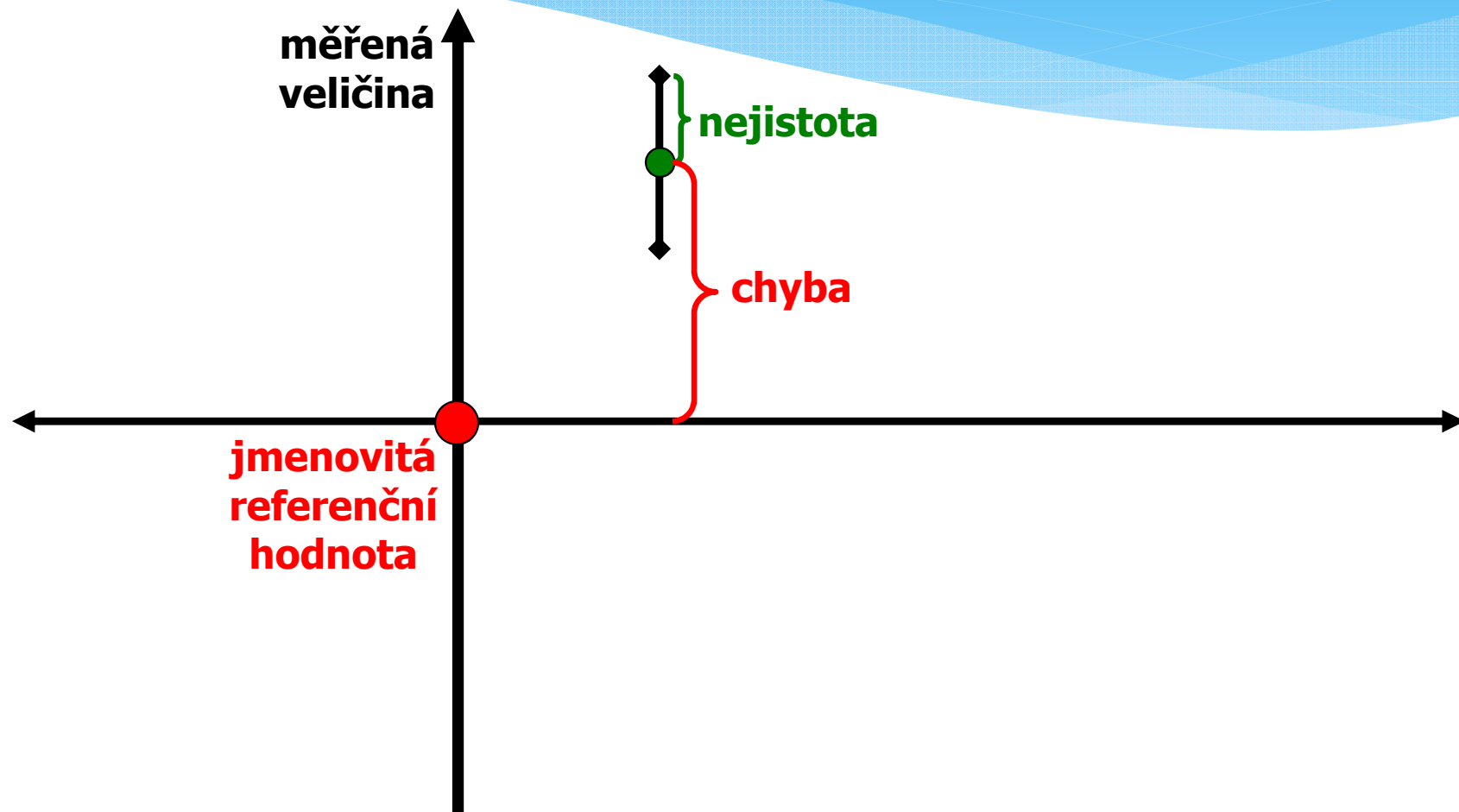
CHYBA MĚŘENÍ X NEJISTOTA MĚŘENÍ

NEJISTOTA MĚŘENÍ:

nejistota měření tedy vyjadřuje skutečnost, že pro danou měřenou veličinu a daný výsledek jejího měření existuje nejen jedna hodnota, ale **nekonečný počet hodnot rozptýlených kolem výsledku**, které jsou v souladu se všemi v dané chvíli dostupnými informacemi a pozorováními



VYJADŘOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ



VYJADŘOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

STANOVENÍ (odhad) NEJISTOTY MĚŘENÍ:

- ❑ jde o určitou aplikaci matematické statistiky na měření v metrologii
- ❑ existuje na to mezinárodní návod zvaný **GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, viz www.bipm.org
- ❑ narazili jsme tak na první možné využití fyziků v metrologii obecně

METROLOGIE A JEJÍ ÚKOLY

HNACÍ SÍLY rozvoje metrologických systémů v současné době (náklady na měření odhadovány na 4 – 6 % HDP):

- ❑ otevírání ekonomik globálnímu trhu (vstup ČR do EU, FDI);
- ❑ uvolňování pohybu zboží a odstraňování technických překážek obchodu.

METROLOGIE A JEJÍ ÚKOLY

HISTORICKÉ MEZNÍKY:

- ❑ podpis **Metrické konvence** v r. **1875**;
- ❑ průmyslová revoluce – zaměnitelnost součástí;
- ❑ přijetí moderní podoby metrického systému – **mezinárodní soustava jednotek SI** v roce **1960**;
- ❑ high tech průmysl, vysoká spolehlivost;
- ❑ podpis Ujednání o vzájemném uznávání státních etalonů a certifikátů vydávaných národními metrologickými instituty (**CIPM MRA**) v r. **1999**.

METROLOGIE A JEJÍ ÚKOLY

CHARAKTERISTICKÉ RYSY SOUČASNÉ METROLOGIE:

- ❑ **prudký technický rozvoj měřicí techniky, těsný vztah k pokrokům fyziky a využívání a uplatňování metrologie v nových odvětvích;**
- ❑ **uplatnění elektroniky, výpočetní techniky a automatizace v měřicí technice a metrologii a rostoucí využívání datových komunikací;**
- ❑ **realizace etalonů základních jednotek na základě kvantových jevů a univerzálních fyzikálních konstant;**
- ❑ **trend ke vzájemnému uznávání výsledků měření a zkoušek v mezinárodním měřítku.**

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM (NMS) má tyto základní oblasti:

- ❑ **FUNDAMENTÁLNÍ METROLOGIE (FM):**
zabývá se soustavou jednotek a fyzikálních konstant, uchováváním a rozvojem státních etalonů, přenosem jednotek na nižší etalonážní řády a vědou a výzkumem v metrologii

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM ČR

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM (NMS) má tyto základní oblasti:

□ **PRŮMYSLOVÁ METROLOGIE (PM):**

slouží k zabezpečení jednotnosti a přesnosti měření a následně jakosti výroby a služeb v širokém spektru oborů (neregulovaná sféra metrologie)

ČR je nejprůmyslovější členskou zemí EU (30 % HDP) → vysoká poptávka po různých metrologických službách

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM ČR

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM (NMS) má tyto základní oblasti:

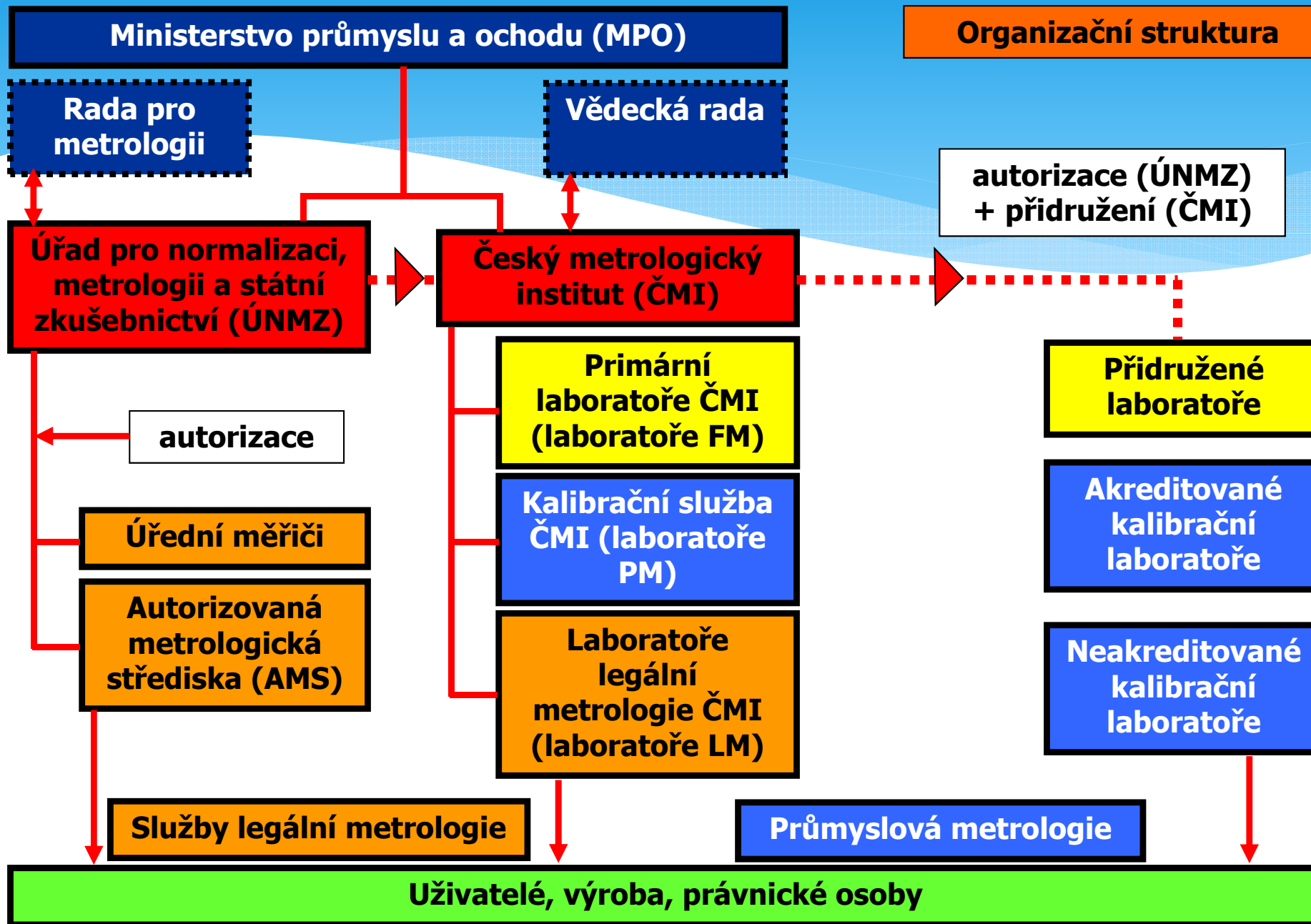
- **LEGÁLNÍ METROLOGIE (LM):**
zabezpečuje jednotnost a správnost měření při ochraně veřejného zájmu v regulované sféře podle platné právní úpravy

NÁRODNÍ METROLOGICKÝ SYSTÉM ČR

LEGÁLNÍ METROLOGIE:

- * vymezena obecně závaznými právními předpisy;
- * autorizovaná metrologická střediska (AMS), úřední měřiči a registrované subjekty pro výrobu, opravu a montáž stanovených měřidel;
- * prověřování technické způsobilosti ČMI nebo ČIA + autorizace ÚNMZ (celkem 250 subjektů – viz www.unmz.cz);
- * při udělování autorizací je totiž třeba zvažovat míru kompromisu mezi požadavkem na jejich nezávislost při rozhodování (ideální v monopolním postavení) a kvalitou a šíří nabídky těchto činností, které jsou vynucovány zákonem (ideální v konkurenčním prostředí);

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY



PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

Činnosti v metrologii se zdůvodněnou ingerencí státu (ta „selhání trhu“) jsou obvykle soustředěny do tzv. **národních metrologických institutů** či ústavů (National Metrology Institutes – NMI),
v ČR je to ČMI:

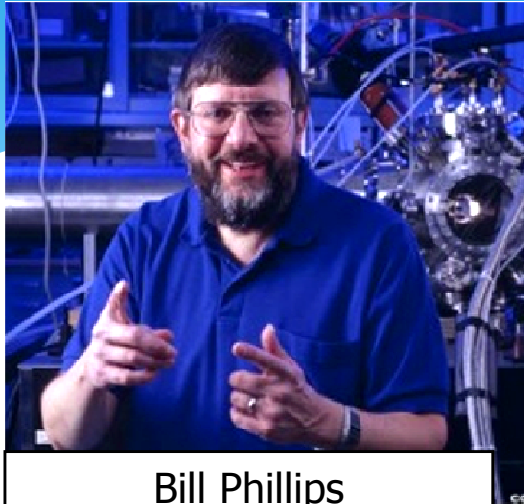
- uchovávání a rozvoj státních etalonů (FM)
- schvalování typu (posuzování shody)
- ověřování (cejchování) měřidel (hlavně tam, kde by konkurence výrazně ohrozila původní účel – ochranu spotřebitele)

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

PŘÍKLADY SVĚTOVĚ ZNÁMÝCH NMI:

- ❑ **NIST (National Institute of Standards and Technology), USA:**
největší metrologický ústav na světě
s rozpočtem ca 330 mil. USD ročně a pochází
odtud několik laureátů Nobelovy ceny za fyziku;
www.nist.gov

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY



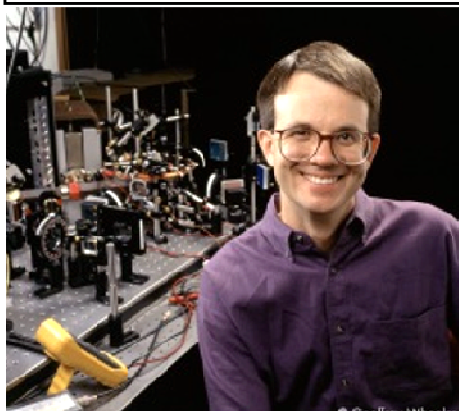
Bill Phillips
1997 Nobel Prize in Physics



Gregory Linteris
Flew 2 Space Shuttle Missions



Johanna Sengers
2003 Women in Science Award and NAS Member



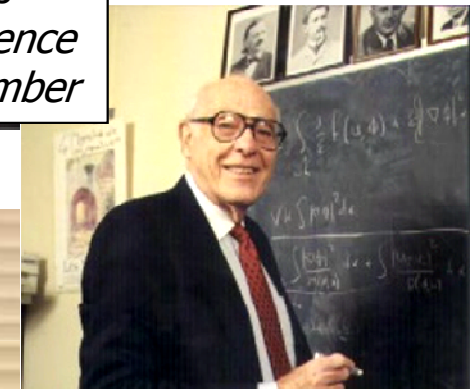
Eric Cornell
2001 Nobel Prize in Physics



Deborah S. Jin
2003 MacArthur Fellowship 'Genius Grant'
2004 Service to America Medal



John (Jan) L. Hall
2005 Nobel Prize in Physics



John Cahn
1998 National Medal of Science

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

PŘÍKLADY SVĚTOVĚ ZNÁMÝCH NMI:

- **PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), SRN:**
nám nejbližší velký NMI, největší NMI v Evropě a jeho předchůdce PT Reichanstalt byl vůbec prvním metrologickým institutem na světě (založen v r. 1887); www.ptb.de

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

PŘÍKLADY SVĚTOVĚ ZNÁMÝCH NMI:

□ NPL (National Physical Laboratory) Velká Británie:

na počátku 2. světové války zde byl vynalezen radar, který se významně podílel na úspěšné obraně Velké Británie v letecké Bitvě o Anglii, první velký NMI experimentující s moderním způsobem řízení – je spravován soukromou firmou, systém GOCO; www.npl.gov.uk

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

PŘÍKLADY SVĚTOVĚ ZNÁMÝCH NMI:

- ❑ **METAS, Švýcarsko:**
pohledu vědeckých výsledků jeden z nejlepších NMI v menších evropských zemích (spolu s SP Švédsko a VSL Holandsko; www.metas.ch)
- ❑ **SMÚ, (Slovenský metrologický ústav) Slovensko:**
pokračovatel bývalého federálního ČSMÚ Bratislava, při dělení federace byl majetek rozdělen podle územního principu (většina státních etalonů federace tedy v r. 1993 zůstala v SR); www.smu.gov.sk

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

Společně s NMI zajišťují vrcholnou úroveň návaznosti některé instituty mezinárodního charakteru, mezi nejvýznamnější patří:

- ❑ **BIPM (Mezinárodní úřad pro míry a váhy), Sevres u Paříže:**
výkonný organizační útvar (laboratoř) Metrické konvence, uchovává poslední mezinárodní etalon (hmotnost – 1 kg); www.bipm.org

PRVKY NMS, JEJICH POSTAVENÍ A ÚLOHY

Společně s NMI zajišťují vrcholnou úroveň návaznosti některé instituty mezinárodního charakteru, mezi nejvýznamnější patří:

- ❑ **EC JRC (Joint Research Centre) IRMM (Institute for Reference Materials and Measurement) Geel, Belgie:** jeden ze 7 výzkumných ústavů řízených Evropskou komisí zaměřený především na metrologii v chemii (spolu s NIST největší světový výrobce referenčních materiálů, především v anorganické oblasti), někdy projevuje ambice stát se „Evropským metrologickým institutem“, podporuje aktivity v metrologii v chemii v kandidátských zemích (školení MiC Training); www.jrc.cec.eu.int

VZNIK ČMI - 1993

- ❑ **založení ČMI bylo důsledkem rozpadu československé federace - jeho úkolem bylo hrát zde roli národního metrologického institutu**
- ❑ **správní činnosti v metrologii jsou v ČR odděleny od výkonných činností: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ)**
- ❑ **ČMI byl založen na bázi různých rozptýlených pracovišť státní metrologie v ČR**
- ❑ **federální metrologický institut v ČSFR byl totiž budován v Bratislavě, SR**
- ❑ **právně-organizační charakter: příspěvková organizace zřízená MPO (podle zákona o majetku ČR č. 219/2000 Sb. v platném znění)**

VZNIK ČMI - 1993

- ❑ **mise: hrát roli národního metrologického institutu v oblasti fundamentální a legální metrologie**
- ❑ **rozdělení federace v oblasti majetku bylo postaveno na územním principu**
- ❑ **v důsledku toho musel být náš institut postaven v nových podmínkách téměř na zelené louce**
- ❑ **to by samo o sobě nebyl až takový problém, vezmeme-li v úvahu zastaralost technického vybavení z dob socialismu – ovšem pouze za jednoho předpokladu: podaří se zajistit dostatek finančních zdrojů pro rozvoj této důležité infrastruktury moderního státu**

EKONOMICKÉ PARAMETRY ČMI v roce 1993

- ❑ počet zaměstnanců: 285 (z toho 20 % VŠ)
- ❑ finanční údaje (1993):
 - ❑ obrat ca 66 mil. Kč ročně (z toho ca 75 - 80 % v legální metrologii)
 - ❑ neinvestiční dotace (dotace na provoz): 0
 - ❑ investiční dotace: 60 mil. Kč
 - ❑ hmotný majetek: většinou nepoužitelný
 - ❑ legální metrologie (ověřování v tradiční oblasti měř a vah): 70 – 80 %

DALŠÍ POSTUP OD ZALOŽENÍ

ZÁKLADNÍ SMĚRY (dané i auditem EK):

- harmonizovat legislativu s EU (tehdy ES)
- budování institucí: založit oddělené instituty pro činnosti standardizace (normalizace, metrologie, akreditace)
- zbavit se přílišné závislosti na legální metrologii
- vybudovat sektor fundamentální metrologie (státní etalony – metrologická návaznost) na základě místních potřeb
- posléze se začal budovat systém managementu kvality

DALŠÍ POSTUP OD ZALOŽENÍ

- ❑ v té době se však též objevila nabídka různých **programů technické pomoci** ze strany západoevropských zemí (EU Phare, PSO Holandsko, G24 Švýcarsko)
- ❑ V ČR to bylo orientováno zejména na ČMI (**státní etalony**) a zkušebny (zvláště nákladná zařízení jako laboratoř EMC atd.)
- ❑ my jsme se snažili toho maximálně využít: spolu s národními inv.dotacemi (+ později i zapojení fondu reprodukce tvořeného z odpisů) to vedlo k úplné obměně naší technické infrastruktury
- ❑ od té doby je naší politikou mít k dispozici nejmodernější techniku, která je ve světě k dispozici₅

STRATEGIE MALÉHO NMI – kritická místa

- ❑ v éře globalizace je to pro nové a malé NMI složitá záležitost
- ❑ na rozdíl od mnoha existujících NMI, náš přístup k metrologickým činnostem spočívá v tom, že jde více či méně o činnosti podnikatelského charakteru než cokoliv jiného
- ❑ existuje jakýsi niche trh služeb v metrologii, pro které je NMI nejlépe vybaven – vnitřní ekonomický režim však tomuto přístupu musí odpovídat (neměly by existovat omezení typická pro státní organizace: limit mezd a počtu zaměstnanců)
- ❑ důležitou nutnou podmínkou je, aby správní činnosti v metrologii zajišťovala nějaká jiná organizace než NMI (což naštěstí v ČR tak z historických důvodů je: ÚNMZ versus ČMI), jinak nelze žádné změny dosáhnout !

STRATEGIE MALÉHO NMI – kritická místa

- ❑ **radikálního obratu se mi podařilo dosáhnout v r. 2002, kdy se podařilo prosadit změnu legislativy (ČMI přestal formálně být orgánem státní správy)**
- ❑ **od té doby je vnitřní chod ČMI velmi podobný tomu u soukromé firmy, ovšem s tím, pro zaměstnance příznivým, důsledkem, že výše zisku není hlavní prioritou**
- ❑ **zvýšení mezd, rozsáhlý systém odměn, všichni motivováni k dosahování úspor, schopnost uspokojovat zákazníky**
- ❑ **dlouhodobým důsledkem je, že naše závislost na státním rozpočtu je pouhých 18 % celkových nákladů**
- ❑ **závislost na legální metrologii začala rychle ustupovat, bylo rozvinuto široké spektrum služeb, proniklo se s nimi do zahraničí, rychlý průnik do výzkumu a vývoje v metrologii**

STRATEGIE MALÉHO NMI – kritická místa

- ❑ **komplikace: existuje překryv s privátními kalibračními laboratořemi** – musíme být schopni prokázat, že dotace směřují výhradně do oblastí veřejného zájmu, nepoužívají se k distorzi trhu
- ❑ **další důležitá zkušenost: držet všechny činnosti veřejného zájmu v metrologii v jedné organizaci!**
- ❑ **v Evropě existuje značná duplicita v realizaci některých jednotek měření – závěr diskusí: některé země tvrdě trvají na tom, že expertní znalosti příslušných specialistů nutně potřebují pro poskytování případných konzultací místnímu průmyslu**

SITUACE v roce 2010

- ❑ stále příspěvková organizace zřízená MPO
- ❑ počet zaměstnanců: 342 (z toho 42 % VŠ)
- ❑ Finanční parametry (2009):
 - ❑ obrat: ca 357 mil. Kč ročně
 - ❑ Neinvestiční dotace: 65 mil. Kč (méně než 18 % obratu !)
 - ❑ investiční dotace: 13 mil. Kč
 - ❑ hmotný majetek: 1,1 miliardy Kč v pořizovací hodnotě
 - ❑ legální metrologie (cejchování): kolem 20 % obratu
 - ❑ průměrná měsíční mzda: 40 000 Kč, u VŠ 50 000 Kč

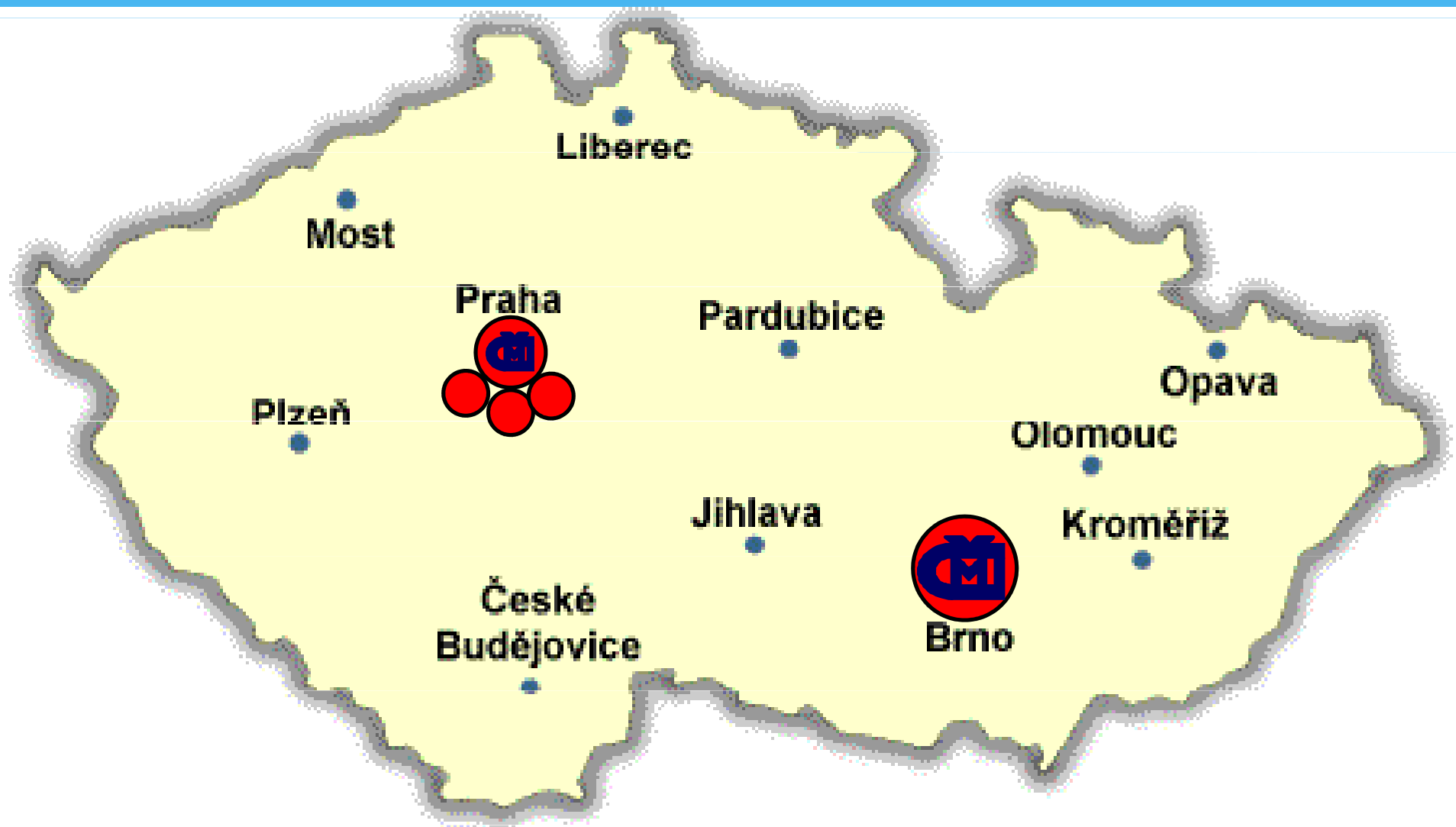
DALŠÍ INFORMACE o ČMI

- ❑ obrat: **82 %** velmi diverzifikovaných služeb
- ❑ zbývajících **18 %**: uchování a rozvoj státních etalonů, výzkum v metrologii (nyní prudký nárůst – program EU EMRP, až 50 mil. Kč v nových příjmech)
- ❑ ověřování v klasické oblasti měř a vah, kde má ČMI stále monopol, tvoří ca 20 % obratu
- ❑ organizační struktura: sídlo organizace je Brno, 14 vnitřních organizačních jednotek, z toho 4 v Praze
- ❑ ČMI krizi v r. 2009 poměrně snadno překonal

VIZE CÍLOVÉHO STAVU

- rozvinout ČMI do (minimálně) regionálního poskytovatele komplexních metrologických služeb na nejvyšší úrovních metrologické návaznosti
- maximálně se zapojit do výzkumu a vývoje v metrologii, zejména v evropském kontextu na principech ERA přes EURAMET e.V. (program EMRP)
- základní přístup k činnostem posuzování shody: nutnost snažit se maximálně uspokojovat požadavky zákazníků s výjimkou rozhodnutí o shodě
- získat maximum outsourcinkových partnerů v ČR, proniknout se službami do zahraničí (od NMI soustředěných jen na výzkum)

GEOGRAFICKÉ ROZMÍSTĚNÍ VOJ ČMI

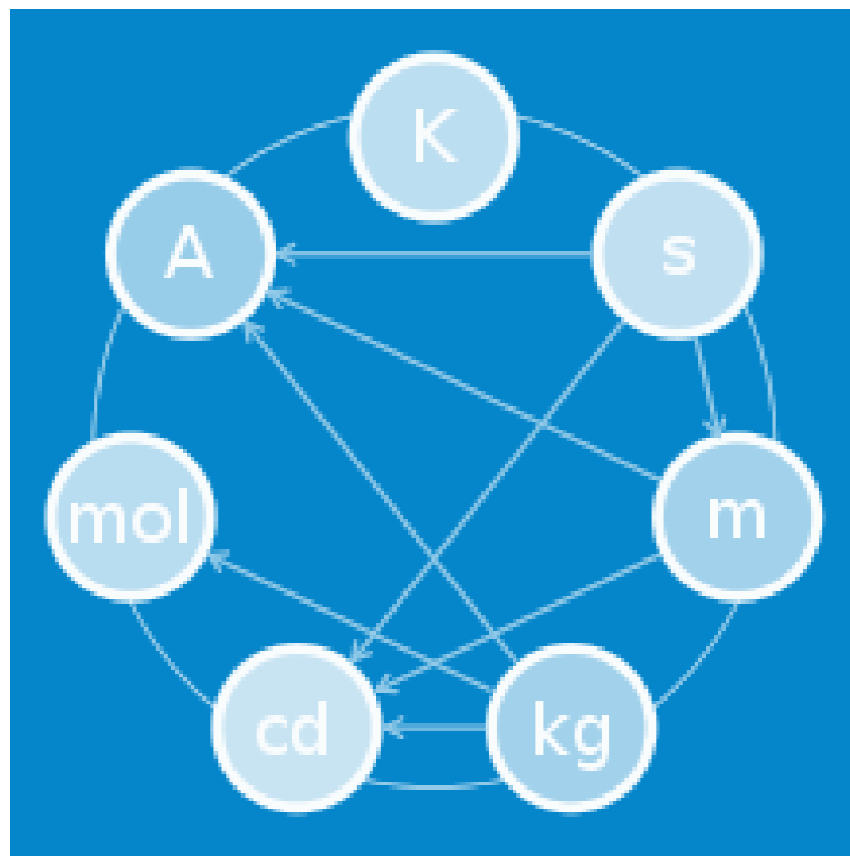


SOUČASNÝ STAV - benchmarking

- ❑ současná pozice v **EMRP**: spolu se Španělskem na **8. – 9. místě** z 22 členských zemí EU, které se programu účastní
- ❑ současná pozice v počtu registrovaných kalibračních a měřících schopností (CMC) v databázi ujednání **CIPM MRA**: celkem 471, což představuje **6. místo v Evropě** (za 4 největšími zeměmi a Holandskem)

PŘÍKLAD I: ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VÝZKUM V METROLOGII

SI



PROČ MĚNIT SOUSTAVU SI

- ❑ **Kilogram je stále definován pomocí materiálového artefaktu (IPK – International Prototype of Kilogram)**
- ❑ **Tento artefakt nemůže být absolutně stabilní – drift**
- ❑ **Změna u hmotnosti ovlivní též elektrické jednotky, mol a kandelu**
- ❑ **CGPM doporučila v r. 1999 dosáhnout pokroku v experimentech zaměřených na vazbu jednotky hmotnosti na fundamentální přírodní konstanty – začátek procesu redefinice**
- ❑ **CIPM navrhl CGPM 2011 usnesení k budoucí revizi SI**

NAVRŽENÉ ZMĚNY

- **Záměrem CIPM je vyjádřit definice všech 7 základních jednotek SI jednotným způsobem použitím v tzv. „tvaru s explicitní konstantou“ (na rozdíl od tvaru s explicitní definicí jednotky), ve kterém je „jednotka definována nepřímo stanovením přesné hodnoty všeobecně uznávané fundamentální konstanty,,.**
- **Příkladem je současná definice jednotky délky metr s rychlostí světla ve vakuu c jako přesně stanovenou fundamentální konstantou.**

NAVRŽENÉ ZMĚNY

- * **▣ fyzika je zatím postavena na faktu, že fundamentální konstanty jsou skutečné invarianty přírody (s nulovou nejistotou)**
- ▣ představme si ji ve tvaru: $Q = \{Q\}[Q]$ jako součin čísla $\{Q\}$ a jednotky $[Q]$**
- ▣ zdefinujeme-li jednotku $[Q]$ nezávisle, pomocí hodnoty nějaké vybrané referenční veličiny, musíme experimentem určit číslo $\{Q\} \rightarrow$ to ale pak bude zatíženo experimentální nejistotou**

KILOGRAM



PROBLÉMY S UCHOVÁVÁNÍM JEDNOTKY HMOTNOSTI JAKO ARTEFAKTU

- * **▣ IPK je z. r.1880, jde o artefakty:
90% Pt/10% Ir, ČMI – kopie č. 67**
- ▣ hustota austenitické oceli $\sim 8 \text{ g/cm}^3$, slitina Pt/Ir přes $21 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ korekce na vztlak**
- ▣ nestabilita (drift) $0,5 \mu\text{g} / \text{rok} \rightarrow$ příliš vysoká pro odvození ampéru přes proudové váhy**
- ▣ tzv. “hubnutí“ mezinárodního prototypu kilogramu**

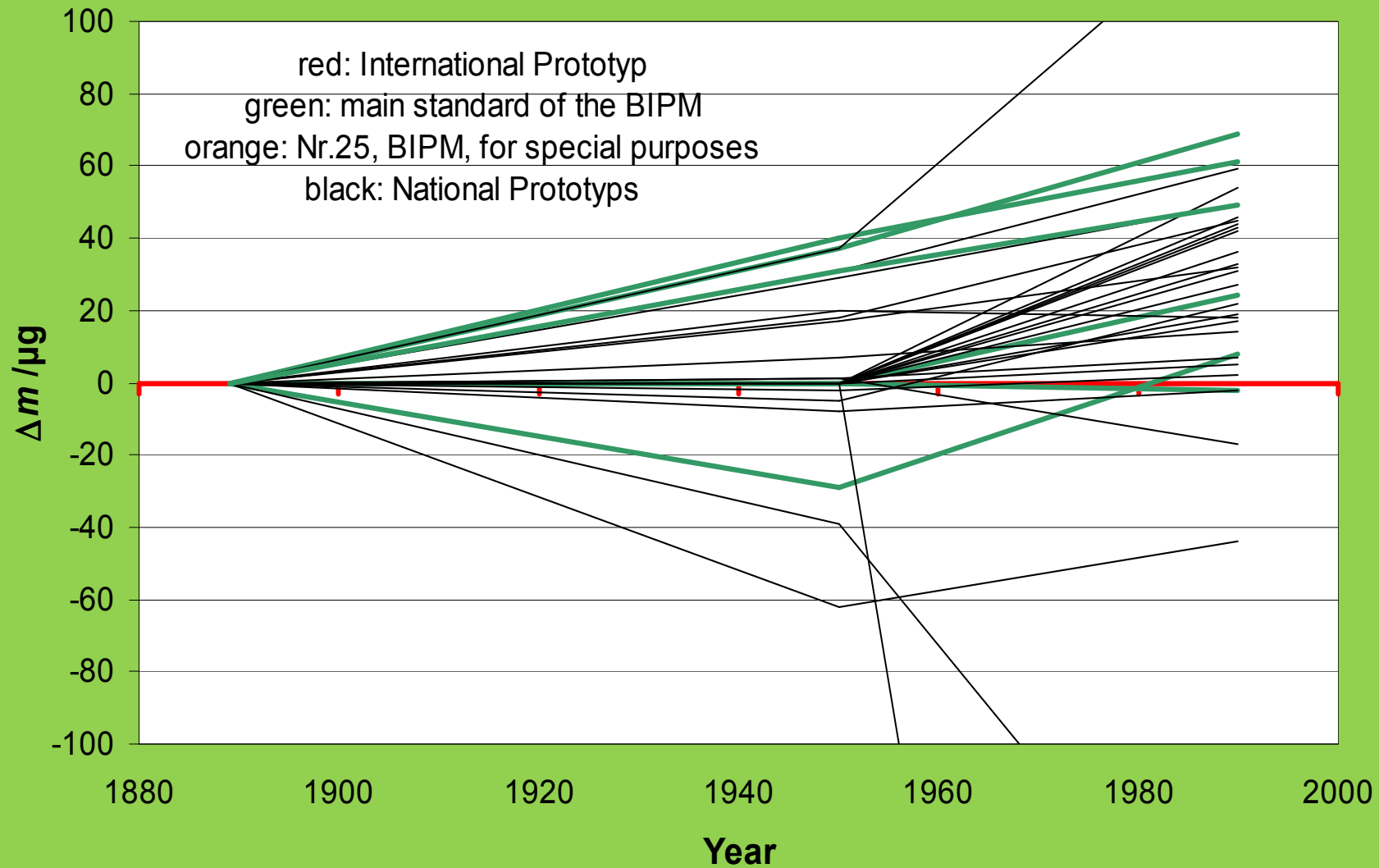
KILOGRAM

- ▣ **Jak redefinovat kilogram ?**
- ▣ **Kde tady vzít fundamentální konstantu ?**



KILOGRAM

Mass of Prototypes in 1889, 1950 and 1990



EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PLANCKOVY / AVOGADROVY KONSTANTY

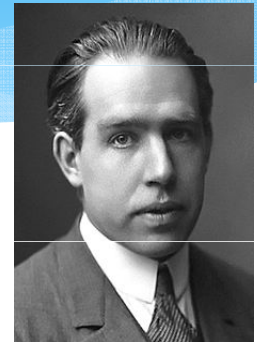
- ✦ **Niels BOHR** odvodil pro Rydbergovu konstantu R_∞ vztah:

$$\frac{h}{m_e} = \frac{\alpha^2 c}{2R_\infty}$$

- ✦ Ize ji přepsat takto:

$$hN_A = \frac{\alpha^2 c M_p}{2R_\infty \left(\frac{m_p}{m_e}\right)}$$

- ✦ předchozí rovnice vytváří **v současné SI** exaktní vztah mezi těmi 2 veličinami na levé straně, protože všechny veličiny na pravé straně jsou známy buď exaktně nebo s relativní nejistotou lepší než $1 \cdot 10^{-9}$



EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PLANCKOVY / AVOGADROVY KONSTANTY

Konstanta jemné struktury α : teorie kvantové elektrodynamiky (QED) dává návod, jak ji změřit přímo pomocí kvantového Hallova jevu (musí být určena experimentálně – teorie neposkytuje její hodnotu)

- nyní stanovena s relativní standardní nejistotou $0,32 \cdot 10^{-9}$
- zavedena Sommerfeldem v r. 1916 při snaze určit relativistické korekce do Bohrova modelu atomu
- fyzikální interpretace: poměr rychlosti elektronu na nejnižším orbitu Bohrova modelu atomu k rychlosti světla ve vakuu
- odjakživa fascinovala teoretické fyziky (odkud se vzala?)

EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PLANCKOVY / AVOGADROVY KONSTANTY

Rydbergova konstanta R_∞ : vztah pro ni odvozen Bohrem na základě kvantové fyziky (původně stanovena číselně Rydbergem empiricky)

- v současné době nejlépe stanovena fyzikální konstanta s rel.nejistotou lepší než $7 \cdot 10^{-12}$
- je definována spektrem, které by měl vodíkový atom, kdyby jeho jádro mělo nekonečnou hmotnost, kdyby neexistovalo jemné rozštěpení atd.
- nelze ho tedy přímo měřit s vysokou přesností jen z frekvencí přechodů v atomu vodíku – odvozuje se z měření na 3 různých atomech (vodík, deuterium, helium) + korekce z QED na konečnou hmotnost jádra atd.

EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PLANCKOVY / AVOGADROVY KONSTANTY

***Existují 2 nezávislé metody stanovení h
v současné SI:**

- ▣ **počítání atomů (Si – X-ray Crystal Density Method, XRCD), International Avogadro Consortium** – stanovuje se vlastně N_A , ale h lze z toho vypočítat z rovnice na předchozím slidu
- ▣ **tzv. wattové váhy [(NPL), NIST, METAS, LNE, BIPM, NIM, NRC]** – stanovuje se přímo h

WATTOVÉ VÁHY

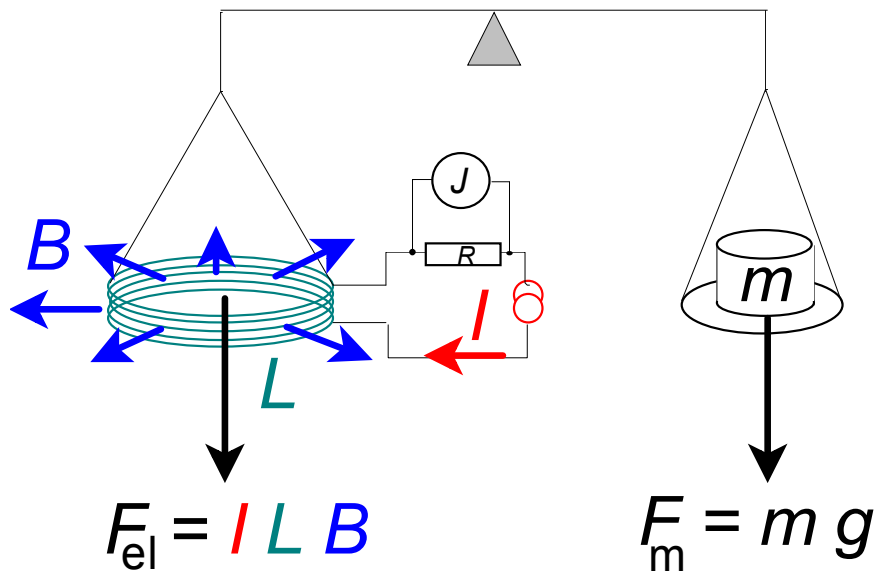
WATTOVÉ VÁHY – návrh Bryan Kibble, NPL (1976)

- vytvoření vazby na Planckovu konstantu
- výhoda: geometrie cívky a magnetický indukční tok nemusí být známy
- vyjadřuje hmotnost přes metr, sekundu a Planckovu konstantu
- experiment probíhá ve 2 fázích
- $UI = mgv$
- součin UI – je tzv. virtuální výkon (každá z veličin je z jiné části toho experimentu)
- výsledný vztah: $f_1 f_2 h \sim m g v$

PRINCIP WATTOVÉ VÁHY I.

Phase 1: static experiment

Weight of a test mass is compared with the force on a coil in a magnetic field.



$$m g = -I \frac{d\Phi}{dz}$$

In a radial magnetic field, this can be simplified to

$$m g = I L B$$

current

wire length

flux density

PRINCIP WATTOVÉ VÁHY II.

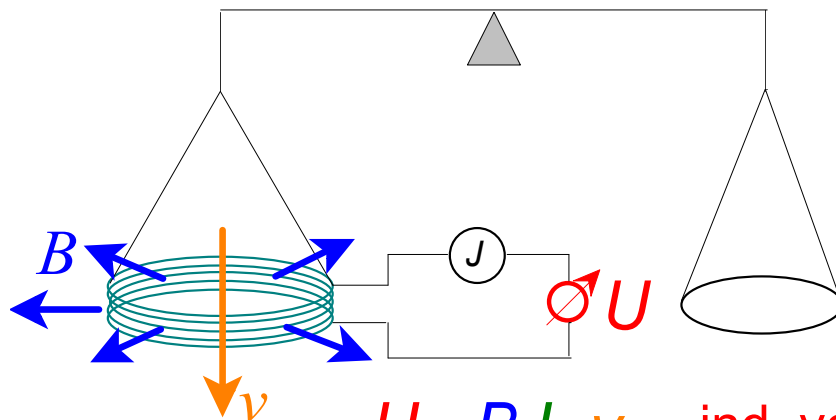
Phase 2: dynamic experiment

Coil is moved through the magnetic field and a voltage is induced.

$$U = -v \frac{d\Phi}{dz}$$

In a radial magnetic field, this can be simplified to

$$U = B L v$$



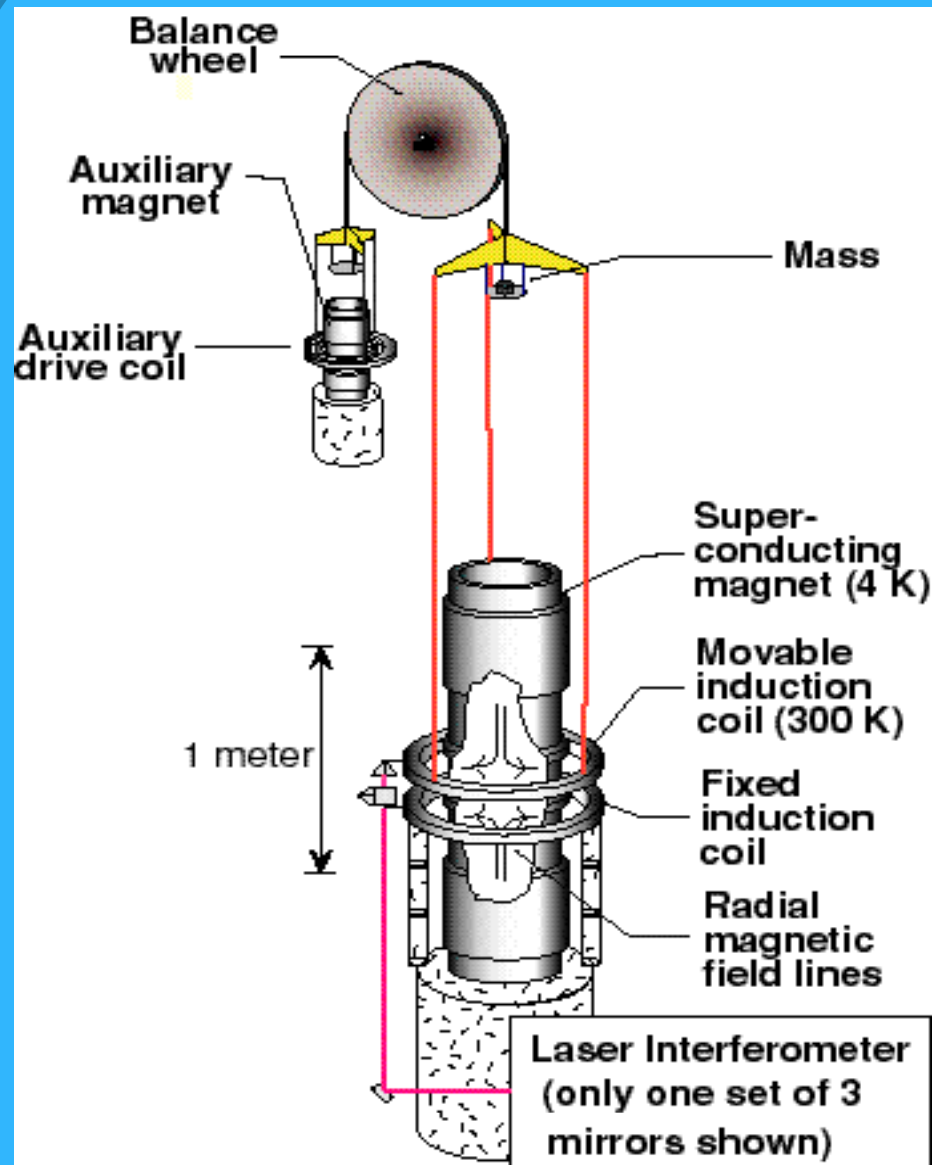
$$U = B L v \quad \text{ind. voltage}$$

flux density

wire length

velocity

WATTOVÉ VÁHY



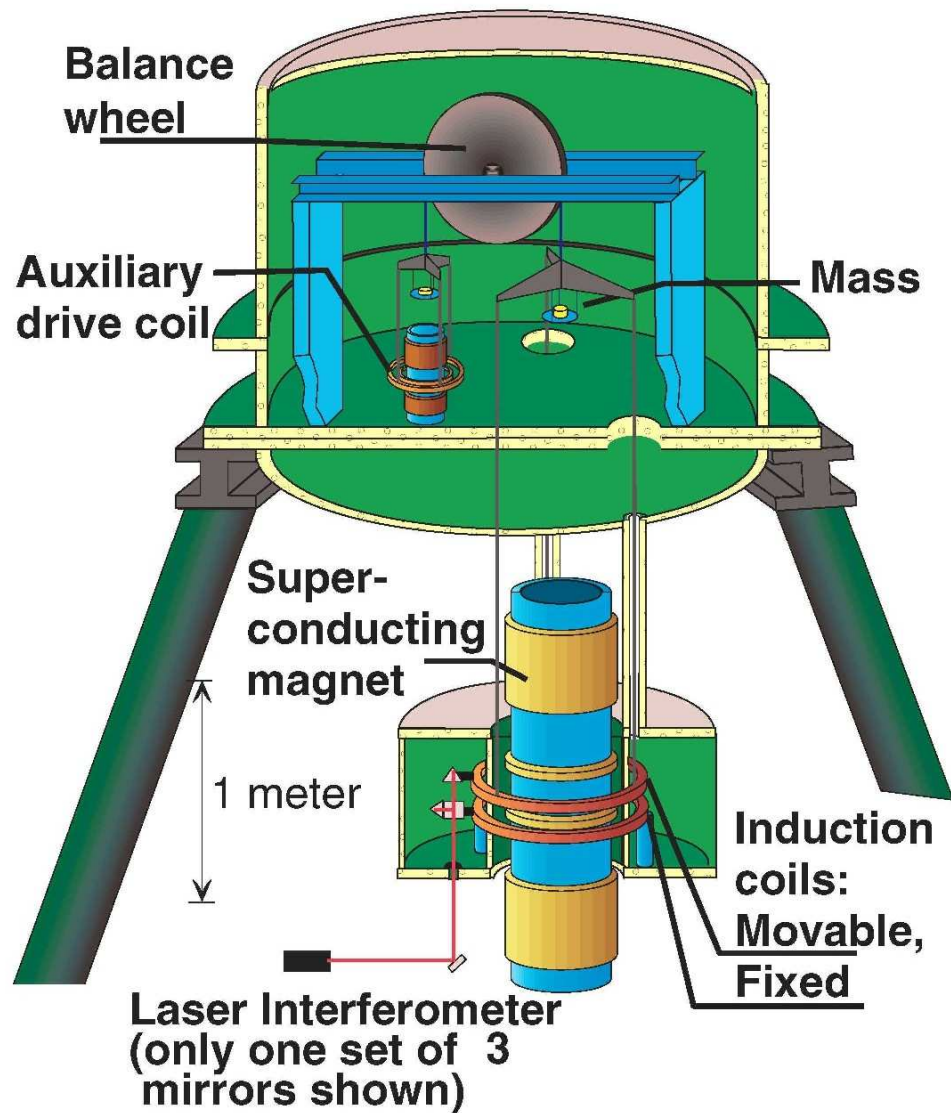
$$m \cdot g \cdot v = \frac{h}{4} K_{J-90}^2 \cdot R_{K-90} \cdot U \cdot I$$

$$h = 6.626\,068\,91(24) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$u = 3.5 \times 10^{-8}$$

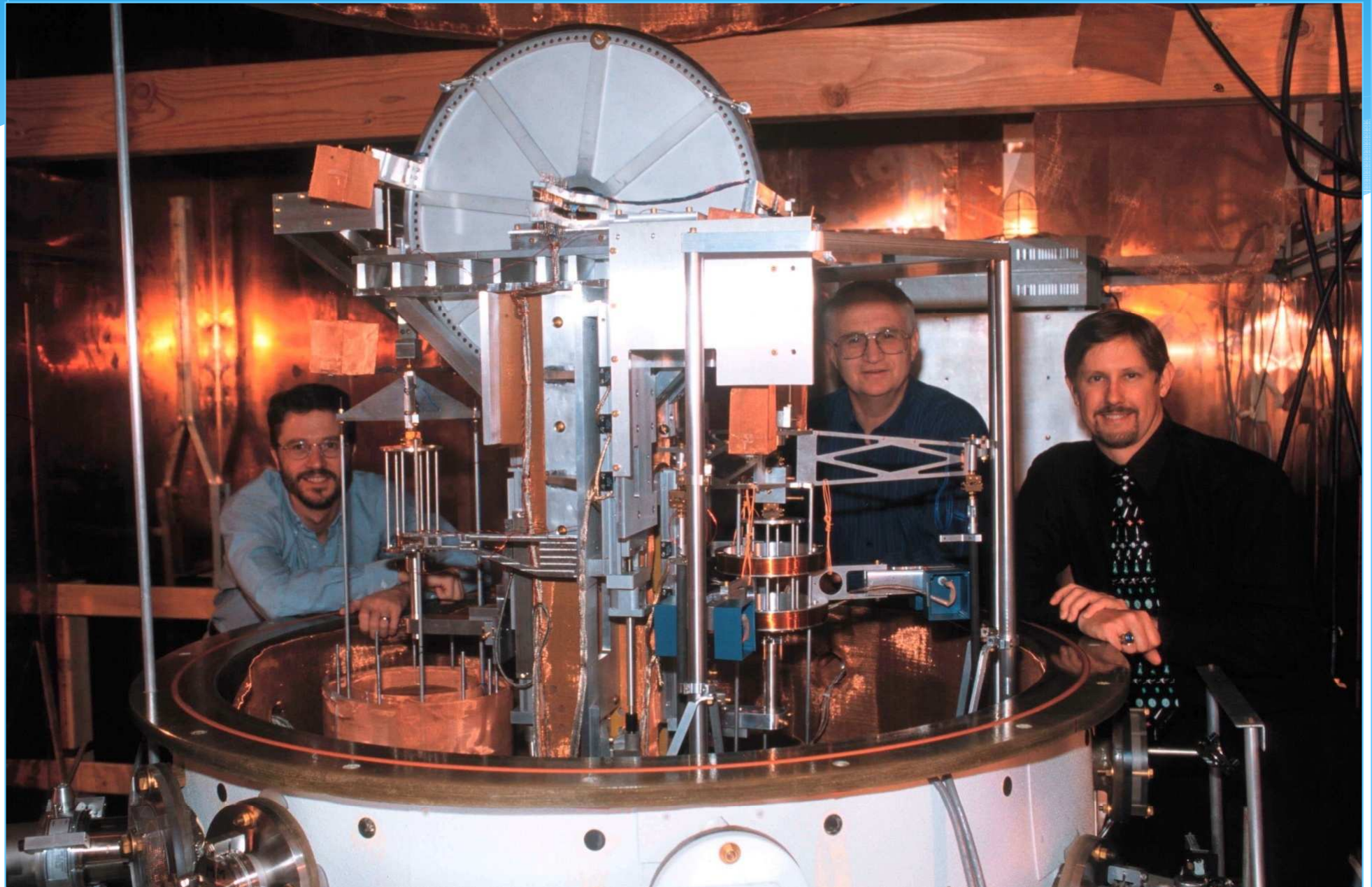
R.L. Steiner et al, IEEE IM 56, 592, 2007

WATTOVÉ VÁHY

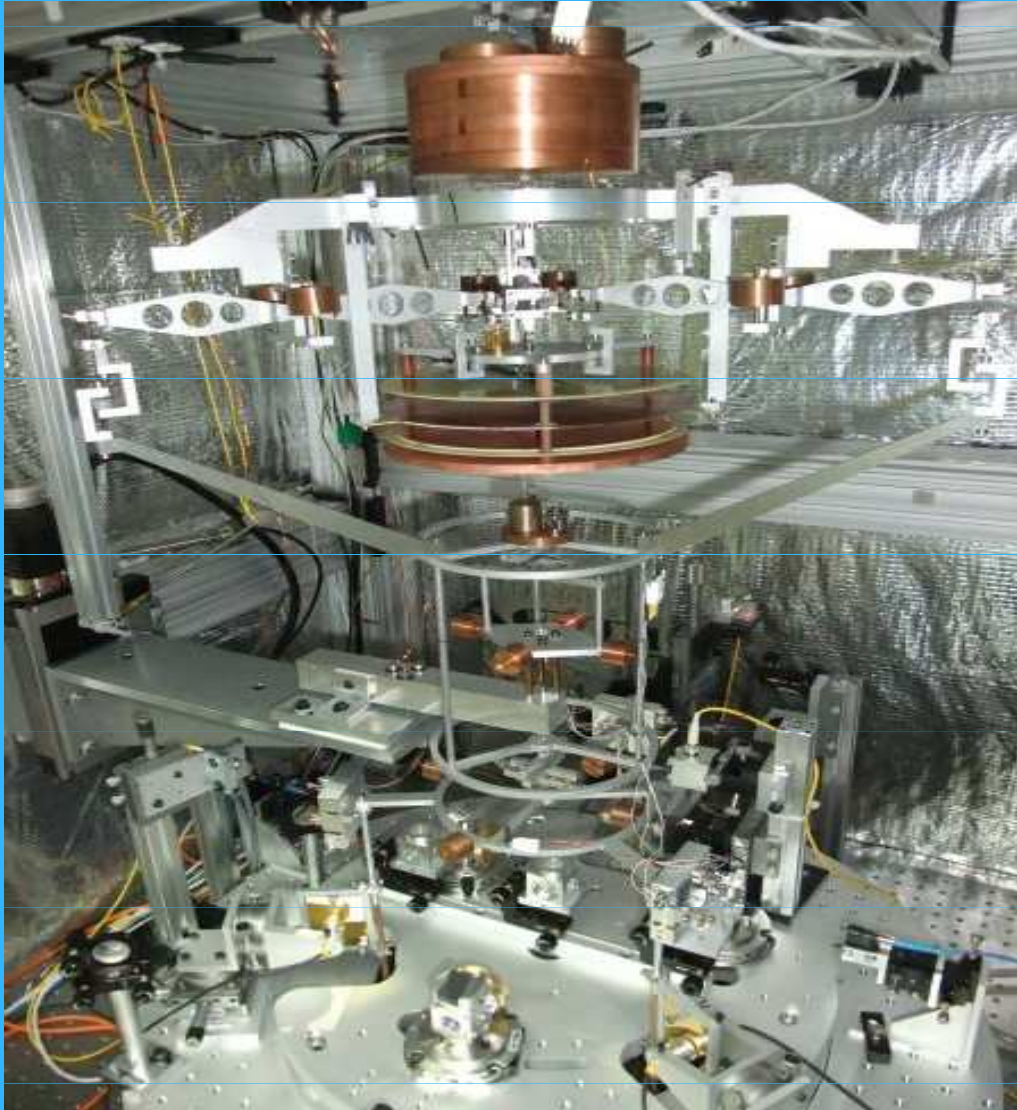


**Wattové váhy,
NIST, USA**

WATTOVÉ VÁHY

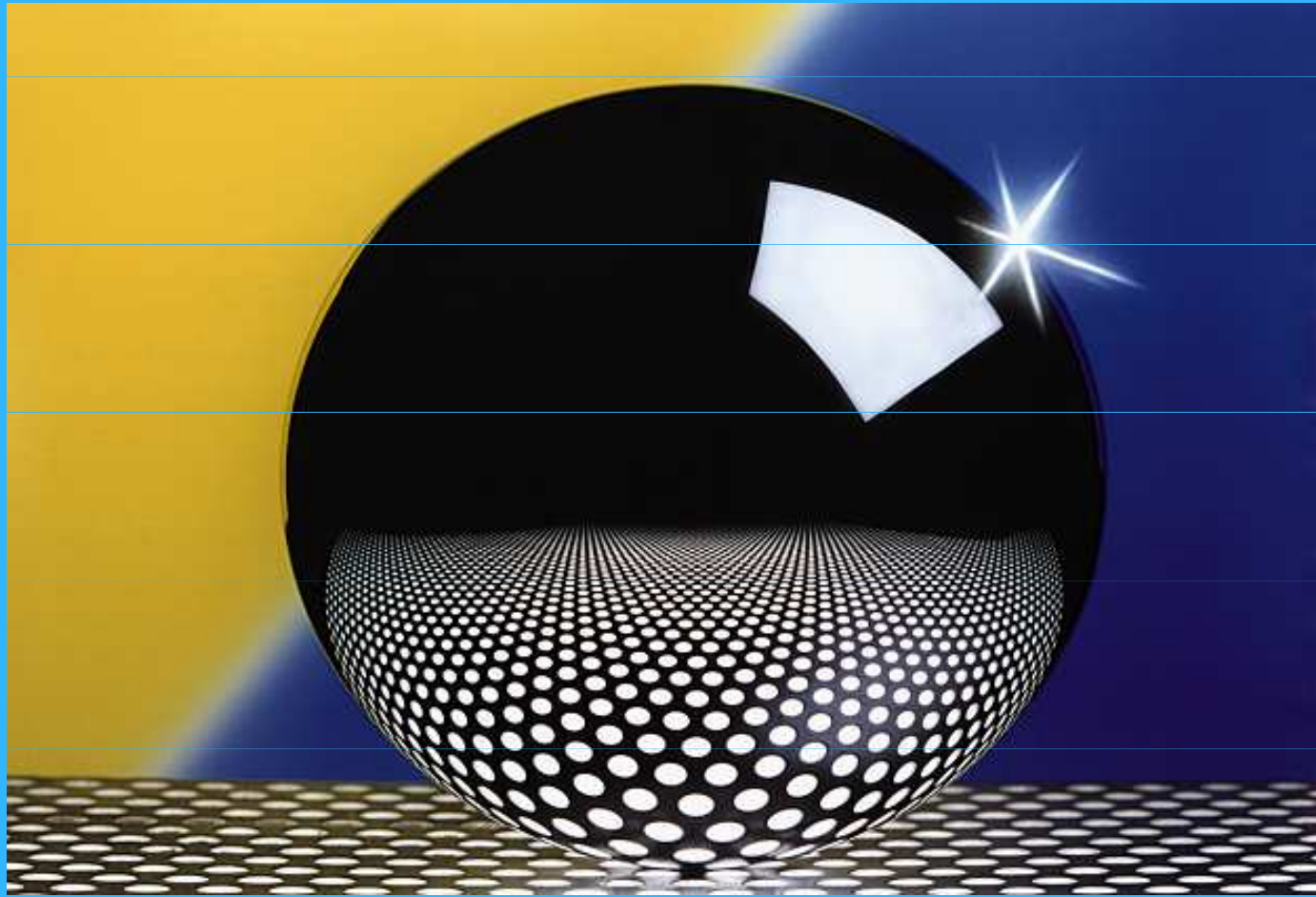


WATTOVÉ VÁHY



**Wattové váhy
budované v BIPM**

EXPERIMENT AVOGADRO



EXPERIMENT AVOGADRO

* **Základní idea:** v monoizotopickém, chemicky čistém monokrystalu křemíku bez poruch platí:
makroskopická hustota = mikroskopická hustota

▣ **platí tedy vztah:**

$$N_A = \frac{nV_{mol}}{a^3} = \frac{nM}{\rho_0 a^3},$$

kde $n = 8$ je počet atomů v základní buňce, V_{mol} je molární objem, a^3 je objem základní buňky, M je molární hmotnost a ρ_0 je hustota

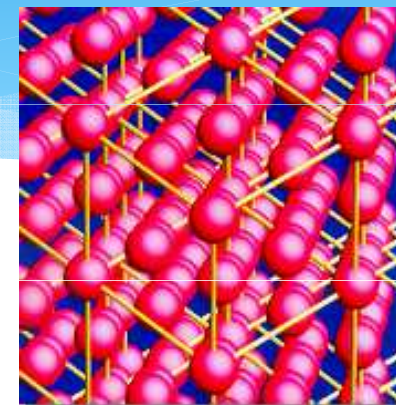
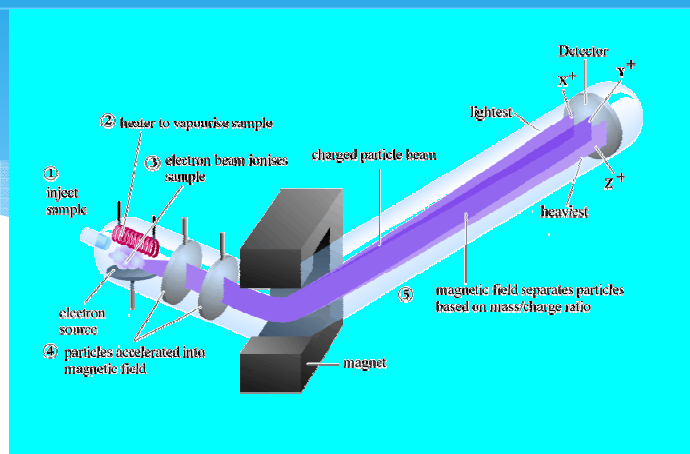
▣ **pro výpočet Planckovy konstanty se pak použije výše uvedený vztah daný fundamentální fyzikou**

MĚŘENÍ AVOGADROVY KONSTANTY



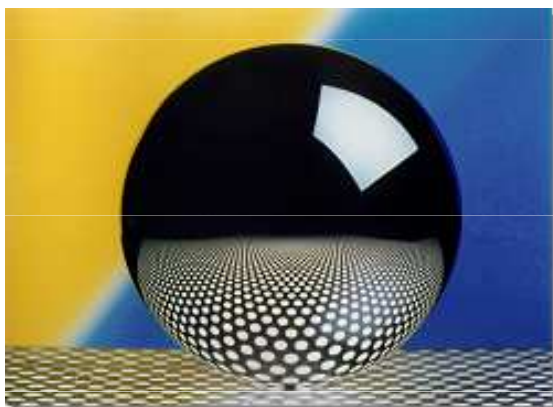
křemík

**molární
hmotnost**

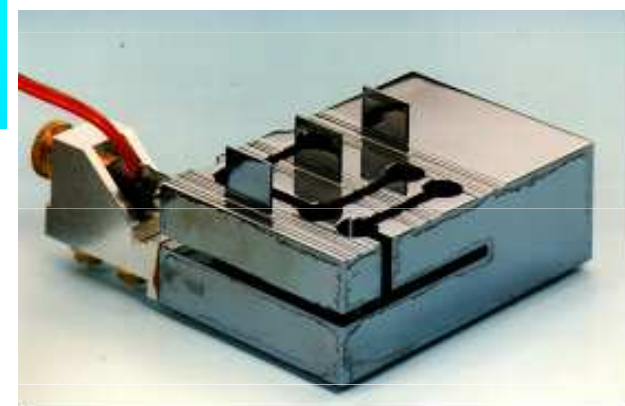


monokrystal

$$N_A = \frac{n \cdot M_{\text{mol}}}{\rho \cdot a^3}$$



hustota



mřížková konstanta

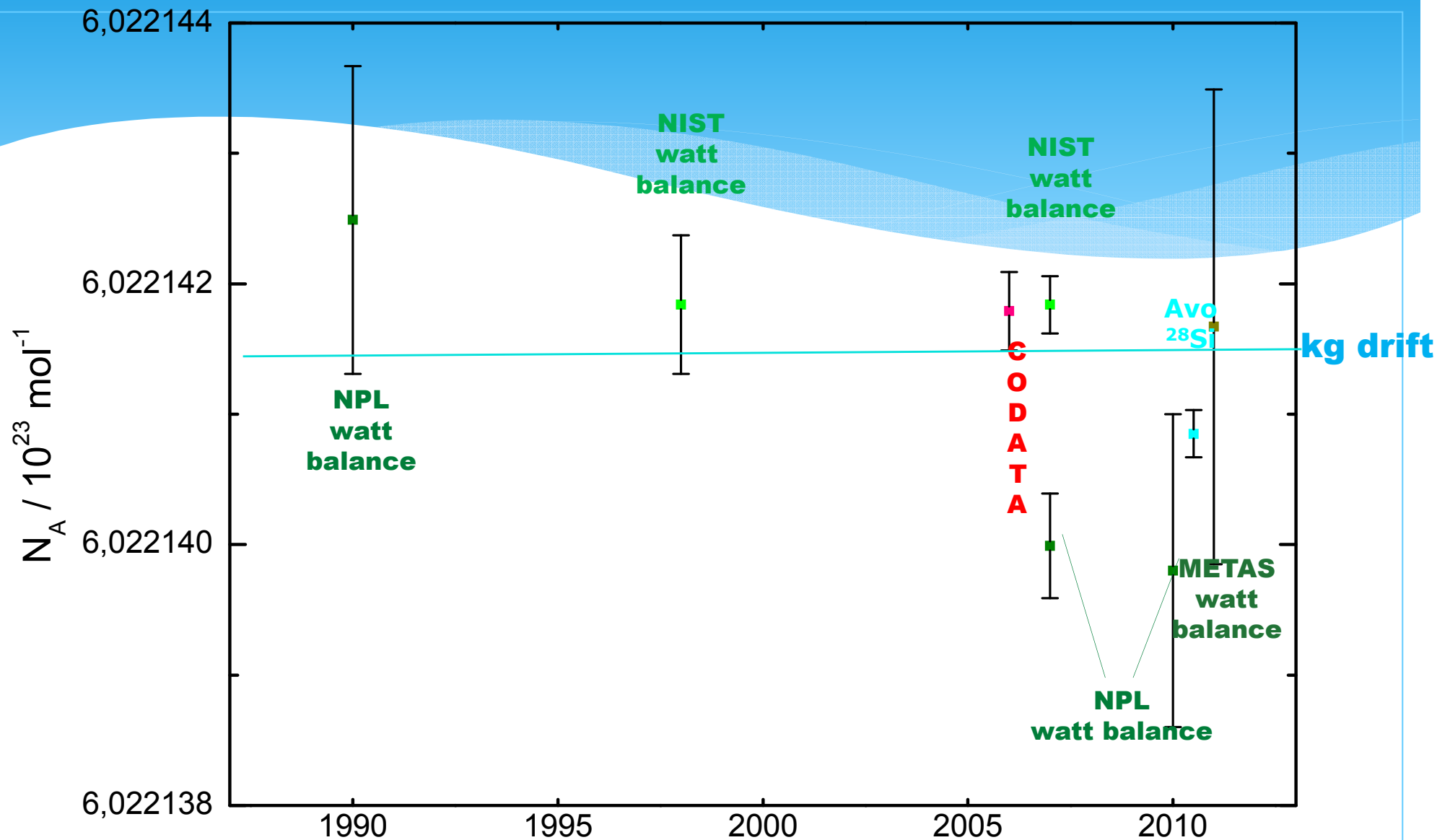
EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PLANCKOVY / AVOGADROVY KONSTANTY



- ▣ monokrystal 5 kg
- ▣ z něj vyrobeny 2 koule: 229 mm, 367 mm + 5 cm-ový krystal XINT pro měření mřížkové konstanty

**Courtesy of the Leibniz-
Institute of Crystal Growth
in Berlin**

MĚŘENÍ AVOGADROVY KONSTANTY



Metrologia 48, No. 2, special issue „International determination of the Avogadro constant“ (2011)

DŮSLEDEK



**Hmotnost
mezinárodního
prototypu kilogramu
(nebo mezinárodního
skupinového etalonu)
tak získá (nenulovou)
relativní směrodatnou
nejistotu řádu $2 \cdot 10^{-8}$**

PŘÍKLAD II: APLIKOVANÝ FYZIKÁLNÍ VÝZKUM



APLIKOVANÝ FYZIKÁLNÍ VÝZKUM

- **v důsledku nedávné vlny přímých zahraničních investic se ČR stala rájem automobilového průmyslu: ČR a sousední Slovensko jsou v počtech vyrobených aut na hlavu na prvních 2 místech v Evropě**
- **požadavky norem systémů managementu kvality (zejména ISO/TS 16949) vytvářejí velkou poptávku po různých metrologických službách**

MĚŘENÍ NETĚSNOSTÍ:

- fyzikálně jde o velmi malé proudění plynu na hranici s malým průtokem
- aplikace měření netěsností:
 - chemický průmysl
 - automobilový průmysl
 - potravinářský průmysl
 - polovodičový průmysl
 - vakuový průmysl
 - kontejnerové ukládání vyhořelého jaderného paliva
 - výroba srdečních stimulátorů

APLIKOVANÝ FYZIKÁLNÍ VÝZKUM

APLIKACE V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU:

- brzdové okruhy nejsou docela překvapivě nejkritičtějšími měřeními z hlediska přesnosti (přeci jen těsnost kapalných systémů není tak kritická)
- avšak těsnost klimatizačních jednotek vyžaduje přesnost měření netěsností ca 10^{-4} sccs (standartní kubický centimetr za sekundu)
- požadovaný rozsah netěsnosti je přitom velmi malý: vyšší hodnoty by vedly k snížení celkové provozní doby a výkonu, nižší hodnoty (tj. lepší těsnost) by měla za následek vyšší hmotnost jednotky (vyšší náklady, problémy u crash-testů apod.)

APLIKACE V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU:

- kalibrace měřidel přímo v provozu je tedy třeba dělat s přesností lepší než 10 %, přičemž nejlepší primární etalony ve světě mají specifikaci 1 – 3 %
- pro zajištění toho požadavku ČMI spolu s Karlovou univerzitou Praha vyvinul 2 etalony netěsností pokrývající 2 rozdílné rozsahy s měřicí schopností 1 % z měřené hodnoty (to bude třeba ještě potvrdit mezinárodním porovnáním)

APLIKOVANÝ FYZIKÁLNÍ VÝZKUM



PŘÍKLAD III: SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE



SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE

Diferenciální tlak za vysokých statických tlaků:

- tyto převodníky tlaku (DPT) hrají kritickou roli v přesných měřeních průtoku kapalin, statický tlak je dán transportním tlakem v produktovodech (10, max. 20 MPa)
- zde jsou v sázce obrovské finanční částky → DPT jsou tedy předmětem intenzivního výzkumu (3x lepší přesnost za 10 let)

SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE

Diferenciální tlak za vysokých statických tlaků:

- kalibrace je však nutné provádět za skutečných provozních podmínek, zejména za požadovaného statického tlaku
- hlavní omezení (donesávna): max. statický tlak ca 35 MPa
- nová výzva: pro vytěžení ložisek uložených hlouběji pod povrchem moře z ropných plošin je nutné pracovat při statických tlacích 100 MPa či dokonce 120 MPa (3 000 m pod hladinou moře), cílová přesnost 0,1 %

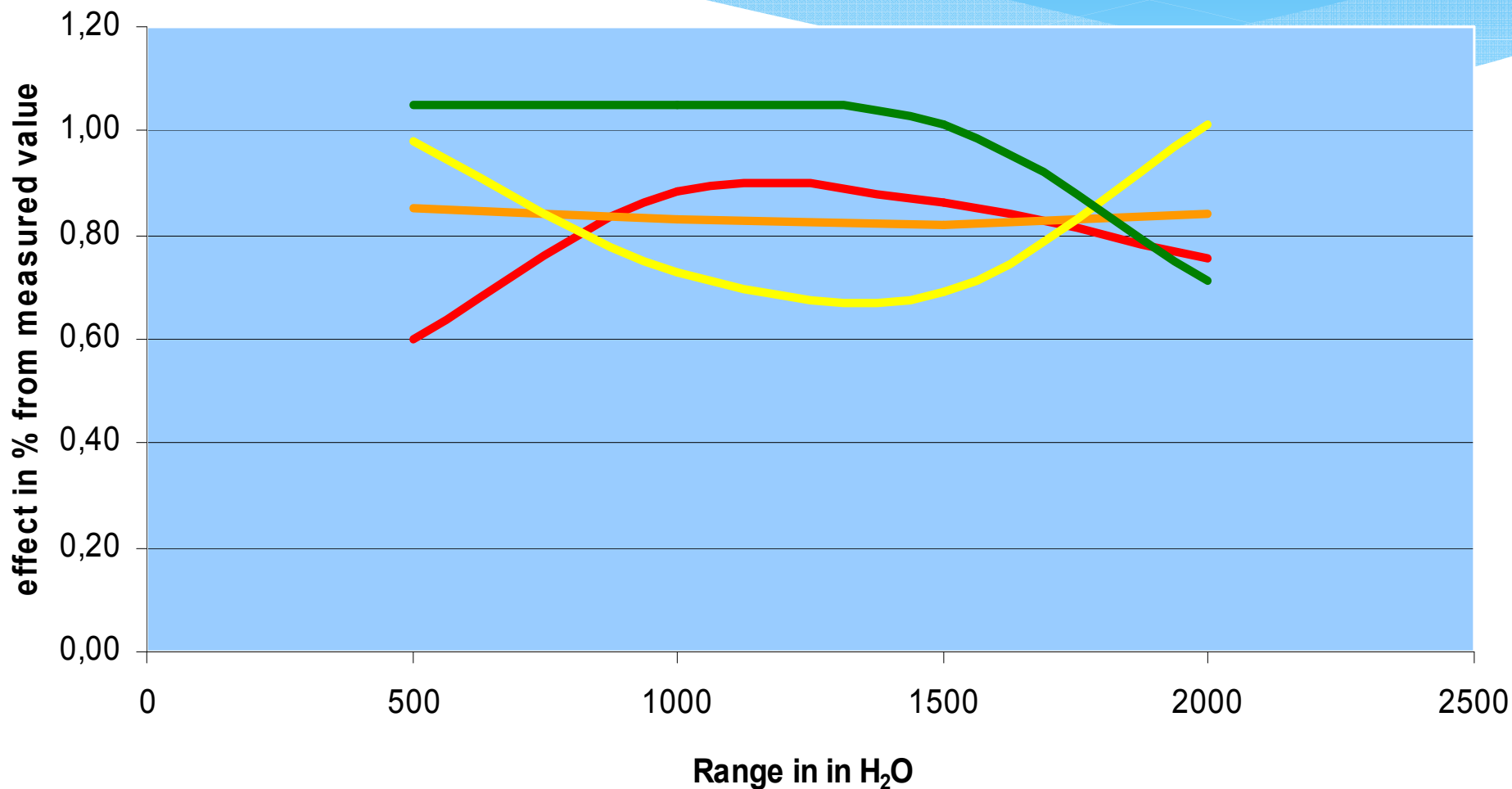
SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE

Diferenciální tlak za vysokých statických tlaků:

- přesná měření zde slouží ke 2 cílům:
 - stanovit množství (100 kPa)
 - řízení technologie těžby – separaci písku, vody, plynu a surové ropy (500 kPa)
- za tak vysokých tlaků není technologie výroby těchto čidel dostatečně reprodukovatelná → vznikají chyby až 1 % v důsledku závislosti na statickém tlaku kolem bodu 100 MPa

SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE

Static pressure effect at 15 000 PSI
(4 pieces of identical type transducer)



SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE

Diferenciální tlak za vysokých statických tlaků:

- ČMI si vybudoval kalibrační systém s CMC lepšími než 0,05 % až do 100 MPa statického tlaku
- francouzský výrobce nové generace DPT až do 100 MPa se po určitých zkouškách rozhodl, že bude využívat ČMI pro tyto náročné kalibrace
- DPT jedinečné konstrukce z Japonska jsou vyráběny ve Francii jsou tedy prvotně kalibrovány v ČR, aby pak byly umístěny na ropné plošiny v Norsku (v Norském moři)

SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE



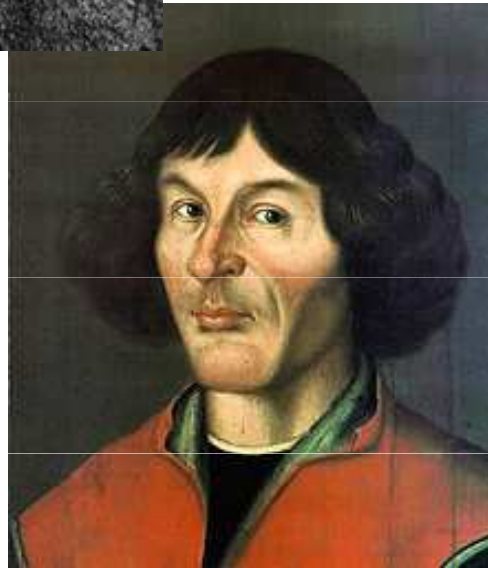
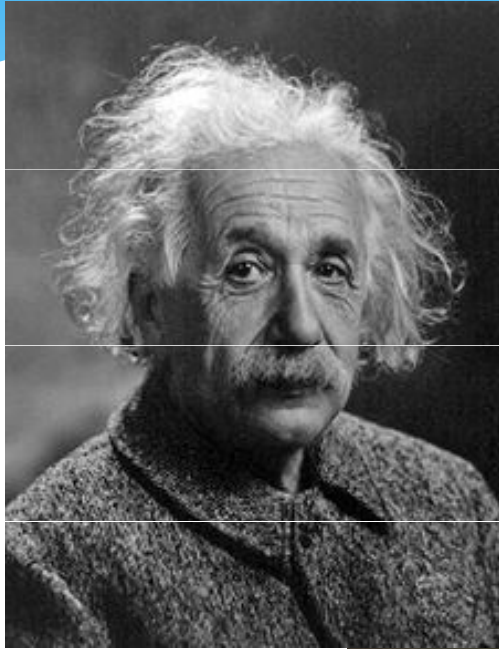
SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE



SOFISTIKOVANÁ KALIBRACE



FYZIKOVÉ V ČMI



FYZIKOVÉ V ČMI

- ❑ v současné době je v ČMI zaměstnáno 29 fyziků
- ❑ několik jich je z pedagogických fakult, většina jsou fyzikové pevné fáze a jaderní fyzikové
- ❑ tvoří 50 % statutárních zástupců organizace
- ❑ **Požadavky z pohledu ČMI:**
 - ❑ měli by být ze státní univerzity
 - ❑ slabinou (po 20 letech svobody překvapivou) bývá znalost anglického jazyka (bohužel však i českého!)
 - ❑ předpokládá se u nich velmi dobrá adaptabilita na konkrétní problematiku organizace a dobré základy matematiky

VÝZVY A HROZBY PRO ČMI

- ❑ **případná privatizace, např. i formou státem vlastněné a.s.**
- ❑ **zabezpečení zdrojů veřejných financí pro výzkum a vývoj v metrologii (přes zapojení do evropského programu EMRP v podstatě vyřešeno)**
- ❑ **uhájení monopolu v ověřování některých stanovených měřidel (váhy, výdejní stojany, taxametry)**
- ❑ **současný nekontrolovaný rozmach, až agresivita některých v.v.i., kterým žene (krátkodobý) vítr do plachet zvýhodněné podmínky a neřízená podpora z evropských fondů**

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST!



www.cmi.cz

pklenovsky@cmi.cz

