



# REDEFINICIJA KILOGRAMA

Dr. Sc. Mladen Bezjak, dipl.ing.

14. Konferencija o mjeriteljstvu i akreditaciji  
Zagreb, 28. svibnja 2019.



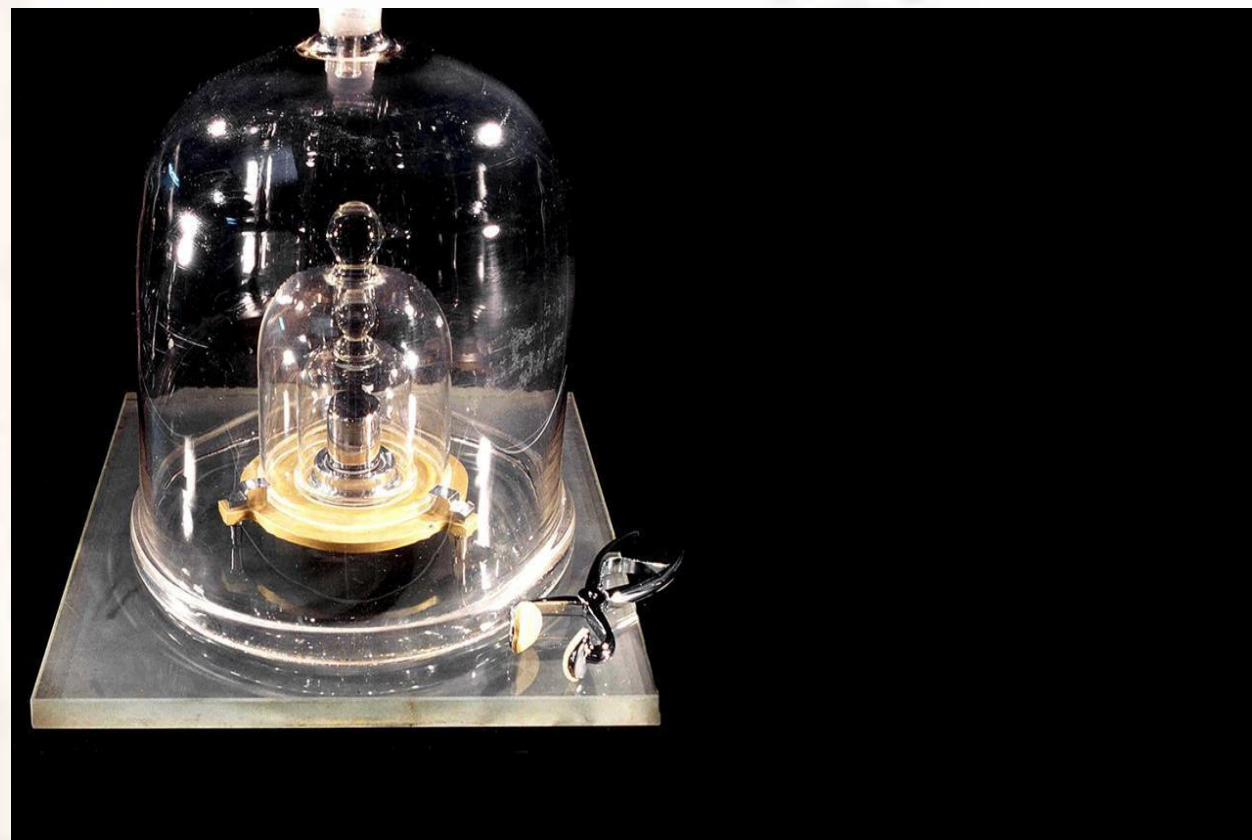
# REDEFINICIJA KILOGRAMA

PROTOTIP  
AVOGADRO PROJEKT  
KIBBLE-OVA VAGA  
NOVA DEFINICIJA  
UTJECAJ NA KORISNIKE

# PROTOTIP

1 kg je masa međunarodne pramjere (etalona) koja se čuva u međunarodnom uredu za mjere i utege (BIPM) u Sévresu.

- Odobren 1889. / CGPM
- 90 % Pt + 10 % Ir
- Valjak,  $l = \phi = 39$  mm
- > 100 kopija



Izvor: BIPM

# PROTOTIP

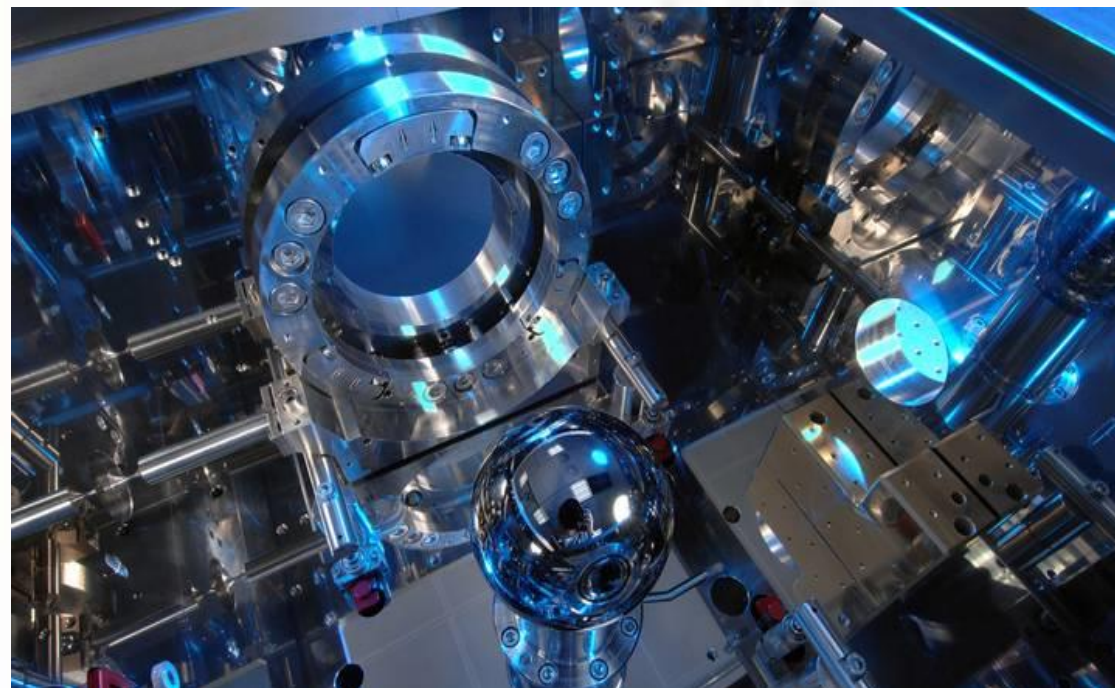
- $\Delta m \cong 50 \mu\text{g} / 100 \text{ god.}$  - Potreba redefinicije kg
- Planckova konstanta,  $h = 6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
- Zašto tek sad ?
- Dva različita i neovisna pristupa:
  - Avogadro project
  - Kibble-ova vaga

Množenjem mase jednog atoma izotopa  $^{28}\text{Si}$  s ukupnim brojem atoma u kugli, dobiti će se masa kugle.

- Kugla od kristala izotopa  $^{28}\text{Si}$  visoke čistoće (XRCD metoda).
- Sastoji se od homogene i čiste jezgre i tankog površinskog sloja oksida,  $d \approx 2$  nm i mase  $m_{\text{SL}}$

$$m_{\text{kugle}} = m_{\text{jezgre}} - m_{\text{deficit}} + m_{\text{SL}} \quad (1)$$

- $m_{\text{deficit}}$  ..... utjecaj nečistoće kristala Si na masu jezgre. Glavne nečistoće u kristalima  $^{28}\text{Si}$  su: C, O i N. Njihove koncentracije se mjere infracrvenom apsorpcijskom spektroskopijom.



Izvor: PTB

# AVOGADRO PROJEKT

$$m_{\text{jezgre}} = N \cdot m(28\text{Si}) \quad (2)$$

$$N = \frac{8V_{\text{jezgre}}}{a^3} \quad (3)$$

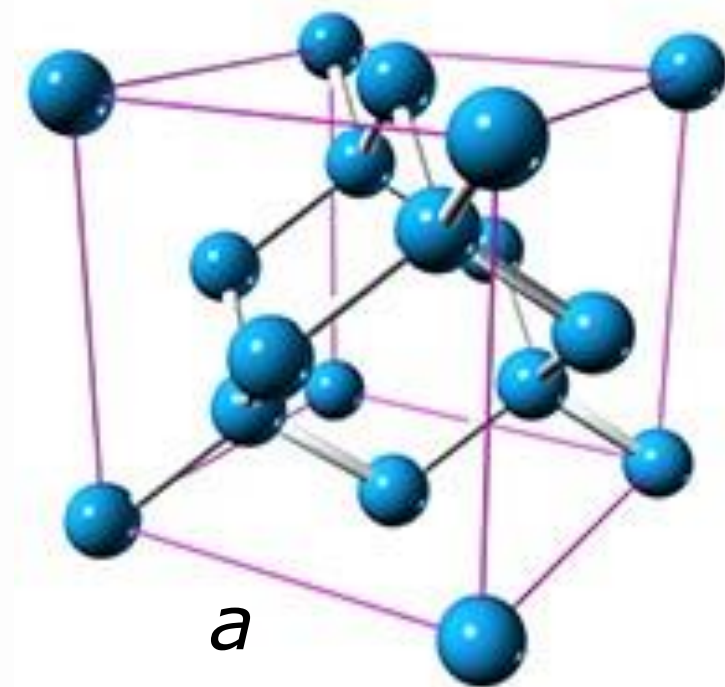
- Mjerenje parametra kristalne rešetke,  $a$

- Mjerenje promjera jezgre kugle,  $D_{\text{jezgre}}$

$$V_{\text{jezgre}} = \frac{\pi}{6} D_{\text{jezgre}}^3$$

$$m(^{28}\text{Si}) = \frac{M(^{28}\text{Si})}{N_A} \quad (4)$$

$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  .... Određuje broj atoma, iona ili molekula u jednom molu neke tvari.



Izvor: [1]

# AVOGADRO PROJEKT

$$M(28Si) = M_u \cdot Ar(28Si) \quad (5)$$

$M_u$  = konst. molarne mase

$A_r(28Si)$  = rel. atomska masa  $^{28}Si$  = konst.

$$N_A = \frac{M_e}{m_e} \quad (6)$$

Masa elektrona:

$$m_e = \frac{2h \cdot R_\infty}{c \cdot \alpha^2} \quad (7)$$

$c$  = brzina svjetlosti = konst.  $\alpha^2$  = Sommerfeldova konst.  $R_\infty$  = Rydbergova konst.

Planckova konst.  $h = 6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$  Js

$$\text{Molarna masa elektrona: } M_e = M_u \cdot Ar(e) \quad (8)$$

$A_r(e)$  = rel. atomska masa elektrona = konst.

# AVOGADRO PROJEKT

(3), (4), (5), (6), (7) i (8) => (2)

$$m_{\text{jezgre}} = \frac{8 V_{\text{jezgre}}}{a^3} \frac{A_r(^{28}\text{Si})}{A_r(e)} \frac{2h \cdot R_\infty}{c \cdot \alpha^2}$$

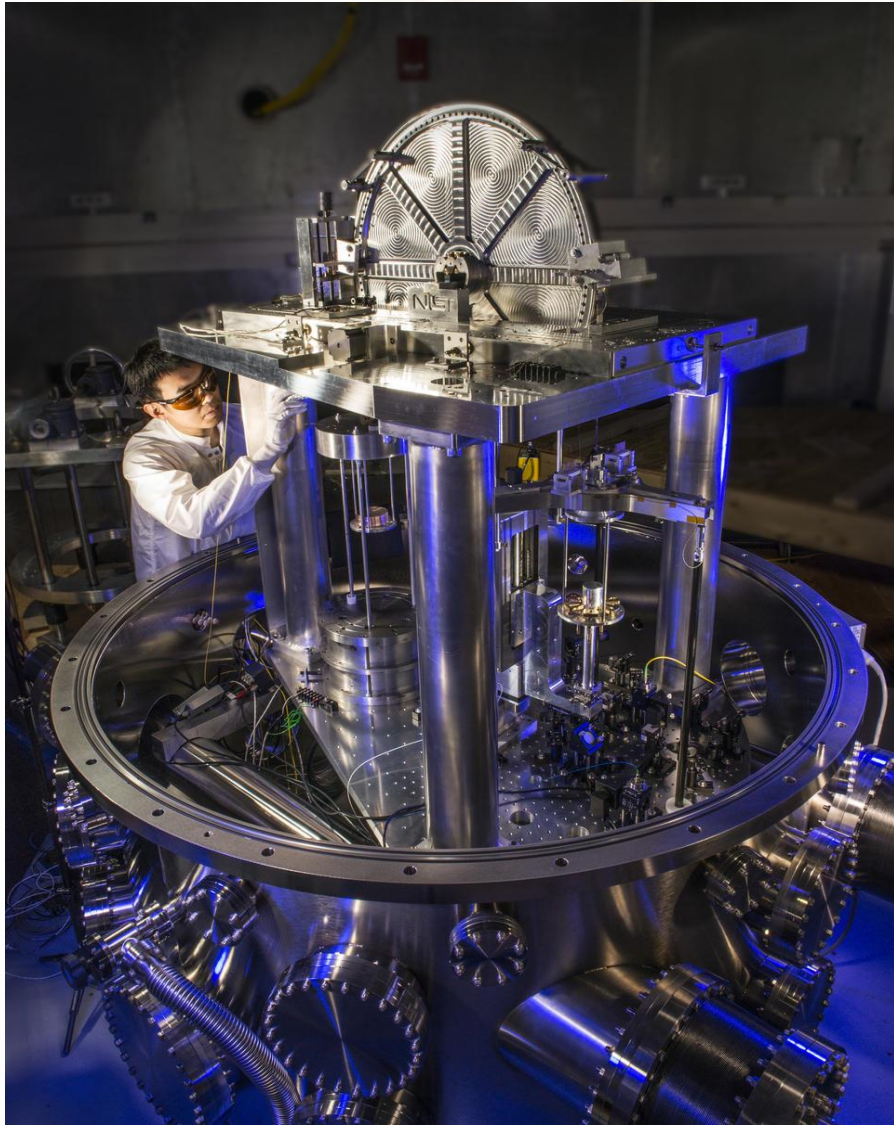
$$h = 6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

I obratno !

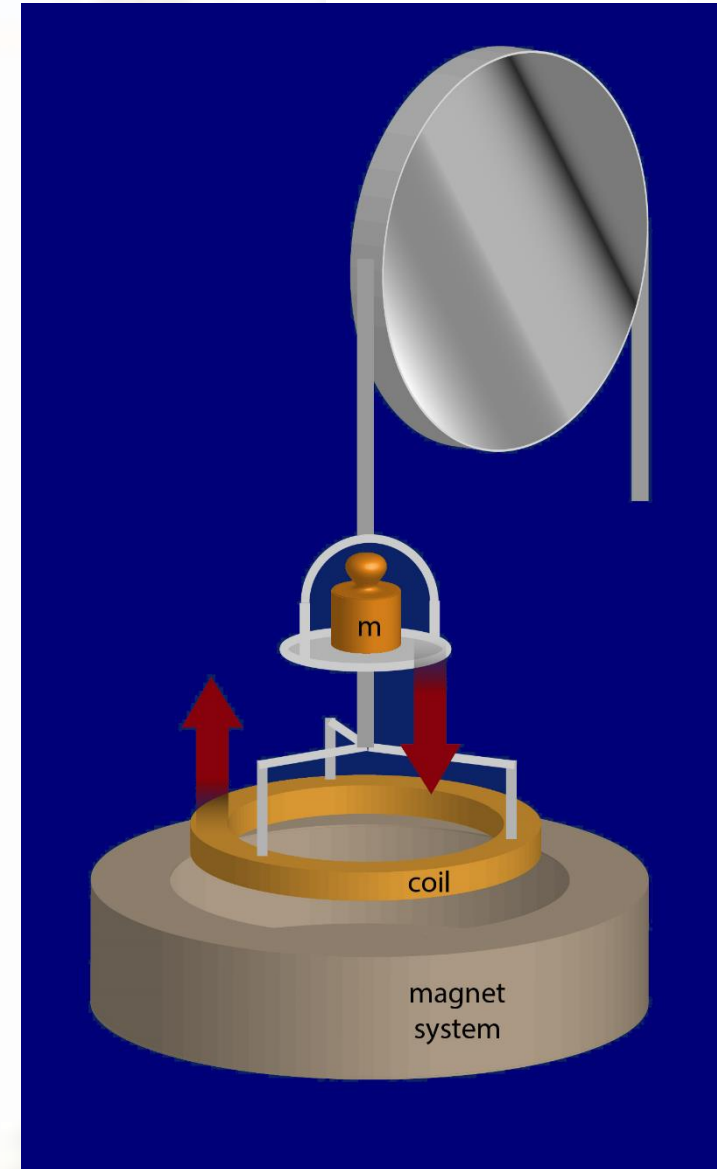


# KIBBLE-ova VAGA

Ravnoteža između elektromagnetskih i mehaničkih sila izmjerenih tijekom dvije faze:  
statička faza i  
dinamička faza.



Izvor: NIST



Izvor: NIST

# KIBBLE-ova vaga

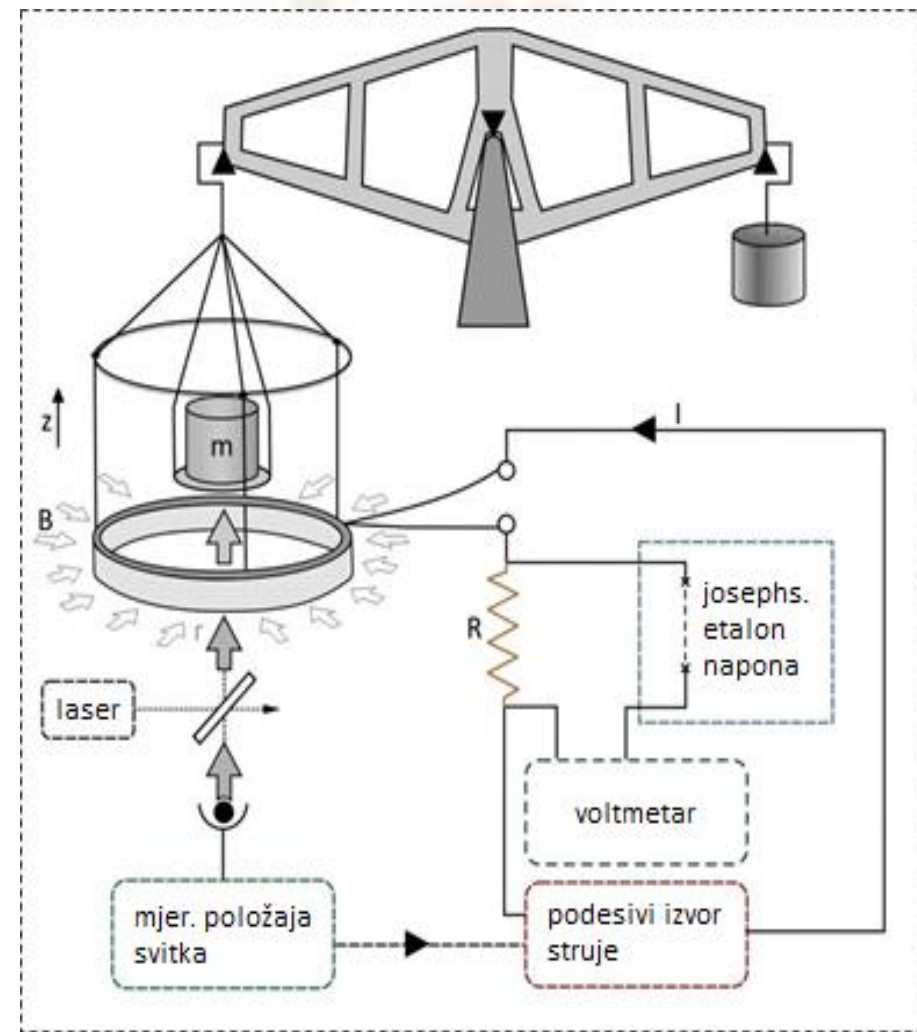
Statička faza:

- Svitak ( $L$ ) se smješta u magnetsko polje ( $B$ ).
- Svitak je kruto vezan s pliticom na kojoj se nalazi uteg ( $m$ ).
- Mehanička sila: težina utega.
- Elektromagnetska (Lorentzova) sila: el. struja ( $I$ ), koja prolazi kroz svitak u mag. polju
- $I$  se podešava sve dok :

$$m \cdot g = B \cdot I \cdot L \quad (1)$$

Mjeri se:

jakost struje  $I$  i gravitaciono ubrzanje  $g$ .



Izvor: [2]

# KIBBLE-ova VAGA

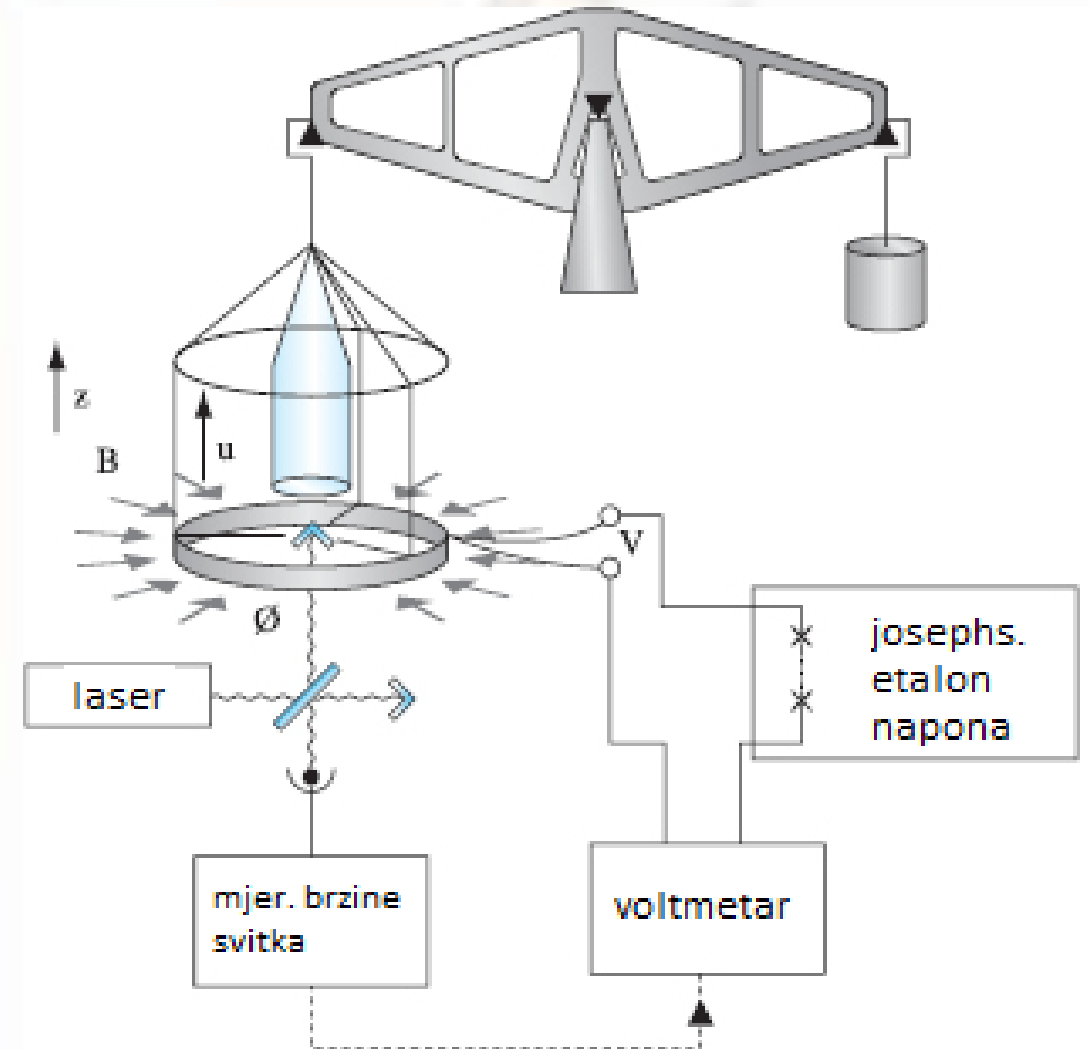
Dinamička faza:

- Uteg se izmješta s vage.
- Prekine se dovod  $I$
- Svitak se pomiče okomito, unutar istog magnetskog polja ( $B$ ) s konstantnom brzinom  $v_z$ ,
- U svitku se inducira električni napon  $U$ :

$$U = B \cdot v_z \cdot L \quad (2)$$

Mjeri se:

brzina svitka  $v_z$  i električni napon  $U$ .



# KIBBLE-ova VAGA

Izjednačavanjem statičke (1) i dinamičke (2) faze, dobije se:

$$U \cdot I = m \cdot g \cdot v_z \quad (3)$$

Jednadžba (3) se može ostvariti pod pretpostavkom:

- vaga je u statičkoj fazi bila u idealnoj ravnoteži
- gibanje svitka u dinamičkoj fazi je u potpunosti određeno vertikalnom komponentom brzine.

Virtualna električna snaga ***UI*** se određuje pomoću Josephsonovog efekta i kvantnog Hallovoeg efekta.

# KIBBLE-ova VAGA

Josephsonov efekt omogućuje da se napon  $U$  izrazi pomoću frekvencije  $f$  i temeljnih prirodnih konstanti:

$$U = \frac{h \cdot f_1}{2e} \quad (4)$$

Hallov kvantni efekt: kod određenih poluvodiča, u određenim uvjetima, diskretne vrijednosti Hallova otpora ne ovise o materijalu nego se mogu izraziti pomoću temeljnih prirodnih konstanti:

$$R_H = \frac{h}{n \cdot e^2} \quad (5)$$

Ohmov zakon:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{h \cdot f_2}{2e} \cdot \frac{1}{R} \quad (6)$$

$h = 6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$  Js – Planckova konst.

$e$  ..... elementarni električni naboj = konst.

$n$  ..... glavni kvantni broj = konst.

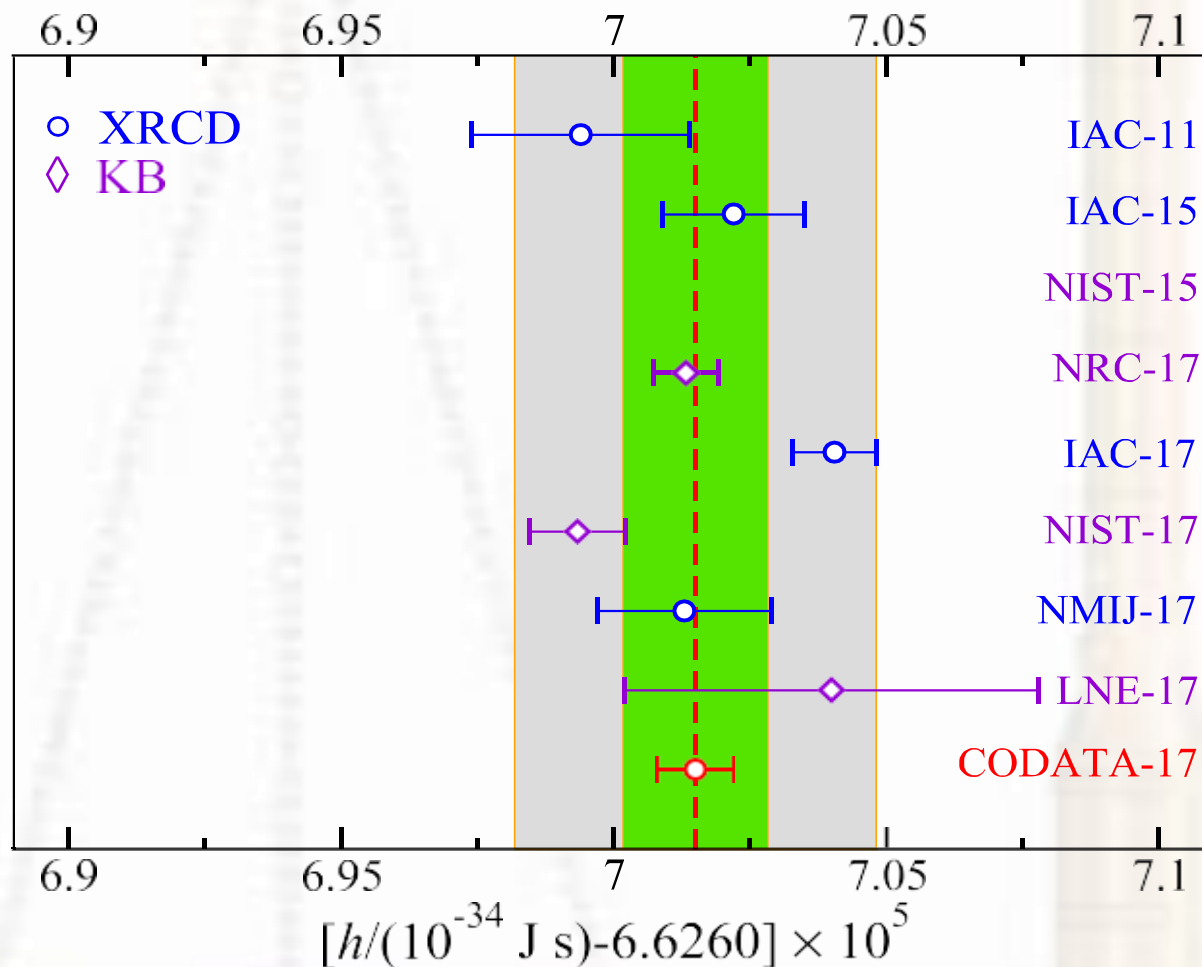
# KIBBLE-ova VAGA

Princip ravnoteže virtualnih elektromagnetskih i mehaničkih sila (3) u kombinaciji s Josephsonovim efektom (4), Ohmovim zakonom (5) i Hallovim kvantnim efektom (6), određuje masu utega:

$$m = \frac{h \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot n}{4g \cdot v_Z}$$

I obratno !

# NOVA DEFINICIJA



- IAC - PTB (GER)
- INRIM (IT)
- IRMM (B)
- NIST (US)
- NMIA (AUS)
- NMIJ (J)
- NPL (UK)
- BIPM

- LNE (FR)
- NIST (US)
- NMIJ (J)
- NRC (CDN)

# NOVA DEFINICIJA

Veličina		Vrijednost		Relat. stand. nesig. $u_r$
$h$	planckova konst.	$6.626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34}$	J s	$1,0 \cdot 10^{-8}$
$e$	elementarni naboj	$1.602\ 176\ 6341(83) \times 10^{-19}$	C	$5,2 \cdot 10^{-9}$
$k$	boltzmannova konst.	$1.380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23}$	J K <sup>-1</sup>	$3,7 \cdot 10^{-7}$
$N_A$	avogadrova konst.	$6.022\ 140\ 758(62) \times 10^{23}$	mol <sup>-1</sup>	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Izvor: CODATA

CODATA (<http://www.codata.org/>)

- Međunarodni odbor za podatke za znanost i tehnologiju.
- Bavi se svim vrstama analize i vrednovanja kvantitativnih podataka dobivenih kao rezultat eksperimentalnih mjerenja i promatranja provedenih u fizici, kemiji, biologiji, geologiji i astronomiji.



# NOVA DEFINICIJA

Kilogram, simbol kg, je SI jedinica mase. Ona se definira pomoću fiksne brojčane vrijednosti Planckove konstante  $h$  koja iznosi  $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$  izražena u jedinici J s, što je jednako  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , pri čemu su metar i sekunda definirani pomoću  $c$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

Izvor: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>

$c$  ..... brzina svjetlosti u vakuumu

$\Delta\nu_{\text{Cs}}$  .... frekvencija prijelaza hiperfinih razina osnovnog stanja atoma cezija 133

# UTJECAJ NA KORISNIKE

Svakodnevni život - promjene će ostati nezapažene.

Školstvo – izmjena udžbenika.

Tehnologija – dugoročno - svaki put kad je čovječanstvo povećalo točnost i preciznost mjerenja, rezultat su bile bolje i naprednije tehnologije.

Znanost - napredak je odmah vidljiv - i kilogram i sve ostale osnovne jedinice imaju stabilnu osnovu - prirodne konstante.

Znanost - dugoročno - vrata za razvoj mjeriteljstva, inovacije i otkrića su širom otvorena

# UTJECAJ NA KORISNIKE

- Lab. (Nac.) će morati prilagoditi svoje proračune mjerne nesigurnosti za mjerenja nakon 20. svibnja 2019. - Dodavanje  $10 \mu\text{g}^*$  postojećoj nesigurnosti koju daje BIPM
- Vrijednosti mase u BIPM potvrdama ostaju važeće.
- Revidirati će se CMC-evi objavljeni u BIPM KCDB bazi podataka.

\*Potvrde o umjeravanju izdane nakon 20. 05. 2019. uključivat će nesigurnost  $10 \mu\text{g}$  IPK-a u odnosu na Planckovu konst. sve do završetka prve ključne usporedbe primarne realizacije kilograma.

# BIBLIOGRAFIJA

## **[1] Realization of the kilogram by the XRCD method**

Kenichi Fujii, Horst Bettin, Peter Becker, Enrico Massa, Olaf Rienitz, Axel Pramann, Arnold Nicolaus, Naoki Kuramoto, Ingo Busch and Michael Borys

[Metrologia](#), [Volume 53](#), [Number 5](#), 28. September 2016.

## **[2] The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass**

Ian A Robinson and Stephan Schlamming

[Metrologia](#), [Volume 53](#), [Number 5](#), 28. September 2016.

## **[3] Practical requirements for the successful implementation and subsequent dissemination of the redefined kilogram**

Stuart Davidson, James Berry and Kilian Marti

Vacuum [Volume 120, Part A](#), September 2015.

## **[4] Automatic Comparison of Weights and Mass Standards**

Sławomir Janas, Michał Solecki, Tadeusz Szumiata and Kazimierz Pulaski

© Copyright by RADWAG Wagi Elektroniczne Radom 2017. Edition I

## **[5] Note on the impact of the redefinition of the kilogram on BIPM mass calibration uncertainties**

Michael Stock, Director of Physical Metrology Department, BIPM

## **[6] CCEM Guidelines for Implementation of the 'Revised SI'**

8/12/2017 Version 1.0

## **[7] The CODATA 2017 values of $h$ , $e$ , $k$ , and $N_A$ for the revision of the SI**

D B Newell, F Cabiati, J Fischer, K Fujii, S G Karshenboim, H S Margolis, E de Mirandés, P J Mohr, F Nez, K Pachucki

[Metrologia](#), [Volume 55](#), [Number 1](#), 29. January 2018.

**Hvala na pozornosti!**

**[mladen.bezjak@dzm.hr](mailto:mladen.bezjak@dzm.hr)**