

計測標準フォーラム講演会、2020年2月21日(金)、:TKPガーデンシティPREMIUM神保町

130年ぶりとなるキログラムの定義改定

産業技術総合研究所 計量標準総合センター(NMIJ) 工学計測標準研究部門

藤井 賢一

メートル条約における質量の基準
国際キログラム原器(1889年~)



新しい定義の施行(2019年5月20日~)



第26回国際度量衡総会
2018年11月16日、ベルサイユ

キログラム:プランク定数

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

アンペア:電気素量

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

ケルビン:ボルツマン定数

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

モル:アボガドロ定数

$$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

キログラムの定義を変えることの難しさ

2012年の科学誌ネイチャー: Nature, 481, 14-17 (2012)

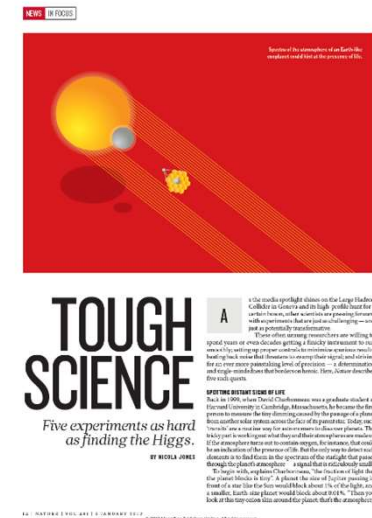
TOUGH SCIENCE

Five experiments as hard as finding the Higgs.

By Nicola Jones

人類が克服できていない物理学上の5大研究課題

- 1) 地球外生命との交信
- 2) 生命における分子光学異性体(ミラー分子)の謎
- 3) 素粒子物理学における多次元理論 → 近距離場での重力異常
- 4) 重力波検出 → 2016年 観測に成功
- 5) キログラムの定義改定



最新の物理学や計測技術を駆使しても、19世紀末の真空冶金技術で造られた白金・イリジウム合金製の分銅の質量安定性を超えることができなかった。

人工物に頼らない新しい定義

➤ 定義案(1): 原子の数

キログラムは基底状態にある静止した自由な $5.018 \cdots \times 10^{25}$ 個の炭素原子 ^{12}C の質量に等しい

$$\text{アボガドロ定数 } N_A = 6.022 \cdots \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

原子や分子の数を表す定数

➤ 定義案(2): 相対論と光量子仮説

アインシュタインの関係式

$$E = mc^2 = h\nu$$

$$\nu = mc^2/h$$

キログラムは周波数が $[(299\,792\,458)^2/6.626 \cdots] \times 10^{34}$ ヘルツの光子のエネルギーと等価な質量である

光の速さ $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ (1983年の定義)

プランク定数 $h = 6.626 \cdots \times 10^{-34} \text{ J s}$

光のエネルギーと周波数との関係を表す定数

アボガドロ定数 N_A とプランク定数 h との関係

基礎物理定数の関係式： $m_e = 2hR_\infty/(\alpha^2 c)$



$$N_A = \frac{M_e}{m_e} = \frac{cM_e \alpha^2}{2R_\infty h}$$



M_e : 電子1モルの質量

m_e : 電子1個あたりの質量

c : 光速度

α : 微細構造定数

R_∞ : リュードベリ定数

$cM_e \alpha^2/(2R_\infty)$ の相対標準不確かさ: 4.5×10^{-10}

X線結晶密度法によるアボガドロ定数 N_A の測定

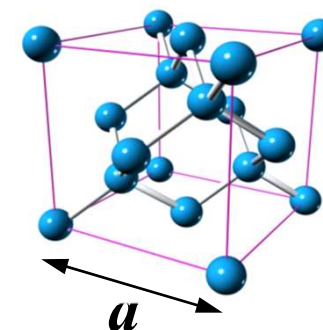
原子の数からキログラムの新しい定義を実現

格子定数: a 原子間距離(格子面間距離): X線干渉によって測定

密度: ρ シリコン結晶球体の質量と体積の測定

モル質量: M (^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si の割合)




$$N_A = 8M/(\rho a^3) = 6.022 \cdots \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$



シリコンの結晶構造

従来はモル質量の測定精度がボトルネック

- MoU: アボガドロ国際プロジェクト (2004~)
- シリコンの同位体濃縮

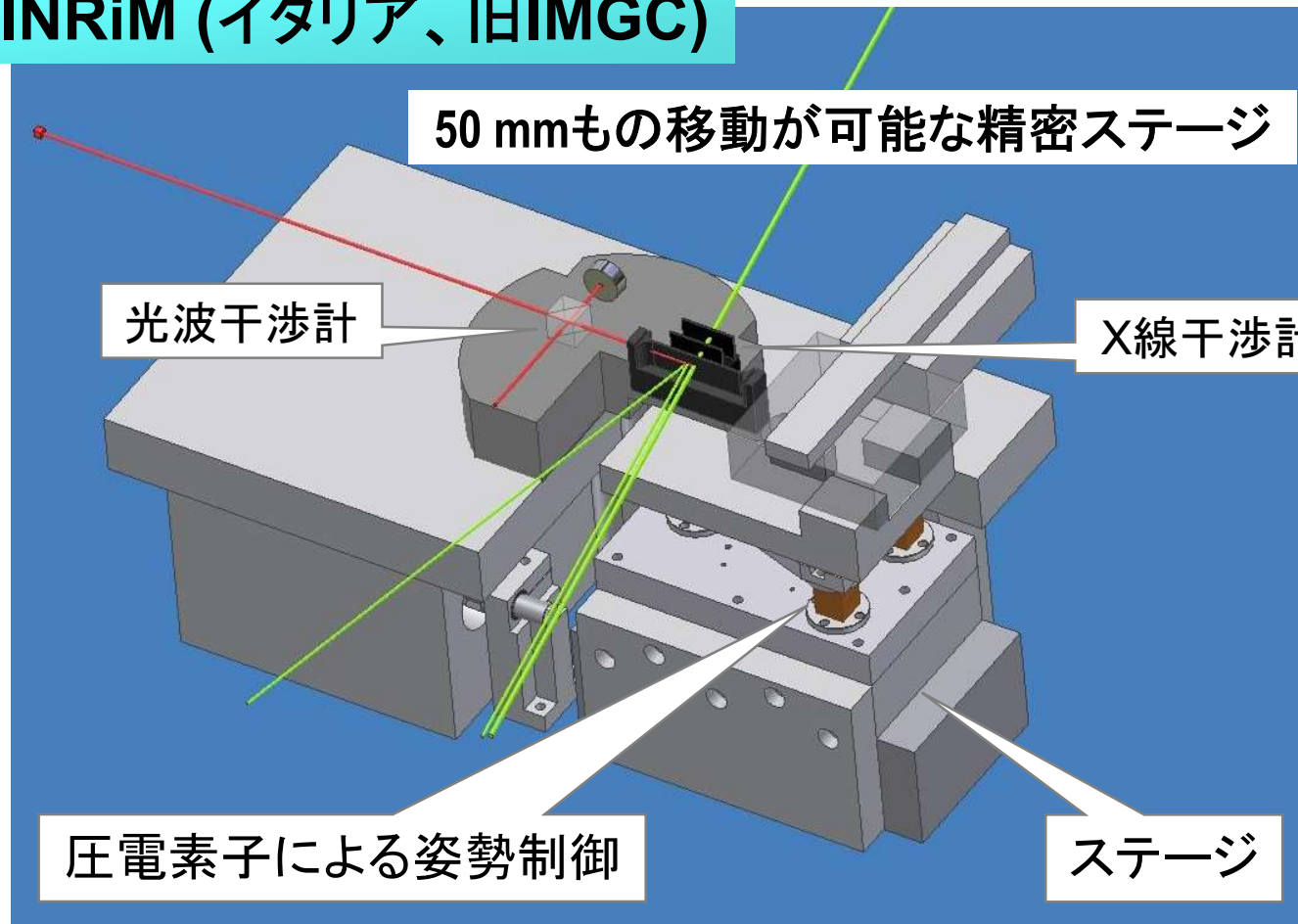
	自然界の Si	同位体濃縮 Si
^{28}Si 	92 %	99.994 %
^{29}Si 	5 %	0.005 %
^{30}Si 	3 %	0.001 %
$\Delta M/M$	3×10^{-7}	5×10^{-9}



5 kgの ^{28}Si 同位体濃縮結晶

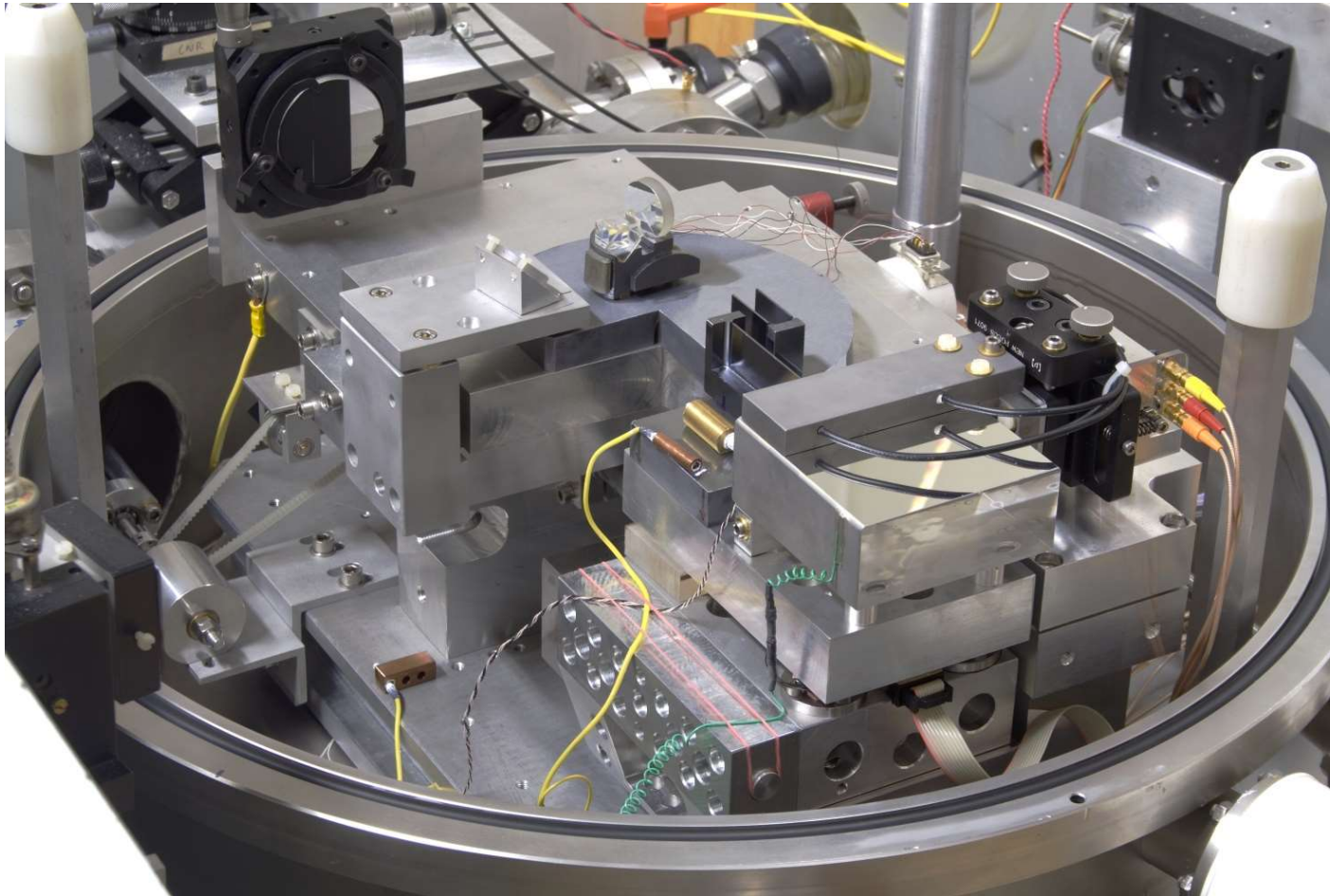
イタリアの研究グループが開発した新しいX線干渉計

INRiM (イタリア、旧IMGC)



弾性ヒンジを用いないことで長い距離の移動が可能

INRIM(伊)のX線干渉計による ^{28}Si 格子定数の測定



格子定数の測定の不確かさ: 1.7×10^{-9}



CSIRO(豪)によるシリコン球 研磨技術の開発

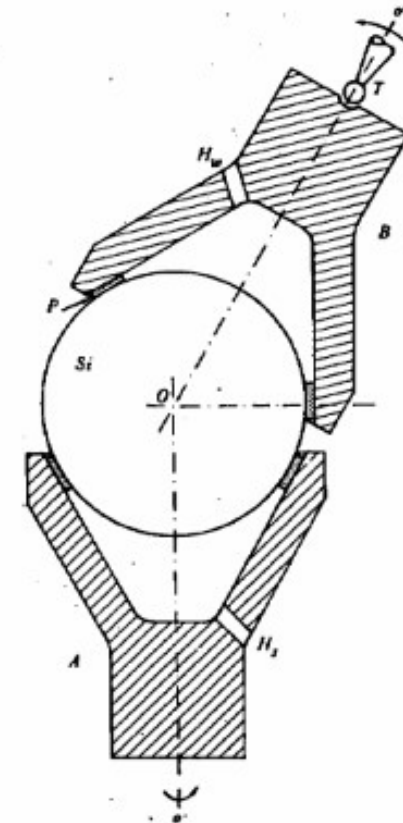
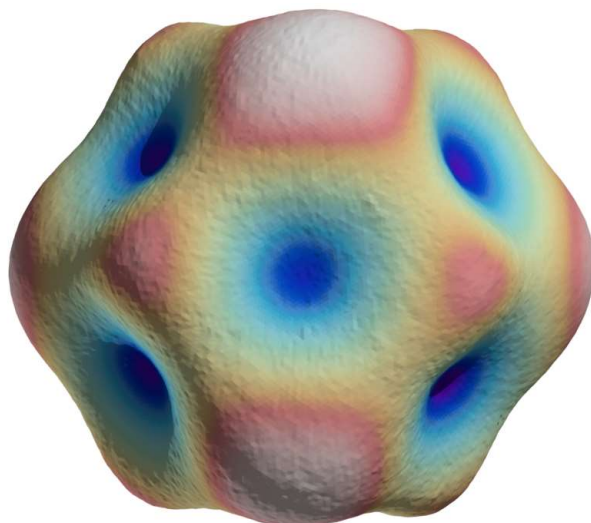


Fig. 1. Arrangement of cones A and B during final polishing. Cone A rotates around the fixed axis $O-o'$; cone B, while rotating around the axis $O-o''$, is driven by the extremity T of an oscillating arm (not shown in the figure). The suspension of titanium dioxide and water is added through the hole H_1 ; slurry flows out of cone A through the hole H_2 . P indicates the pitch ring, and Si is the silicon sphere.

Applied Optics, Vol. 26, No. 4, pp. 600-601, 1987

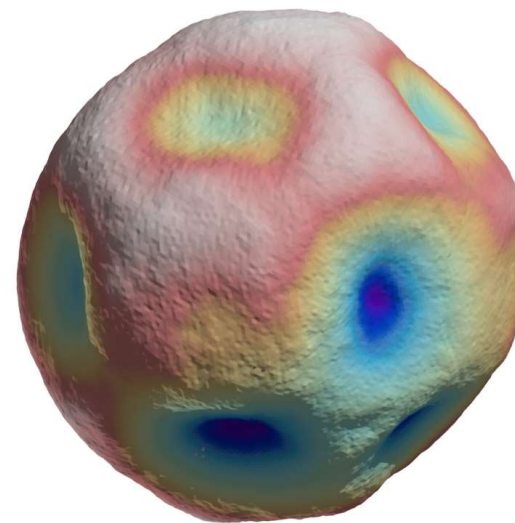
質量約1 kgの ^{28}Si 濃縮シリコン球体の真球度

Avo28-S5



AVO28-S5c, $(p-v)_{\text{diameter}} = 69 \text{ nm}$

Avo28-S8

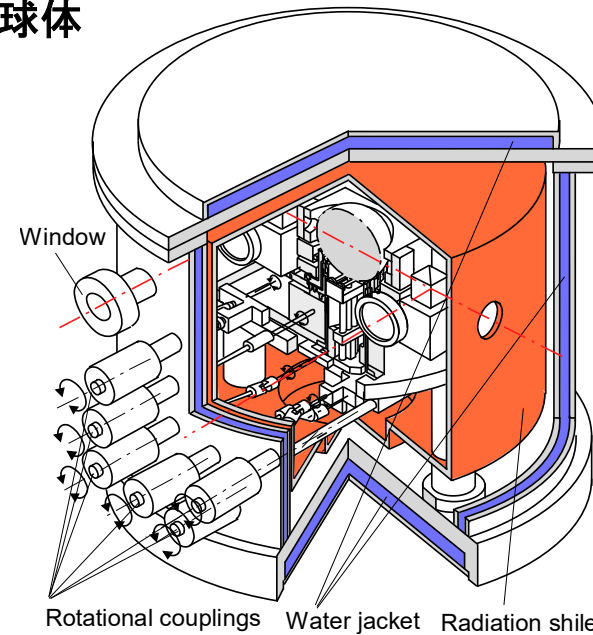
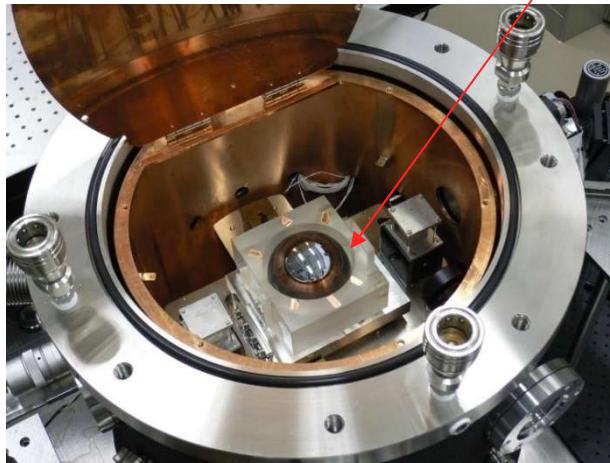


AVO28-S8c, $(p-v)_{\text{diameter}} = 38 \text{ nm}$

質量1 kg、直径94 mm、凹凸の標準偏差: 5 nm

2010年代：産総研NMIJのレーザ干渉計によるシリコン球の直径測定

単結晶シリコン球体



温度の均一性と安定性 < 0.3 mK

約2300方位からの直径測定

直径測定の不確かさ: 0.6 nm

表面酸化膜の評価: SE, XRR, XPS, XRF

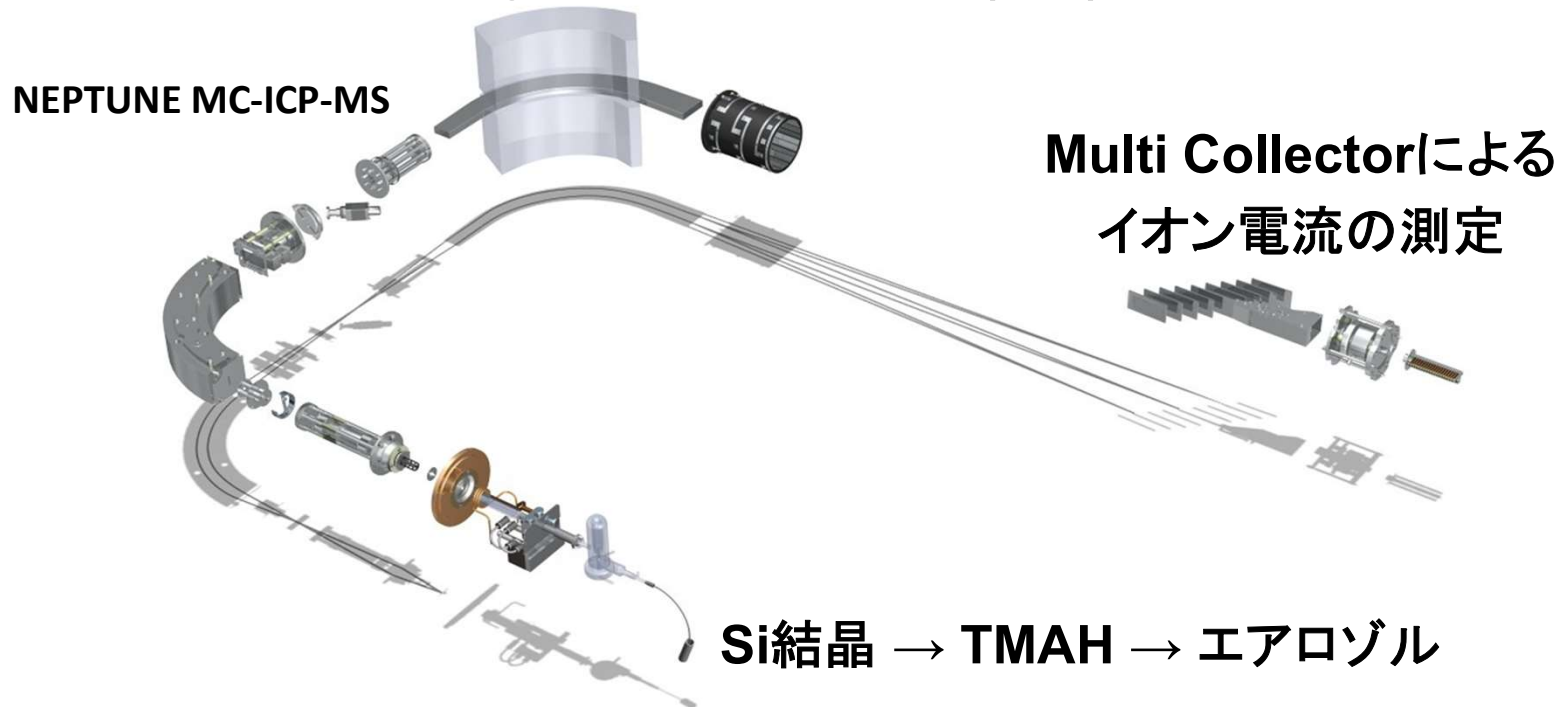
体積の測定の不確かさ: 2.0×10^{-8}



N. Kuramoto, **K. Fujii**, and K. Yamazawa: Volume measurements of ^{28}Si spheres using an interferometer with a flat etalon to determine the Avogadro constant, *Metrologia*, 48, S85-S95 (2011)

同位体希釈分析による ^{28}Si のモル質量の測定

Inductively Coupled Plasma (ICP): 誘導結合プラズマ

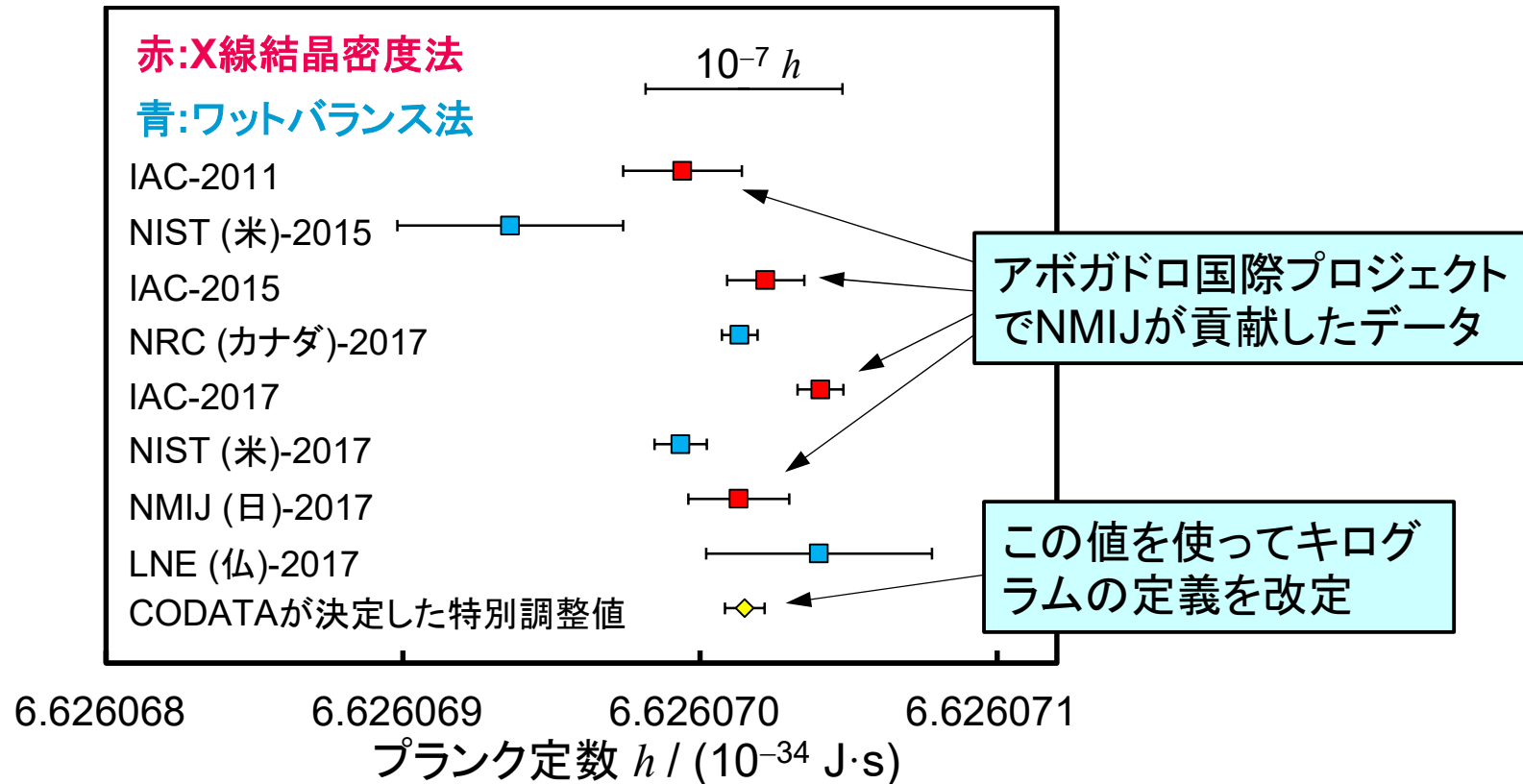


最初はPTB(独)が開発、現在ではNMIJ(日)とNIST(米)でも測定可能

モル質量の測定の不確かさ: 5.6×10^{-9}

T. Narukawa, A. Hioki, N. Kuramoto, **K. Fujii**: Molar-mass measurement of a ^{28}Si -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, 51, 161-168 (2014)

科学技術データ委員会 (CODATA) によるプランク定数の決定



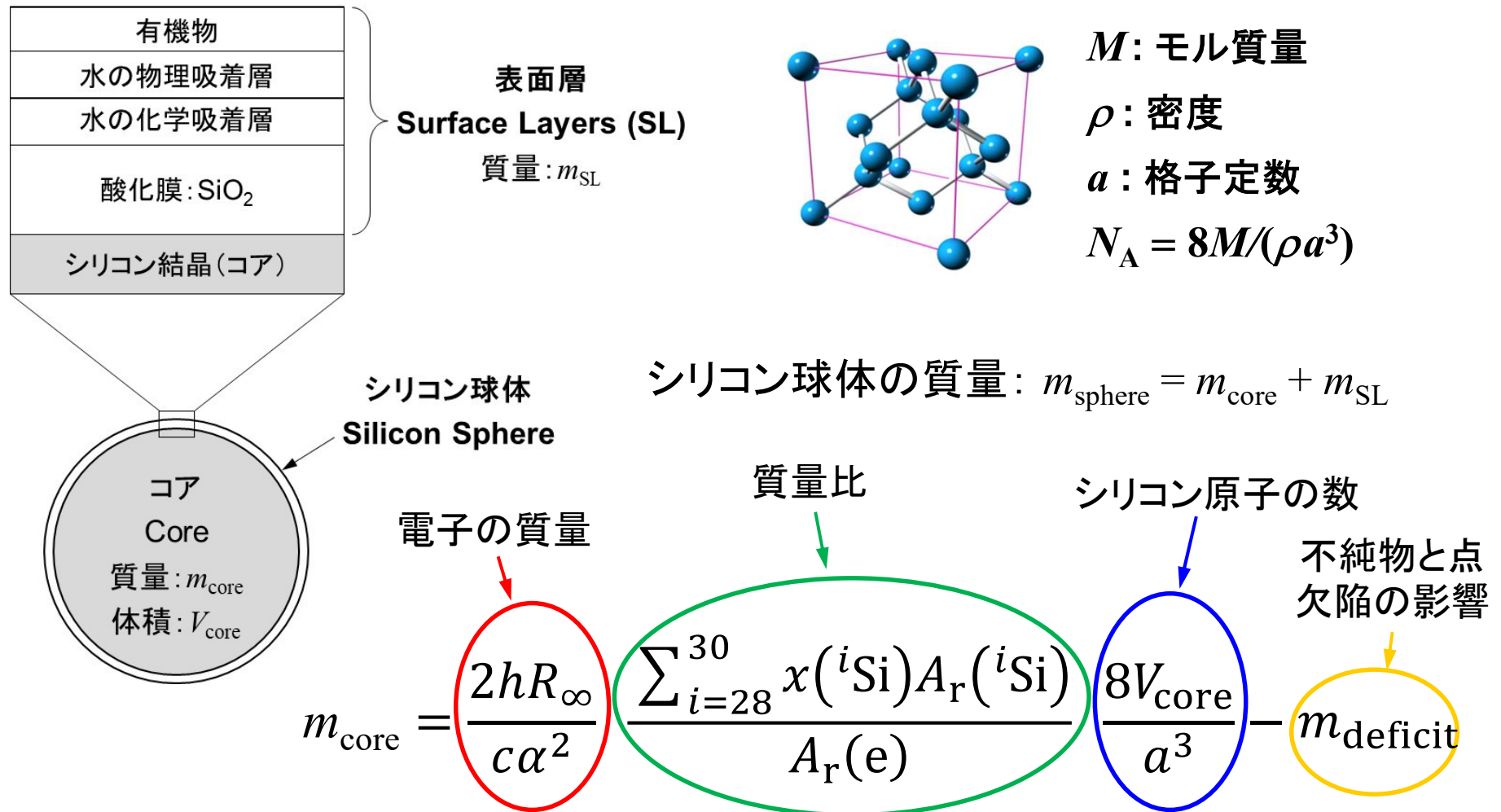
アンペアの新しい定義: 電気素量 $e = [2 \alpha h / (\mu_0 c)]^{1/2}$

モルの新しい定義: アボガドロ定数 $N_A = c M_e \alpha^2 / (2 R_\infty h)$

日本が大きく貢献するかたちでキログラム、アンペア、モルの定義改定が実現

D. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, **K. Fujii**, S. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandes, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, Z. Zhang: The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A for the Revision of the SI, *Metrologia*, 55 (2018) L13-L16.

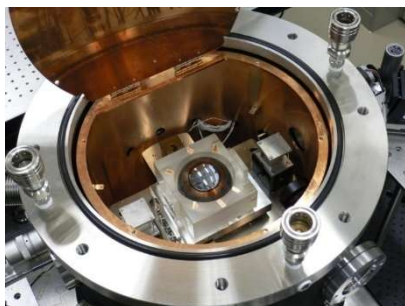
X線結晶密度法によるキログラムの実現方法



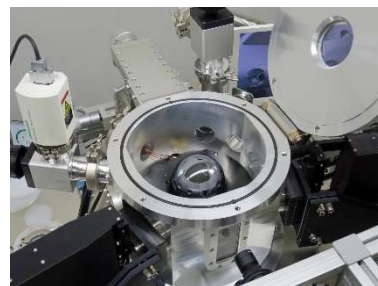
K. Fujii, H. Bettin, P. Becker, E. Massa, O. Rienitz, A. Pramann, A. Nicolaus, N. Kuramoto, I. Busch, M. Borys: Realization of the kilogram by the XRCd method, *Metrologia*, 53, A19-A45 (2016)

NMIJにおけるキログラムの実現

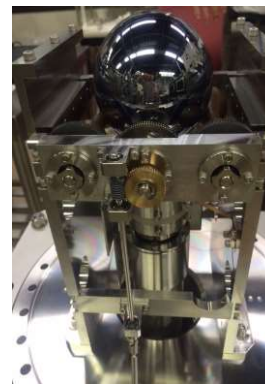
シリコン球体の直径
及び体積の測定



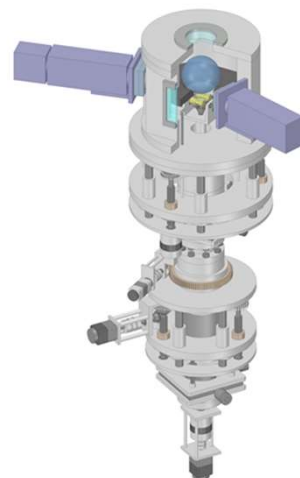
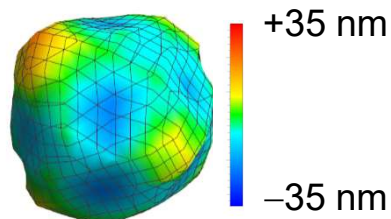
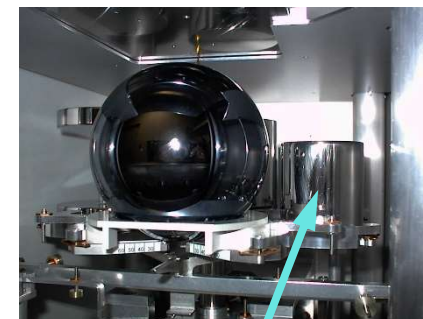
エリプソメトリーによる
表面層の厚さの測定



X線光電子分光による
表面層の質量の測定



分銅との質量比較



1キログラムを測る
ときの標準不確か
さ: 24 μg

国際キログラム原
器 (IPK) の質量の
安定性: 50 μg

IPKの質量の長期安定性よりも高い精度で1キログラムを測ることが
できるのは今のところ**カナダ、ドイツ、日本、米国**の4カ国のみ

N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, **K. Fujita**, Y. Azuma, A. Kurokawa, K. Fujii: Realization of the Kilogram Based on the Planck Constant at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66, 1267-1274 (2017)

進化する単位



- 1889年にキログラムが定義されて以来、ようやく**アボガドロ定数**や**プランク定数**などの物理定数の測定精度のほうがIPKの質量安定性よりもよくなってきた。
- 2018年11月16日にベルサイユで開催されたメートル条約の総会で**130年ぶりのキログラムの定義改定**が採択
- **日本が大きく貢献**する形でキログラムの**定義改定**が**実現**
- **人工物に頼らない理想的な単位系の完成**
- **新しい定義**は将来の**イノベーション**をもたらす効果がある。
- 将来の**イノベーション**にも**通用**するような定義にしておくことが重要