

トークイベント「さようならキログラム原器」@国立科学博物館 2019年6月2日

## キログラムの新しい定義 –さようならキログラム原器–

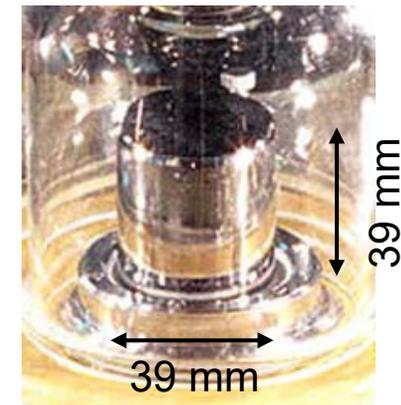
産業技術総合研究所(産総研:さんそうけん) 計量標準総合センター  
質量標準研究グループ長 倉本 直樹 E-mail: n.kuramoto@aist.go.jp

➤ 質量（重さ）の単位「キログラム（kg）」

- 50 kg :  $50 \times 1 \text{ kg}$
- 1 kgとは? → キログラムの定義
- 2019年5月19日までの定義：  
国際キログラム原器の質量

➤ プランク定数による新たな定義

- プランク定数とキログラムの関係
- 基準になったプランク定数は誰がどのように  
決めたの？



国際キログラム原器

- 世界に一つしかないおもり
- 国際度量衡局で厳重に保管
- 質量が変動している可能性

# 「キログラム」はいつ頃から使われているの？

18世紀末のフランス(約230年前、フランス革命の頃)

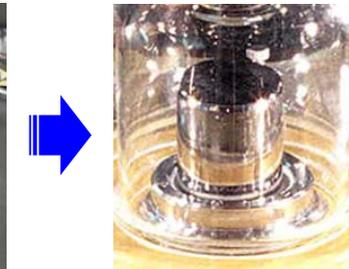
1 kg = 水1リットルの質量

1889年 → 1 kg = 国際キログラム原器の質量

世界に一つしかない金属製の「おもり」



水1リットル



国際キログラム原器

1990年頃 表面の汚れなどによる国際キログラム原器の100年間にわたる

質量変動は1億分の5 kg

→ 「モノ」でないものをキログラムの基準としよう！

指紋の1個分の重さ!



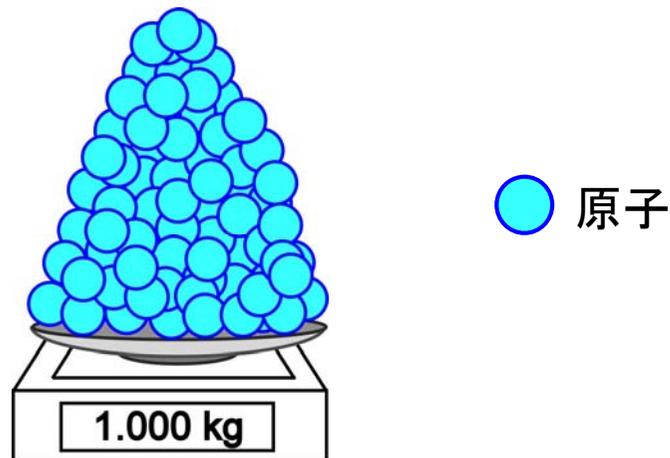
2011年 将来、プランク定数による定義に移行する国際的合意

→ プランク定数の正確な値が必要

☺ プランク定数を測定しよう！(ただし、1億分の5より高い精度で)

## プランク定数とキログラム

- プランク定数: ミクロな物質の振る舞いを説明するための物理定数  
 $h = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 662\ \dots\ \text{J s}$
- 原子一個あたりの質量を導くことができる  
→ プランク定数を基準として、非常に多数の原子の質量として1キログラムを表現できる



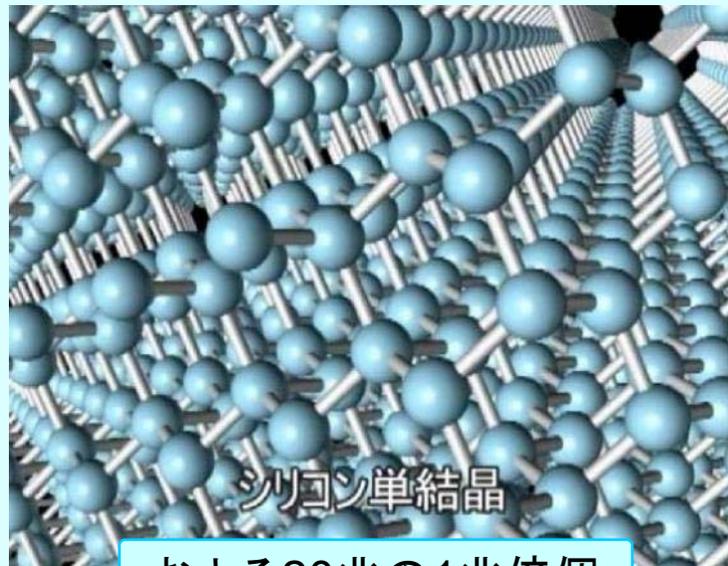
プランク定数とキログラムを結びつける方法

# X線結晶密度法

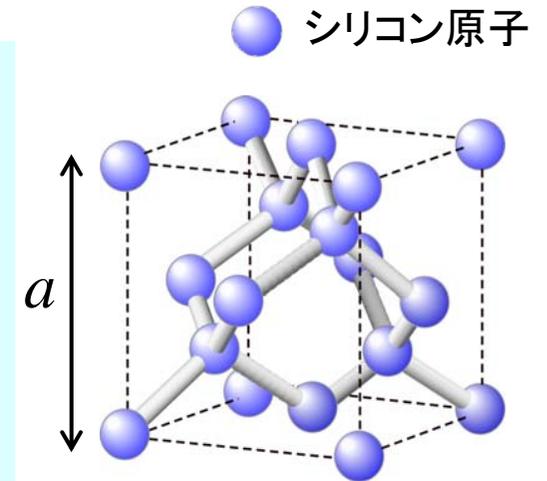
原子1個の質量  $\longleftrightarrow$  プランク定数



- シリコン単結晶球体
- 質量: 約 1 kg
  - 直径: 約 94 mm



シリコン単結晶  
およそ20兆の1兆倍個



シリコン単結晶球体の質量  $m$  と体積  $V$  を測定

単位格子の体積  $a^3$  を測定

$$\frac{\text{シリコン球体の体積 } V}{\text{単位格子の体積 } a^3} \times 8 = \text{シリコン球体中の原子数}$$

$$\frac{\text{シリコン球体の質量 } m}{\text{シリコン球体中の原子数}} = \text{シリコン原子1個の質量} \longrightarrow \text{プランク定数}$$

## アボガドロ国際プロジェクト

- ターゲット
  - ・ 特殊なシリコン単結晶 ( $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶) の製作
  - ・ プランク定数の精密測定
- 世界各国の研究者と協力しながらプロジェクトを実施



産業技術総合研究所



国際度量衡局



イタリア計量研究所



欧州標準物質計測研究所



米国標準技術研究所



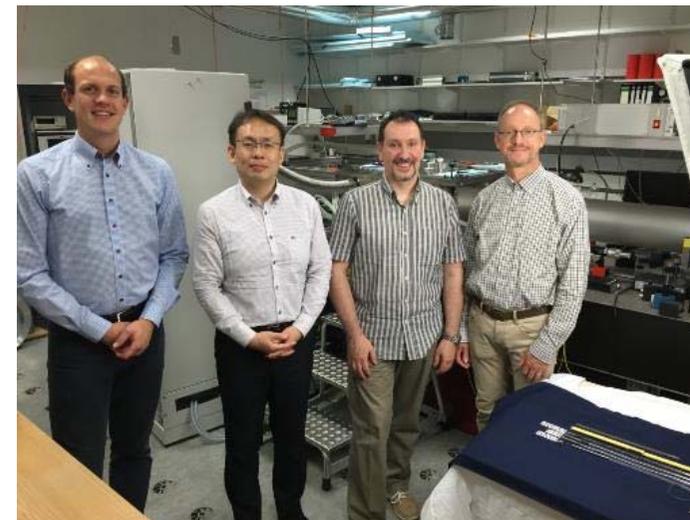
オーストラリア計量研究所



英国物理研究所



ドイツ物理工学研究所



ドイツ物理工学研究所での国際共同測定（2016年5月）

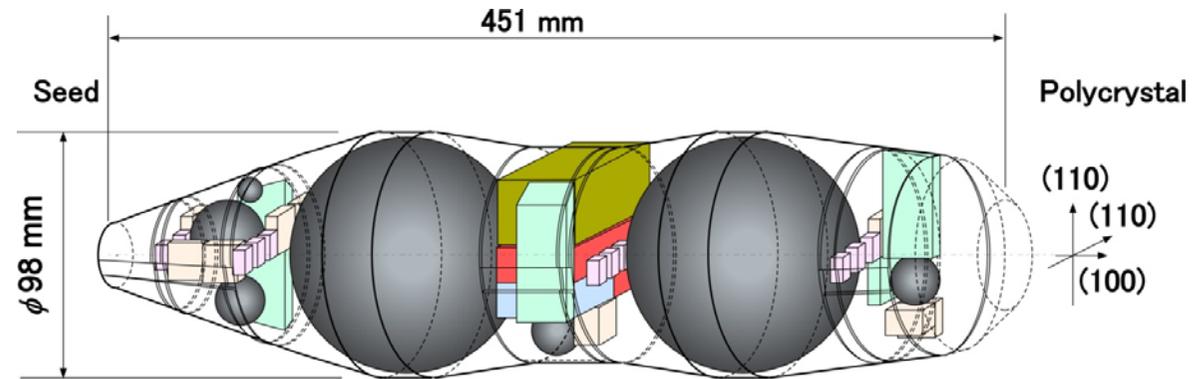
# $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶



500,000,000円

$^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶

- 質量 : 5 kg
- 濃縮度 : 99.99 %



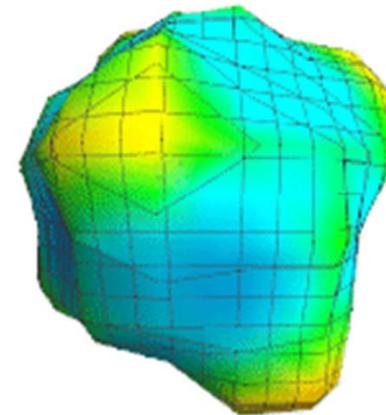
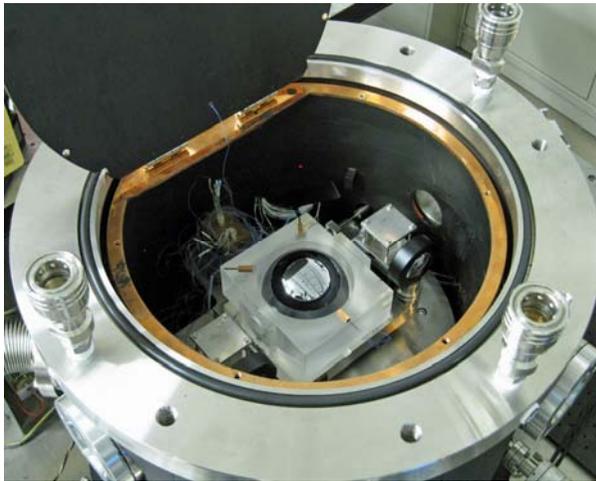
100,000,000円

100,000,000円

1 kg  $^{28}\text{Si}$  球体

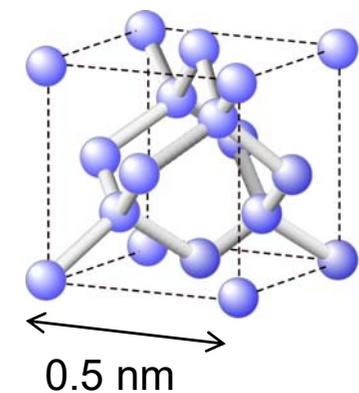
- 体積や質量などを様々な研究機関において測定

# シリコン球体体積測定



## シリコン球体直径測定用レーザー干渉計

- 光の物差し「レーザー」を使って球体の直径を測定
- 直径測定精度: 0.6 nm (原子間距離に相当)
- 約2000方位からの球体直径を測定
- 日本、ドイツ、オーストラリア、イタリア、中国、韓国、米国で干渉計の開発が行われたが、原子レベルの精度での球体直径測定に成功したのは産総研とドイツ物理工学研究所のみ



シリコン結晶単位格子

## 日本国キログラム原器



日本国キログラム原器

引用元:朝日新聞デジタル <https://www.asahi.com/articles/ASLC646QRCLC6ULBJ00D.html>

- 国際キログラム原器の複製の一つ
- 1889年:パリから日本に輸送
- 我が国の質量の国家標準として産総研で厳重に保管

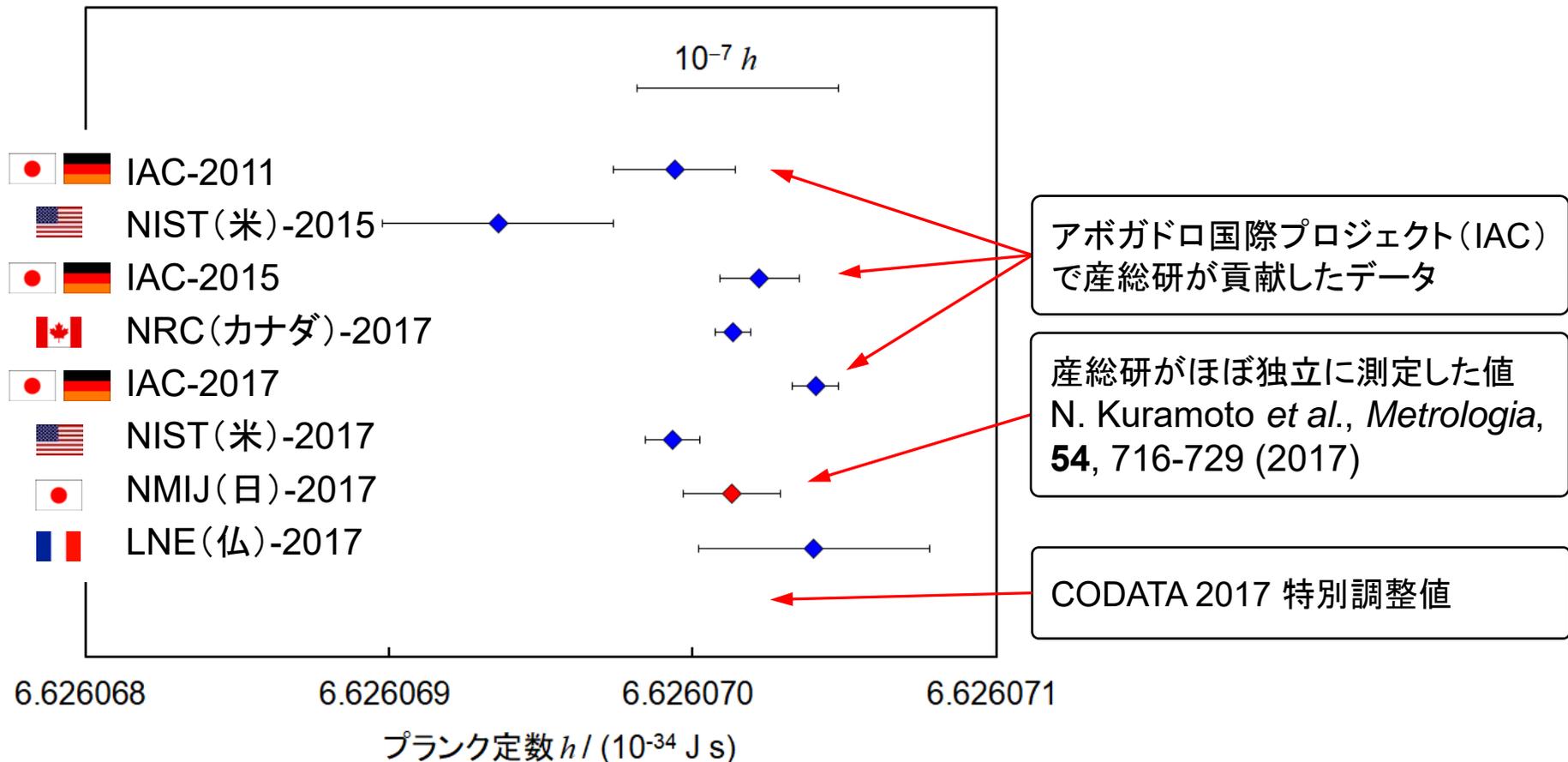
## プランク定数測定結果

- $h = 6.626\ 070\ 13(16) \times 10^{-34}$  J s, 測定精度 :  $2.4 \times 10^{-8}$  (1億分の2.4)
  - N. Kuramoto *et al.*, *Metrologia*, **54**, 716-729 (2017)
  - 測定精度 : 1億分の2.4
  - 国際キログラム原器の質量の長期安定性(1億分の5)を凌ぐ
- 日本、ドイツ、カナダ、アメリカ、フランスの研究機関が高精度なプランク定数測定に成功

## 科学技術データ委員会(CODATA)

- 2017年10月 : 新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値を決定

# 新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定



- 8つの測定結果(日本、ドイツ、アメリカ、カナダ、フランス)に基づき特別調整値を決定
- 科学の歴史に残る重要な値の決定に直接貢献

# 新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定

D. Newell *et al.*, *Metrologia*, **55**, L13, 2018

Source	Identification <sup>a</sup>	Value
Schlamminger <i>et al</i> (2015)	NIST-15	$h$ $6.626\,069\,36(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Wood <i>et al</i> (2017)	NRC-17	$h$ $6.626\,070\,133(60) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Haddad <i>et al</i> (2017)	NIST-17	$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Thomas <i>et al</i> (2017)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Azuma <i>et al</i> (2015)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Azuma <i>et al</i> (2015)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Bartl <i>et al</i> (2017)		$h$ $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Kuramoto <i>et al</i> (2017)	NMIJ-17	$N_A$ $6.022\,140\,78(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

産総研 計量標準総合センター  
**National Metrology Institute of Japan**



プランク定数の定義値:  $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$

- 1889年(明治22年)以来、130年ぶりとなるキログラムの定義改定
- 近代度量衡の歴史上初となる、普遍的な物理定数を基準とする質量標準の確立
- 科学の歴史に残る値の決定に、ドイツ、アメリカ、カナダ、フランスと共に貢献

# 産総研ホームページ キログラム定義改定特設サイト

産総研について | 研究成果 | 連携と技術相談 | コミュニケーション | 採用情報 | アクセス | お問い合わせ | English | search

産総研

- エネルギー・環境
- 生命工学
- 情報・人間工学
- 材料・化学
- エレクトロニクス・製造
- 地質調査
- 計量標準

## キログラムが変わるとき

キログラム定義改定特設サイト

キログラムが変わるとき | 研究者が語る! 分解説 | LINK | ブルーバックス探検隊が行く! | Technobridge On the Web

- 一般の皆様向け
- 研究者・技術者・学生の皆様向け
- 産業界の皆様向け

最近の研究成果 RESEARCH RESULTS | 私たちの取組み EFFORTS

こんなところに産総研

<https://www.aist.go.jp/taisaku/ja/kg/index.html>

## プランク定数の覚え方？

プランク定数  $6.62607015 \times 10^{-34}$  Js  
どうおぼえる？

# #SI語呂合わせ ハッシュタグキャンペーン

Twitter でキログラムの新定義に使われる基礎物理定数の語呂合わせを  
【#SI語呂合わせ】 とともにツイートして、130年ぶりの定義改定を盛り上げよう！

## 5/31 まで募集中！

※ツイートいただいた語呂合わせは、アカウント名とともに産総研の各種広報活動で使用させていただく場合があります。