

普遍的な物理定数にもとづく キログラムの新しい定義

産業技術総合研究所 質量標準研究グループ長 倉本直樹 E-mail: n.kuramoto@aist.go.jp

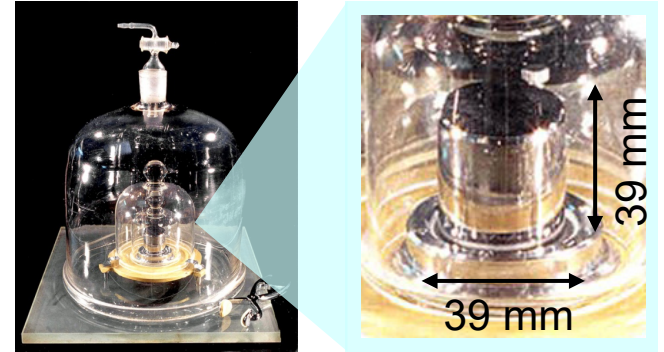
- キログラムの新しい定義が導かれた経緯
- 産業技術総合研究所（産総研）で実施した研究開発
- 定義が新しくなったことの影響
- プランク定数とキログラムの関係



引用元: NHK くらし☆解説「日本も貢献 1 kgの定義変わります！」
<http://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/700/309325.html>

質量の単位「キログラム」

- キログラムの定義
 - $50 \text{ kg} \rightarrow 50 \times 1 \text{ kg}$
 - 1 kgが具体的にどれくらいの質量か？
→ キログラムの定義
 - 国際キログラム原器の質量
 - ただし、2019年5月19日まで
- 単位の定義は科学技術の発展と共に進化
- 2019年5月20日：世界中どこでも変わらず、時間とともに変化しない、普遍的な物理定数であるプランク定数を基準とする定義に進化



国際キログラム原器
(写真提供：国際度量衡局)

- 世界に一つしかない分銅
- この分銅の質量がちょうど1 kg
- 国際度量衡局で管理
- 質量が変動している可能性

世界共通の単位が構築された経緯: 様々な単位

➤ 単位は、時代、国、地方などで異なっていた

- キュービット

- 古代エジプト

- 王様のひじから中指の先までの長さ

- 1 キュービット = 約 50 cm

- 残念ながら王様が変わると、、、

- カラット

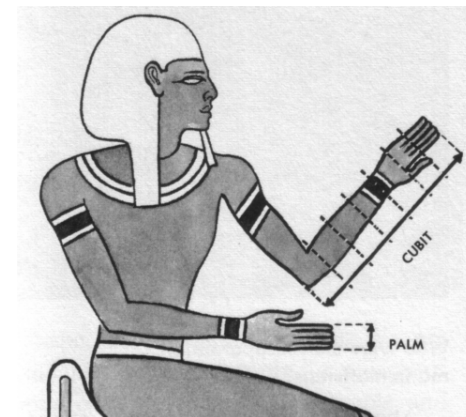
- 古代ギリシャ・ローマ

- イナゴ豆一粒の質量

- 宝石の質量の単位「カラット」のルーツ

- 1カラット = 約 0.2 g

- 残念ながら粒によって質量が、、、



王様の人体



イナゴ豆

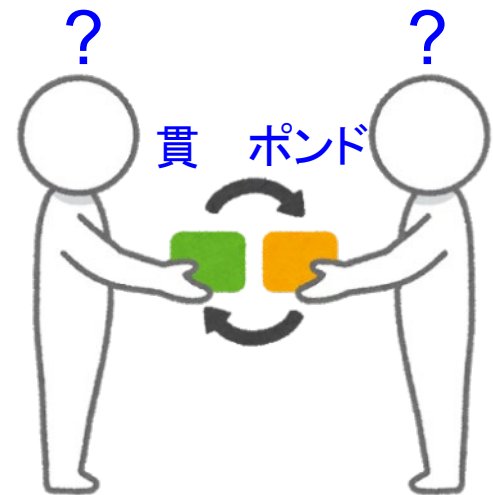
世界共通の単位の必要性

科学技術の発展

- 様々な移動手段や通信手段の開発
- 人、物、情報の交流が世界規模で活発化
 - 国や地方で異なる単位が使われていると
 - スムーズな商取引や科学的な情報の正確な共有が困難
 - 世界共通の単位が必要



様々な移動手段の開発

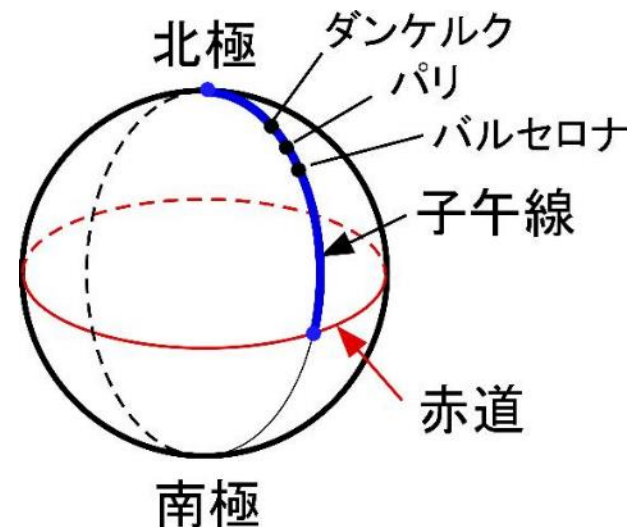
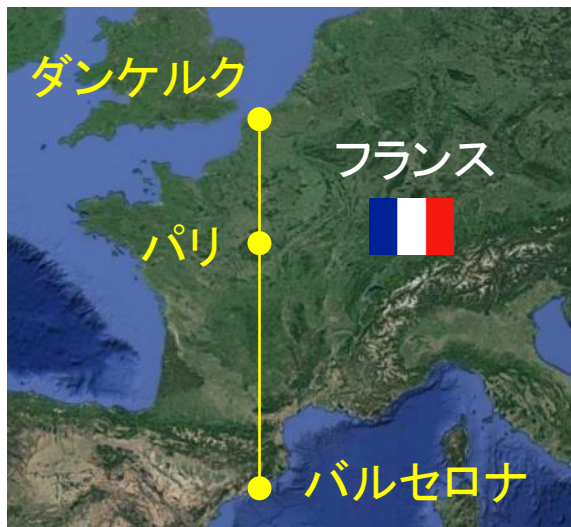


使っている単位が違うと、、、

世界共通の長さの単位「メートル (m)」の歴史

約230年前のフランス(フランス革命の頃)

- フランス国内だけでも約800の異なる長さや質量の単位
 - 提案: 世界共通の長さの単位を新しく作り、その基準として、誰にとっても受け入れやすいよう地球の大きさをを用いる
 - ダンケルクーバルセロナ間の測量にもとづきパリを通る子午線の長さを測定
 - 1 m: 子午線の北極から赤道までの距離の1000万分の1



長さの単位「メートル」の歴史

レーザーに関する科学技術の発展をうけて

→ 1983年：普遍的な物理定数である**真空中の光の速さ**にもとづきメートルを定義

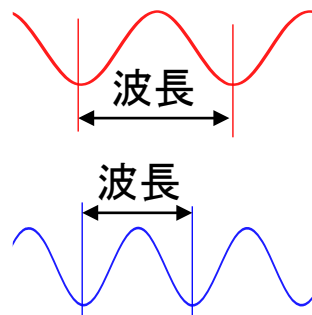
- 真空中の光の速さを $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ と定義
- 1秒の $1/(299\,792\,458)$ の時間に光が真空中を伝わる距離 → 1メートル

→ 特別な人工物に頼ることなく、光と技術さえあれば、誰でも、どこでも、高精度な長さの基準を作り出せる

- レーザー
 - 光としての特性を利用した「光のものさし」
 - 目盛りの基準：光の波長
 - ナノメートル（10億分の1メートル）オーダーの長さ測定が可能



光のものさし「レーザー」



光の波長を基準として、高精度に目盛りをつけることが可能

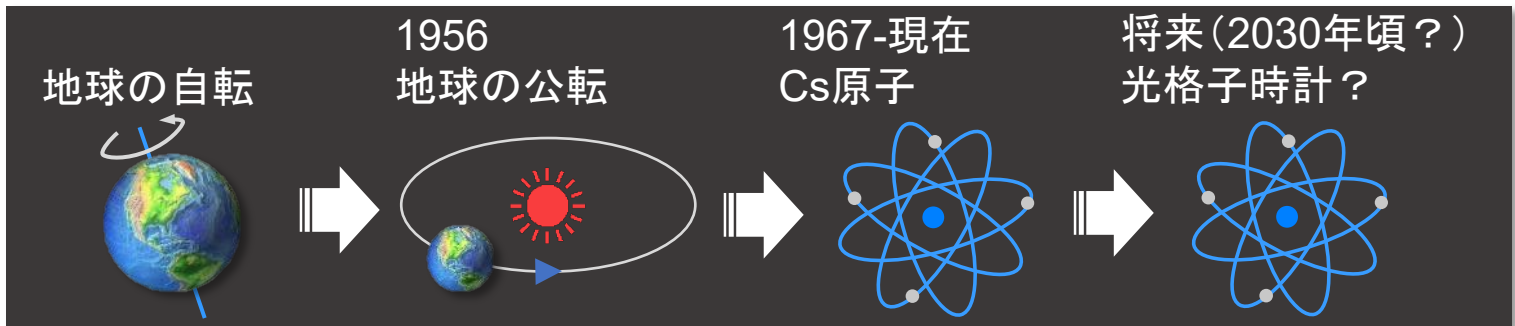
科学技術の発展にともなう単位の定義の進化

➤ メートル



メートル実現精度 10^{-4} \Rightarrow 10^{-7} \Rightarrow 10^{-9} \Rightarrow 10^{-13}

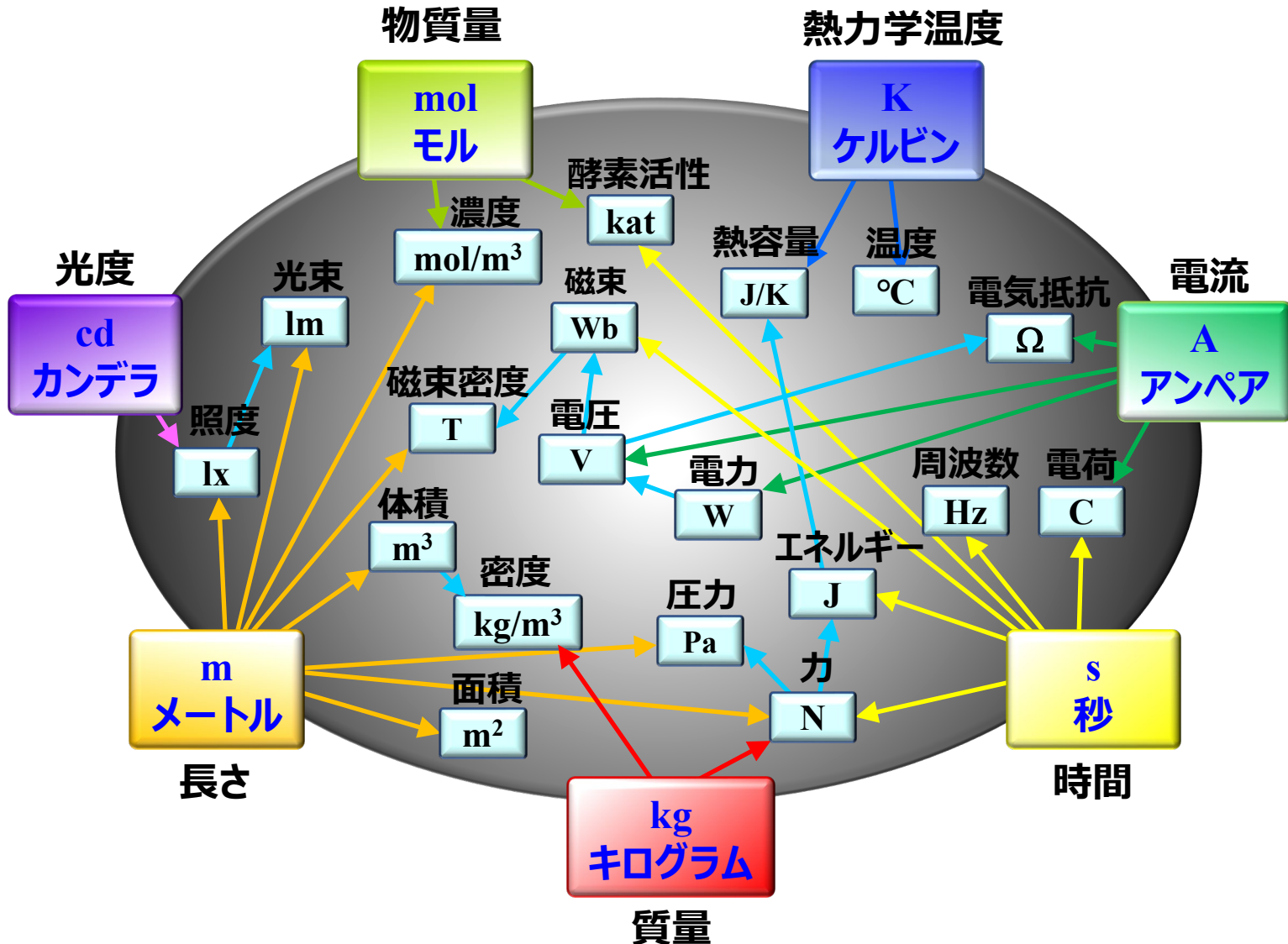
➤ 秒



秒実現の相対精度 10^{-8} \Rightarrow 10^{-10} \Rightarrow 10^{-15} \Rightarrow 10^{-18}

- 日頃何気なく用いている単位の定義は科学技術の発展とともに進化
- ナノメートル(10億分の1メートル)オーダーの正確な長さ測定を可能に
→ ナノテクノロジーの基盤確立に大きく貢献
- 測定の飛躍的な高精度化をもたらす定義の進化は科学技術の発展に不可欠

世界共通の単位のシステム: 国際単位系 (SI)



基本単位の定義（2019年5月19日時点）

- 7つの基本単位
 - メートル（長さ、m） : 真空中の光の速さ
 - 秒（時間、s） : セシウム原子に共鳴するマイクロ波の周期
 - ケルビン（温度、K） : 水の三重点の熱力学温度
 - キログラム（質量、kg） : 国際キログラム原器の質量
 - アンペア（電流、A） : 仮想的な導体を流れる電流
 - モル（物質量、mol） : ^{12}C 12 g中の原子数
 - カンデラ（光度、cd） : 540 THzの単色放射に対する視感効率
- 基本単位の定義：普遍的な物理定数あるいは物質固有の物理現象に基づく
- キログラム：人工物に依存する唯一の基本単位

質量の単位「キログラム」の歴史

約230年前のフランス(18世紀末、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

- 2019年5月19日までこの定義が継続



水1リットル



国際キログラム原器

- 130年間、同一の分銅が世界中の質量の基準として使われ続けた

1990年頃 表面の汚れなどために国際キログラム原器の質量が100年間で1億分の5 kg 程度変動した可能性

→ 「モノ」でないものでキログラムを定義しよう

2011年 将来、プランク定数にもとづく定義に移行する国際的合意

→ 国際キログラム原器への引退勧告

→ 1億分の5よりも高い精度でのプランク定数測定

指紋の1個分の質量!



プランク定数とキログラム

プランク定数 h

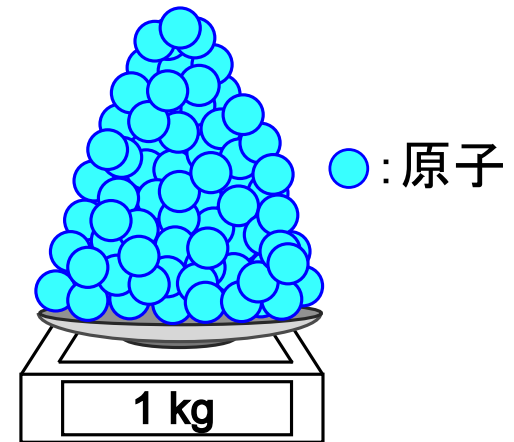
- 原子や分子の振る舞いを説明するための物理定数
- $h = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 662\ \dots\ \text{J s}$

プランク定数を基準として電子一個あたりの質量 m_e を導出可能

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

c : 真空中の光の速さ
 α : 微細構造定数
 R_∞ : リュードベリ定数

- 電子の質量と任意の原子(炭素、シリコン、酸素、、、)の質量の比は高い精度で分かっている
- 世界中どこでも変わらない様々な原子の質量を、プランク定数を基準として導出できる
- 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 kg を表現できる



プランク定数精密測定

➤ キップルバランス法

- 米国、英国、カナダ、フランス、スイス、韓国、トルコなど
- 電氣的測定によってプランク定数を測定



Bryan Kibble (1938 – 2016)

➤ X線結晶密度法

- 日本(産総研)、ドイツ、イタリアなど
- シリコン単結晶中の原子数を数えることによってプランク定数を測定

- キップルバランスの測定原理を開発



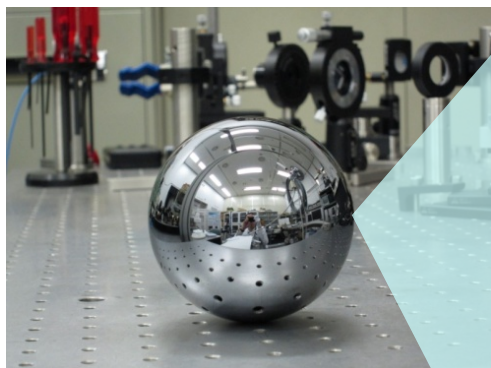
シリコン: ICなどの電子機器に
不可欠な半導体材料



シリコン単結晶インゴット
株式会社アキコーポレーションHP
<https://aki-si.jp/product/>

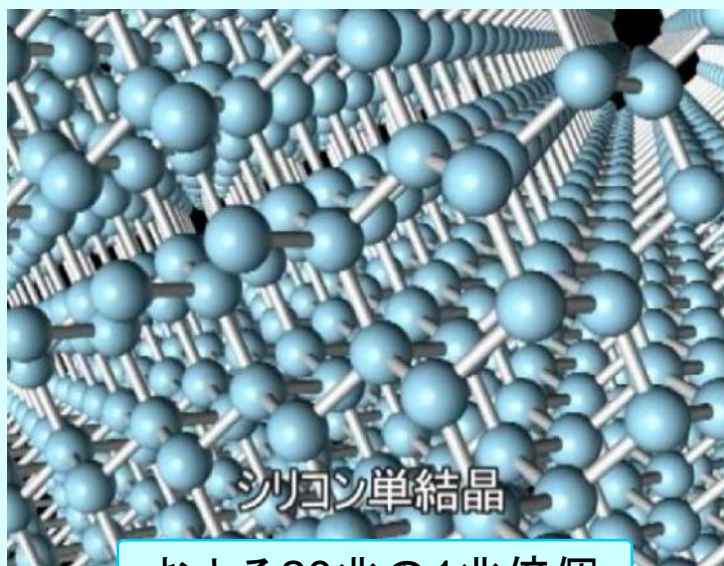
X線結晶密度法

原子1個の質量 \longleftrightarrow プランク定数



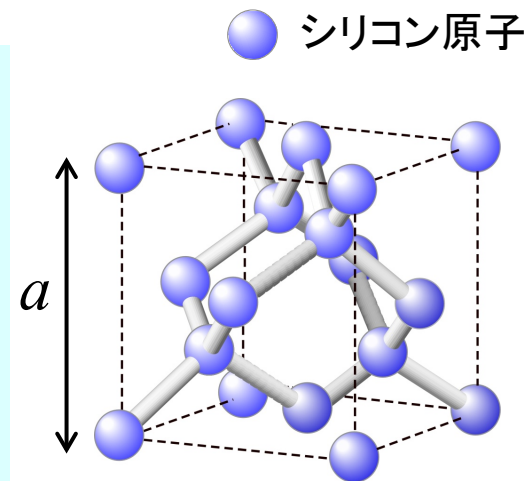
シリコン単結晶球体

- 質量: 約1 kg
- 体積: 約430 cm³



シリコン単結晶

およそ20兆の1兆倍個



シリコン結晶単位格子

- 8個のSi原子を含む

シリコン単結晶球体の質量と体積を測定

単位格子の体積 a^3 を測定

$$\text{シリコン単結晶球体中の原子数} = \frac{\text{シリコン球体の体積}}{a^3} \times 8$$

$$\text{シリコン原子1個の質量} = \frac{\text{シリコン球体の質量}}{\text{シリコン原子の数}}$$

▶▶▶ プランク定数

質量の異なるシリコン原子 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si

産総研によるX線結晶密度法を用いたプランク定数 h 測定 (2003)

- h の測定精度: 1億分の20
- 国際キログラム原器の質量の長期安定性: 1億分の5

シリコン: 3種類の同位体

- 同位体: 原子量(質量)が異なる
- $^{28}\text{Si} : ^{29}\text{Si} : ^{30}\text{Si} = \text{約 } 92\% : \text{約 } 5\% : \text{約 } 3\%$

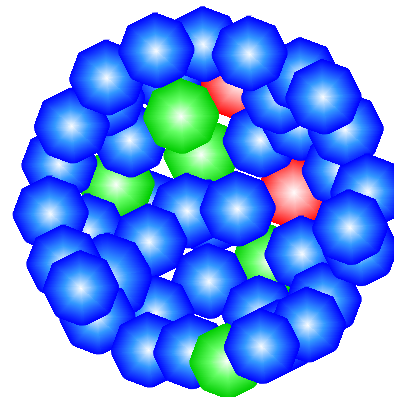


$^{28}\text{Si} : 99.99\%$

h		^{28}Si	
h		^{29}Si	
h		^{30}Si	

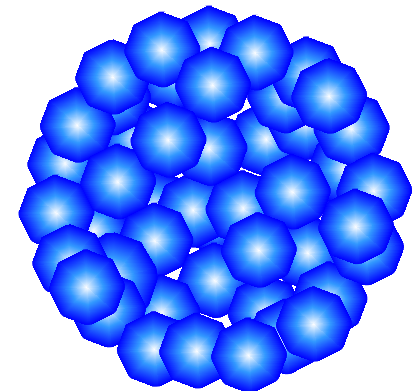
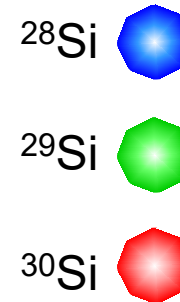
- $^{28}\text{Si} : ^{29}\text{Si} : ^{30}\text{Si} = ?\% : ?\% : ?\%$
- 高精度な同位体存在比測定が必要

自然同位体比Si単結晶



1×10^{-7} (1億分の10)

^{28}Si 同位体濃縮単結晶



1×10^{-8} (1億分の1)









同位体存在比の測定精度

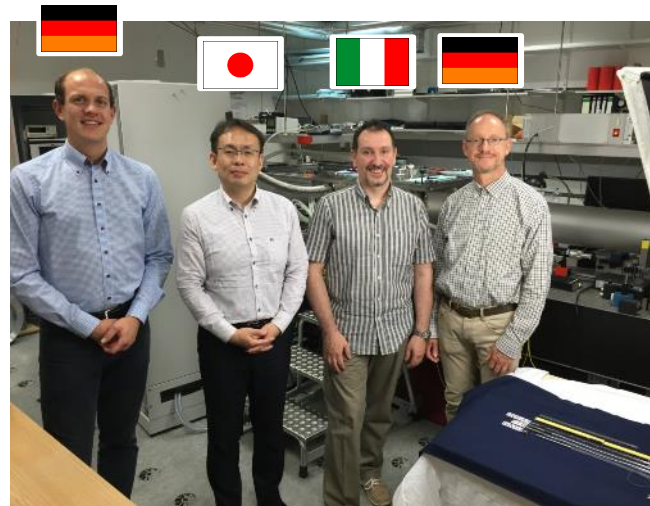
アボガドロ国際プロジェクト

ターゲット

- ^{28}Si 同位体濃縮結晶の製作
- プランク定数高精度測定

プロジェクト参加機関

-  産業技術総合研究所 (AIST)
-  国際度量衡局 (BIPM)
-  イタリア計量研究所 (INRIM)
-  欧州標準物質計測研究所 (IRMM)
-  米国標準技術研究所 (NIST)
-  オーストラリア計量研究所 (NMIA)
-  英国物理研究所 (NPL)
-  ドイツ物理工学研究所 (PTB)



国際共同測定@ PTB in 2016

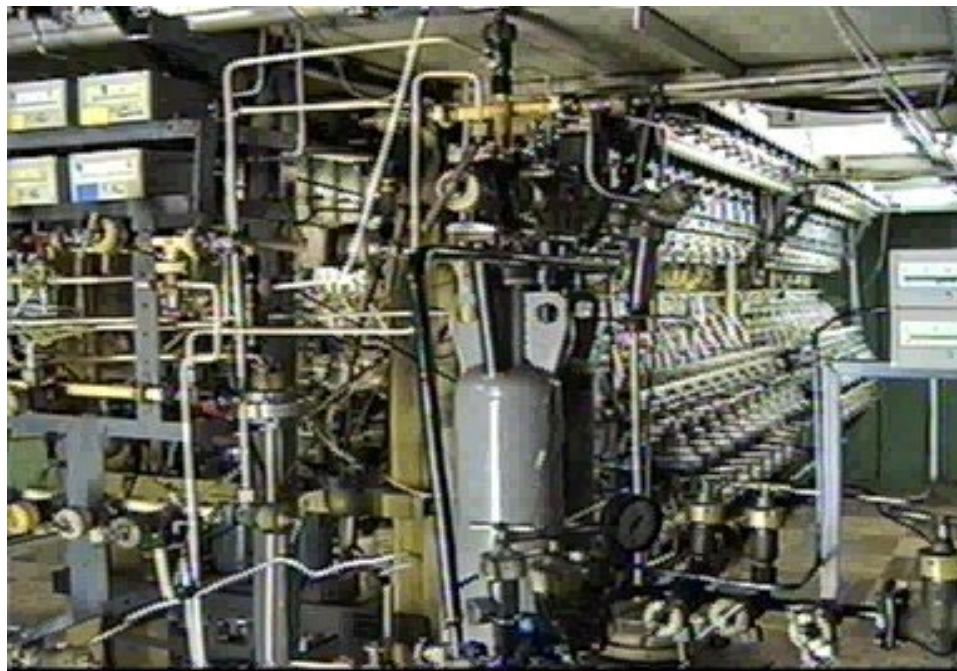


プロジェクト会合@ NMIA in 2008

遠心分離法を用いた ^{28}Si 濃縮

ロシアの研究機関による同位体濃縮

- 気体状態にしたシリコン(SiF_4)を遠心分離器内で高速に回転
- 各同位体にかかる遠心力の差を利用して濃縮



230台の遠心分離器が直列に接続された同位体濃縮システム



約2年をかけて $^{28}\text{SiF}_4$ ガス(28 kg)を作成

	原子量
^{28}Si	27.976 926 53246
^{29}Si	28.976 494 7005
^{30}Si	29.973 770 171

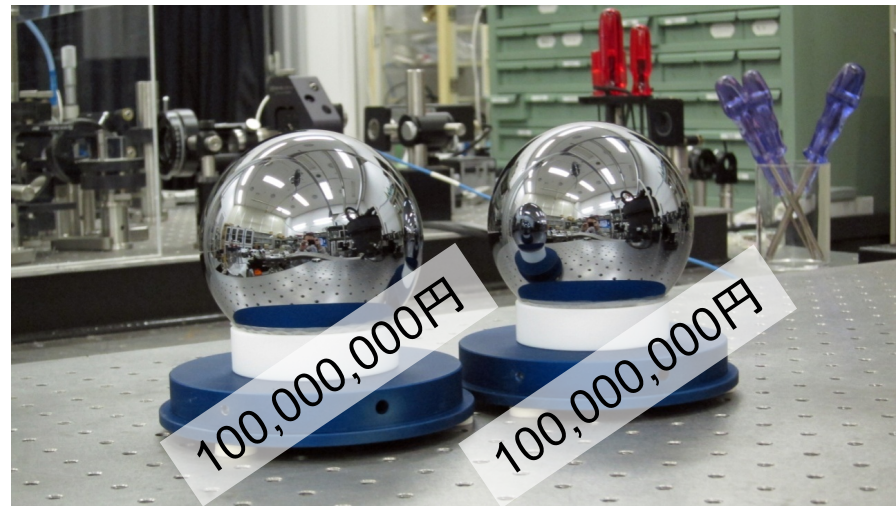
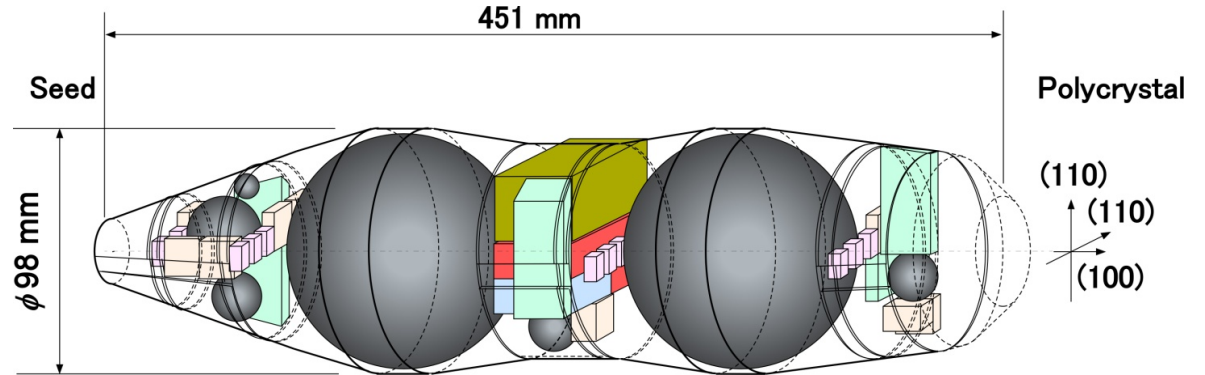
^{28}Si 同位体濃縮結晶



500,000,000円

^{28}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}Si 球体

- 体積や質量などを様々な研究機関において測定

28Si 単結晶球体の研磨



A. Leistner (CSIRO)

10 m 未満



1 kg シリコン単結晶球体研磨

- 上下二つの回転するリング状の砥石を用いた研磨
 - 最大直径と最小直径の差: 100 ナノメートル以下
- 球体を地球サイズにまで拡大しても、最大直径と最小直径の差は10 m未満

球体体積の測定

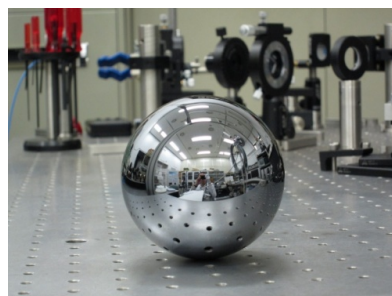
- 様々な方位からの直径測定
- 平均直径から高精度に体積を導出可能

プランク定数を1億分の5をしのぐ精度で測定するためには

プランク定数決定に必要なパラメーター

- 球体質量
- 球体体積
- モル質量
- 格子定数

これらをすべて1億分の5より高い精度で測定しなければなりません



シリコン単結晶球体

- 質量: 約 1 kg
- 直径: 約 94 mm

球体の直径を1.5 ナノメートルよりも良い精度で測定

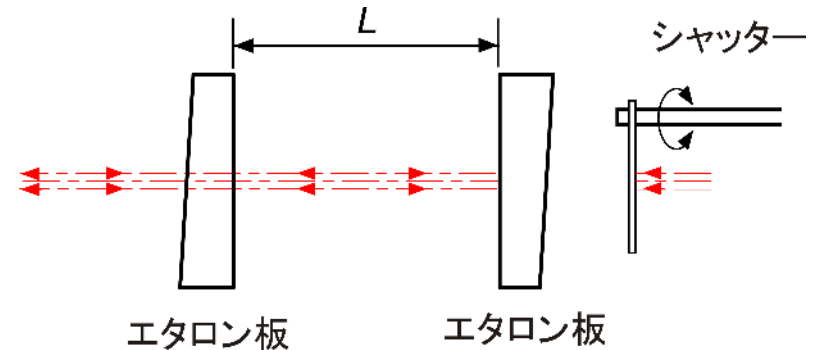
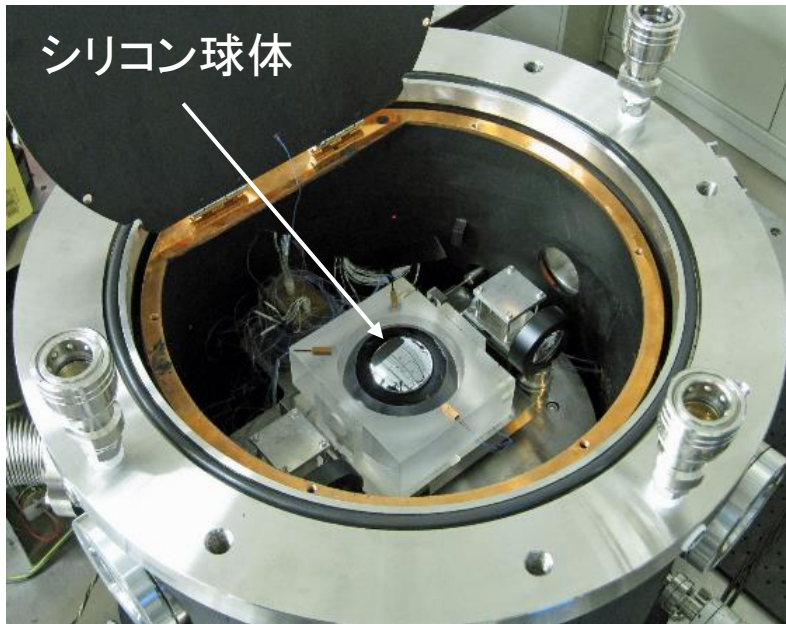
- 1.5 ナノメートル: シリコン原子約10個



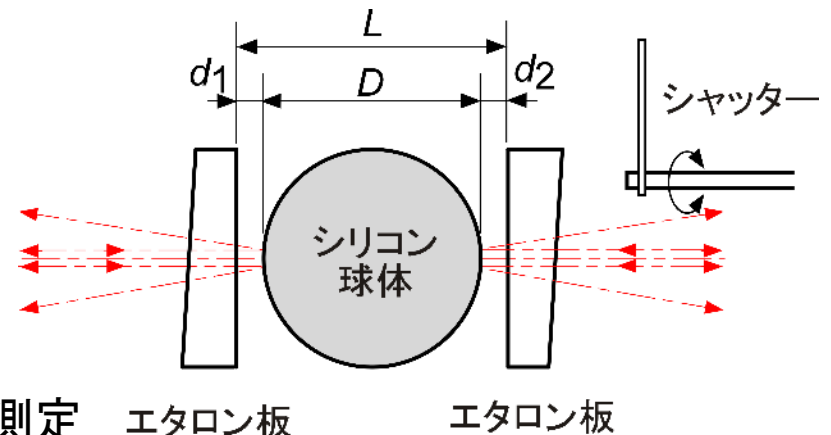
球体の直径を原子サイズの精度で測定する装置を開発する必要

シリコン球体体積測定

- エタロン板同士の間隔 L の測定



- エタロン板と球体表面の間隔 d_1 、 d_2 の測定



球体体積測定用レーザー干渉計

- 球体直径を「光のものさし」レーザーを使って測定
 - レーザーの波長が正確にわかっている必要
- 球体を回転させ、様々な方位から直径を測定

球体直径測定原理

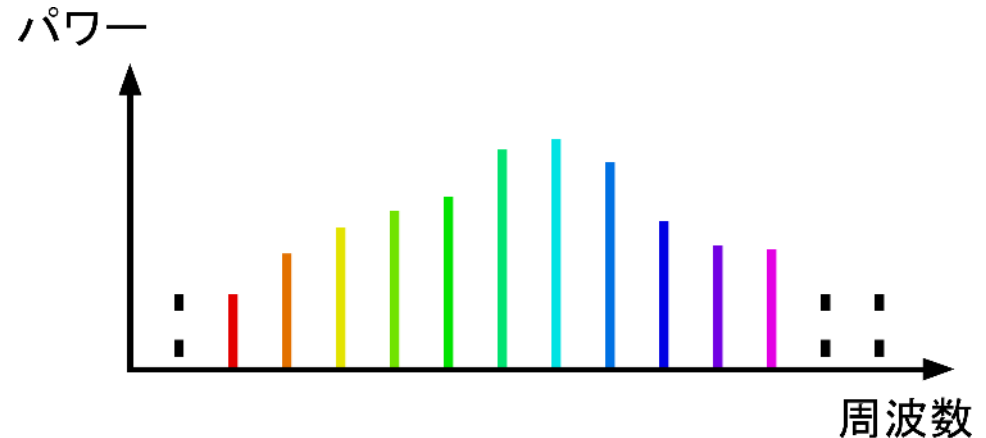
- $D = L - (d_1 + d_2)$

光の波長にもとづく「長さ」の国家標準：光周波数コム



光周波数コム

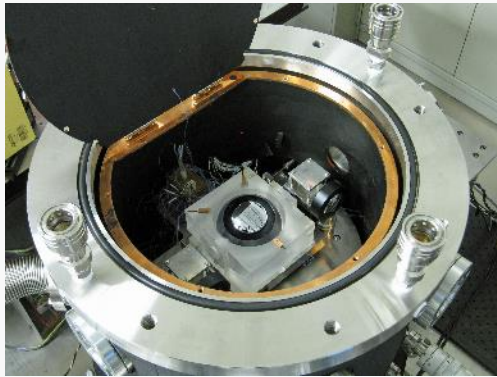
- 光の波長にもとづく長さの国家標準
- 協定世界時に基づき制御
- 光波長精度：14桁



- 様々な色の光からなるレーザー
- 各色の波長は正確にわかっている
- 「光のものさし」であるレーザーに正確に目盛りを付けることが可能

光周波数コムを基準とする球体直径測定方位

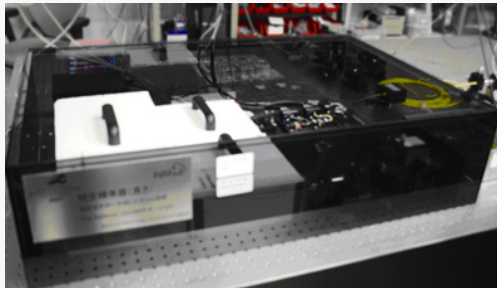
1F



球体直径測定用レーザー干渉計

- 光のものさしの基準に国家標準を直接用いることで高精度に球体直径を測定

B1F

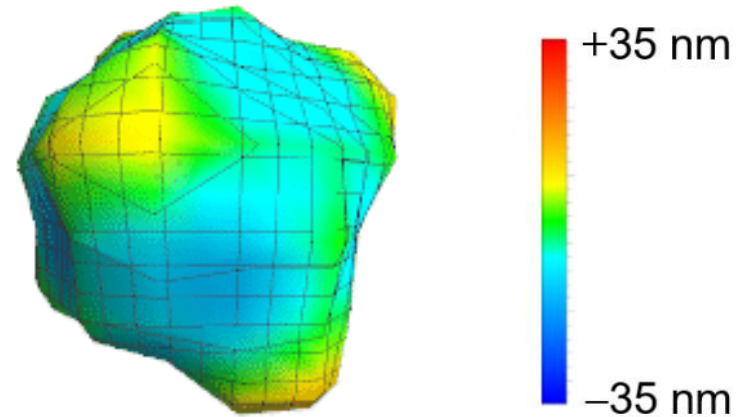
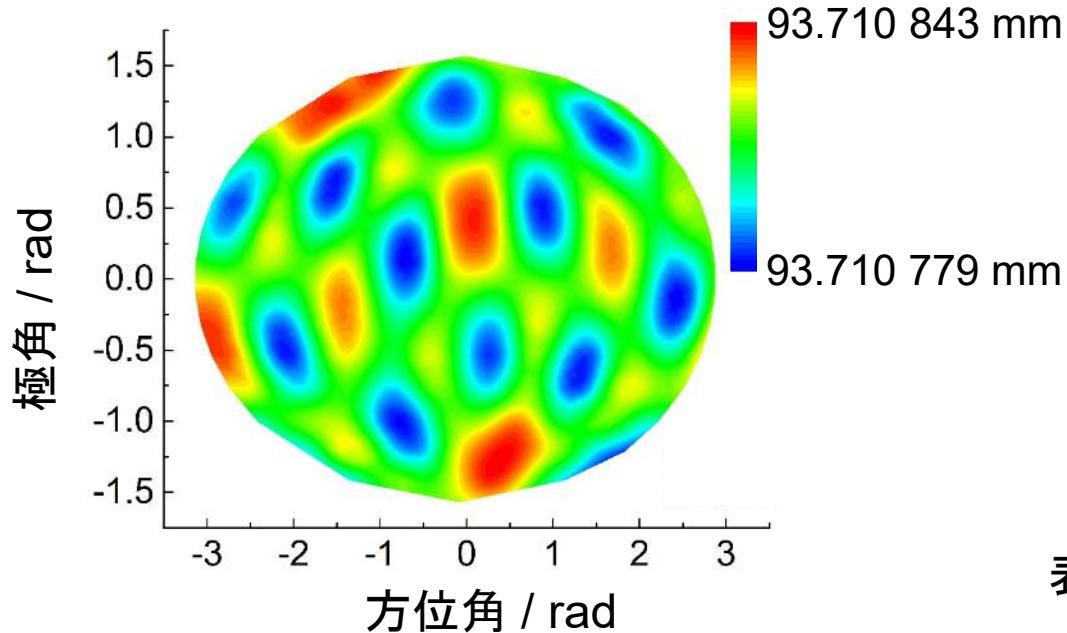


光ファイバー(40 m)

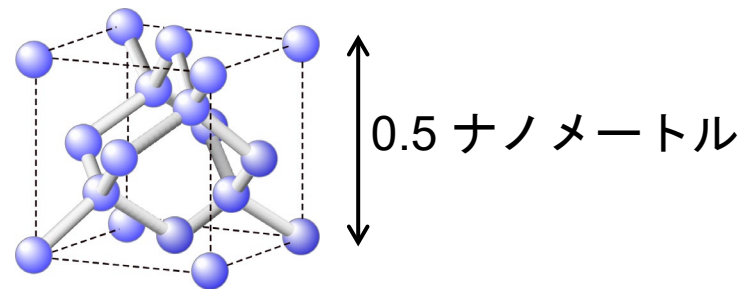
光周波数コム

- 光の波長(長さ)の国家標準

シリコン球体直径測定



表面の凹凸を強調した球体三次元図

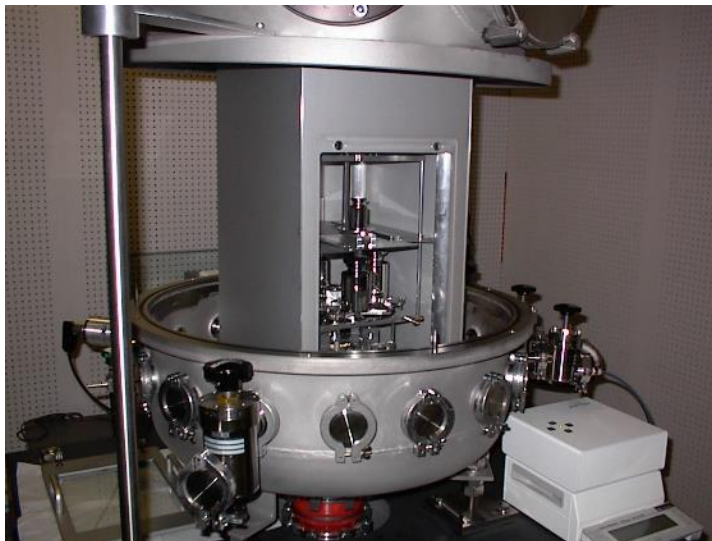


シリコン結晶単位格子

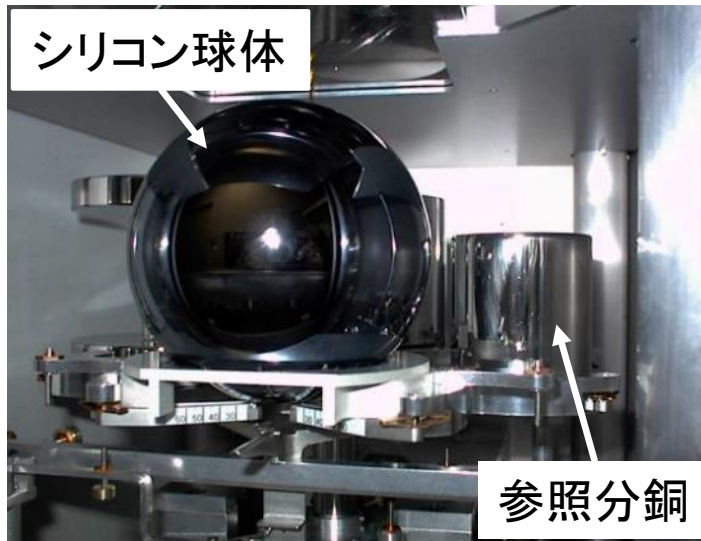
直径測定値の分布図(モルワイデ図法)

- 直径測定精度: 0.6 ナノメートル
- 直径測定方位数: 2175
- 球体体積測定精度: 1億分の2
- 日、独、豪、伊、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

シリコン球体質量測定



球体質量測定用真空天びん

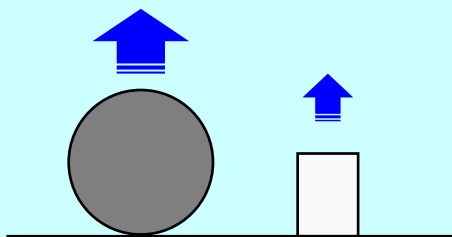


参照分銅とシリコン球体の質量比較の様子



日本国キログラム原器

空気浮力の大きさは物体の体積に比例



真空中での質量比較が可能

→ 空気浮力の影響の評価が不要

球体質量測定精度：10億分の6 kg

日本国キログラム原器

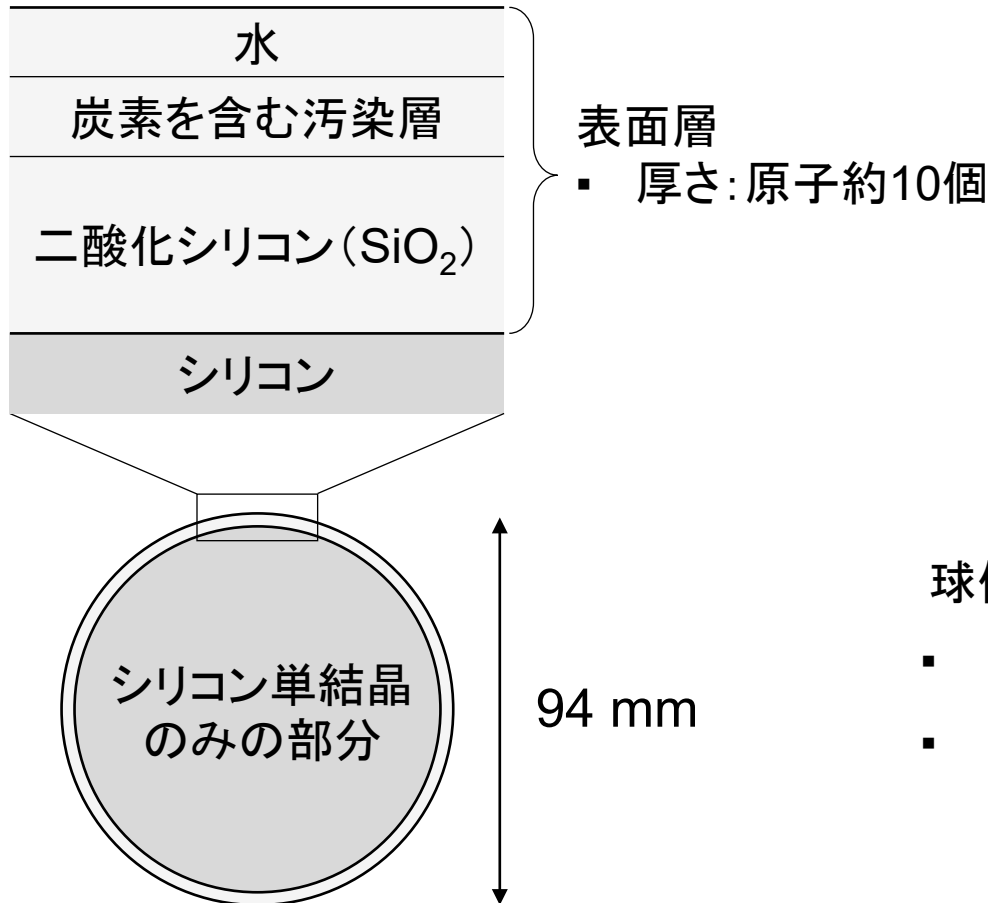


日本国キログラム原器

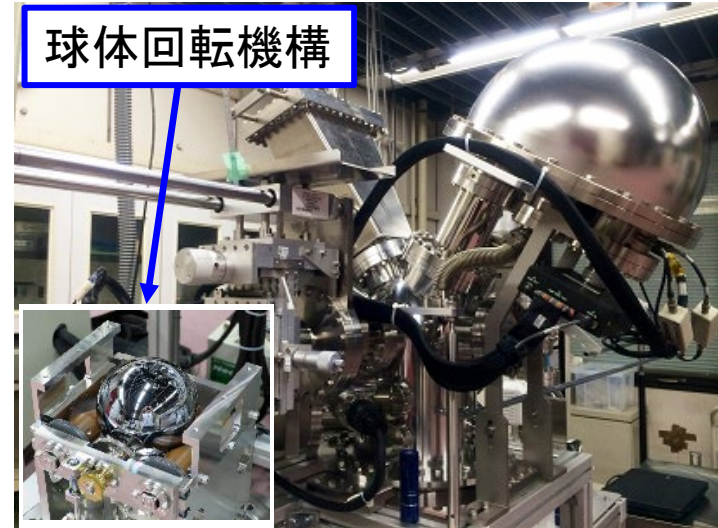
引用元: 朝日新聞デジタル <https://www.asahi.com/articles/ASLC646QRCLC6ULBJ00D.html>

- 国際キログラム原器の複製の一つ (No.6、同じ材質、ほぼ同じ質量)
- 1889年にパリから日本に輸送され、我が国の質量の国家標準として運用
- 産総研の地下に設置された金庫室で厳重に管理

シリコン球体表面分析



シリコン球体表面モデル



球体表面分析用X線光電子分光法システム

- 分析の基準: 薄膜分析用国家標準
- 分析結果から表面層の質量と体積を評価



- 表面層の質量と体積を、球体全体の質量と体積から差し引き、シリコン単結晶のみの部分の質量と体積を決定

プランク定数測定結果

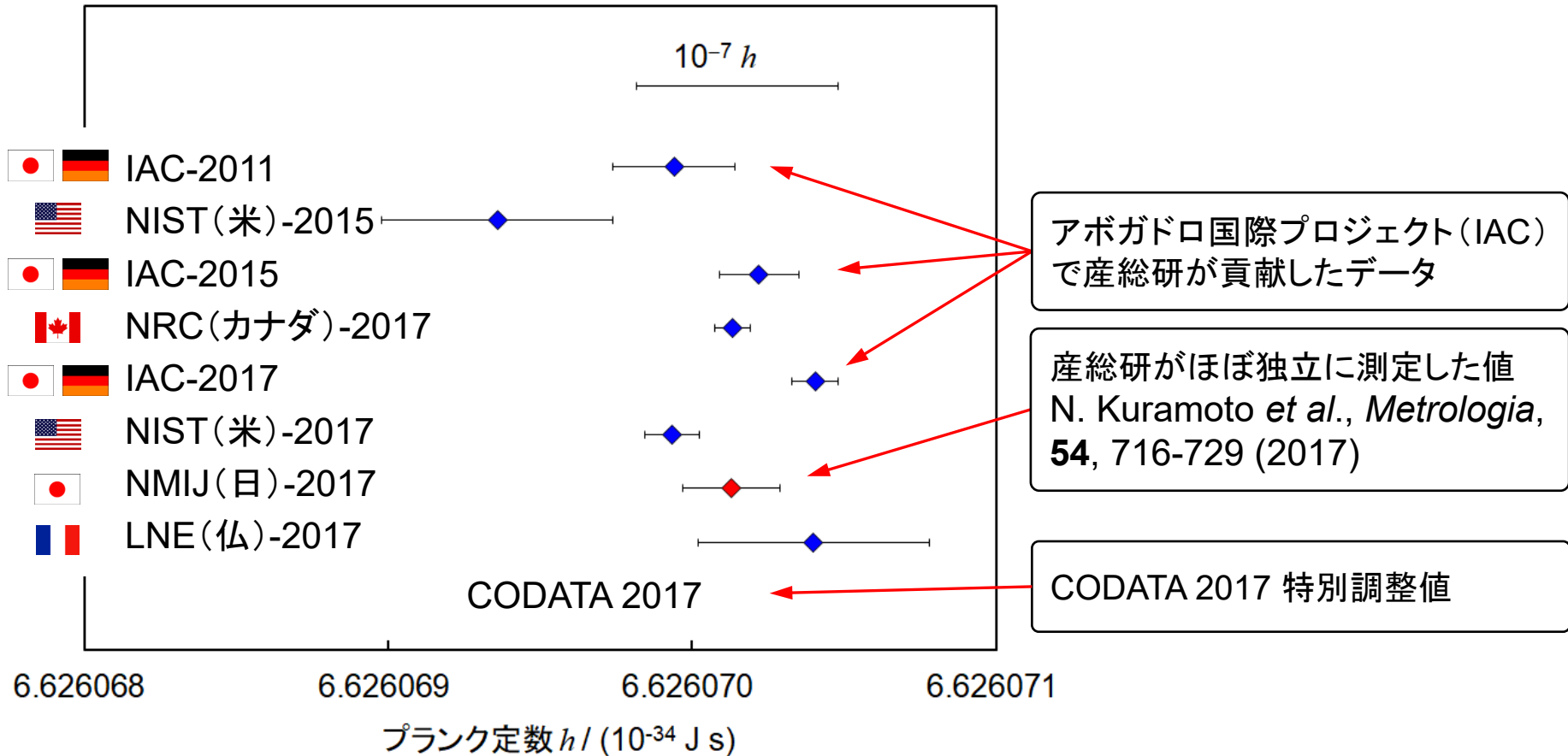
- $h = 6.626\ 070\ 13(16) \times 10^{-34}$ J s, 測定精度 : 1億分の2.4
 - N. Kuramoto *et al.*, *Metrologia*, **54**, 716-729 (2017)
- 国際キログラム原器の質量の長期安定性(1億分の5)をしのご

- 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:「**特別調整値**」(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った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)にもとづき特別調整値を決定
- 産総研: 4つのデータの測定に貢献、そのうち1つは産総研がほぼ独立に測定

新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定

特別調整値決定の詳細をまとめた論文 D. Newell *et al.*, *Metrologia*, **55**, L13, 2018

Source	Identification ^a		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)			$\times 10^{-34} \text{ J s}$
Azuma <i>et al</i> (2015)			$\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Azuma <i>et al</i> (2015)			$\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Bartl <i>et al</i> (2017)			$\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
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



新たなキログラムの基準 (CODATA 特別調整値): $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$

- 明治22年以来、130年ぶりとなるキログラムの定義改定が実現
- 近代度量衡の歴史上初となる、物理定数を基準とする質量の単位の確立
- 科学の歴史に残る値の決定に、日本の研究所や日本人の研究者の名前が今後も明確に残り続けるかたちで貢献

メートル条約にもとづく定義改定の決議

➤ 2018年11月13日～16日

第26回国際度量衡総会(メートル条約の最高議決機関)@フランス・ベルサイユ

- プランク定数を基準とする新たな定義への移行案を承認



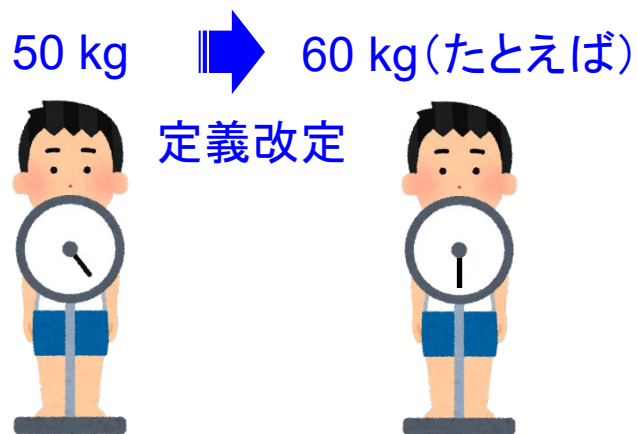
第26回国際度量衡総会@ベルサイユ

引用元: YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=qA67T7FPBME>

➤ 2019年5月20日(世界計量記念日):新たな定義の施行

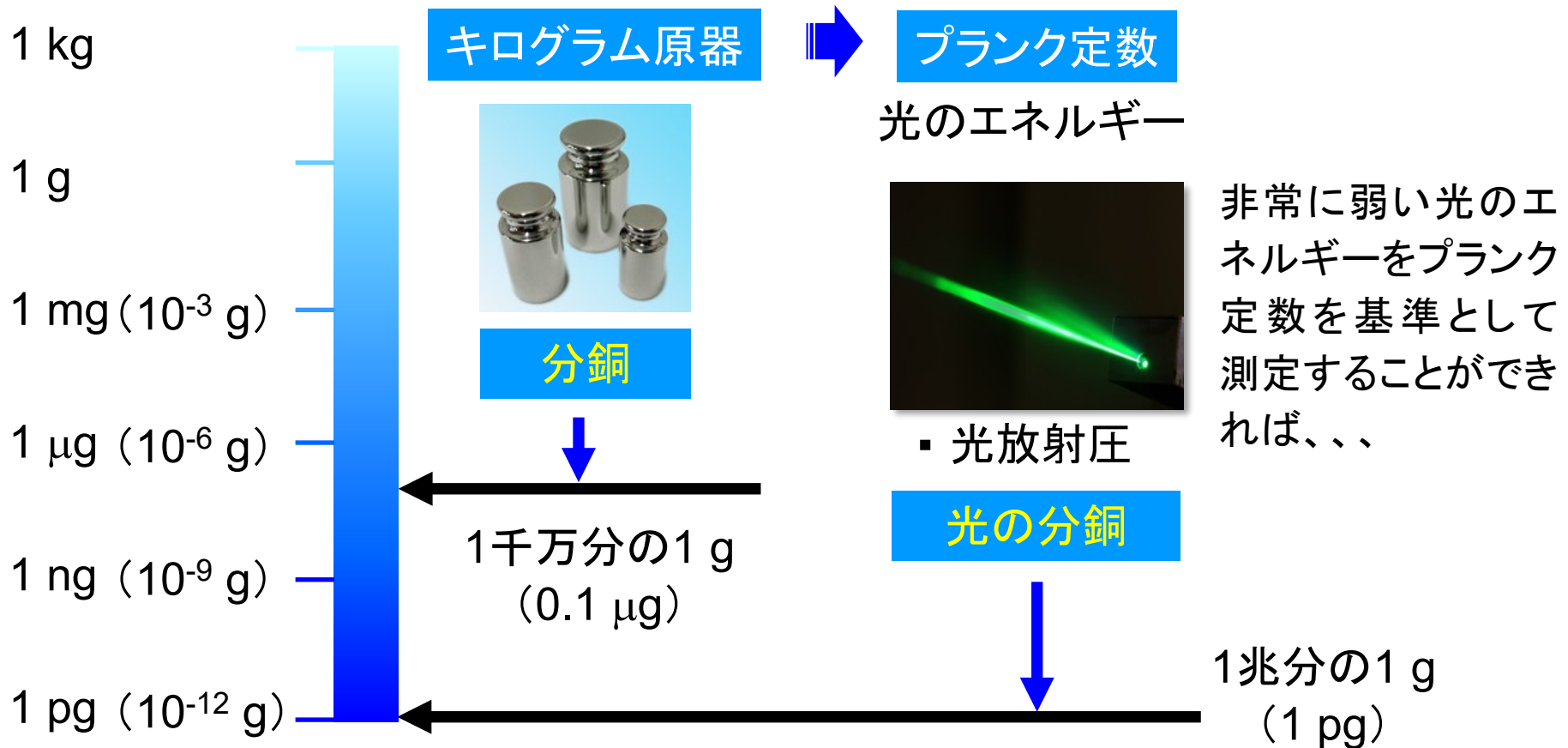
定義の改定がもたらす影響

- 日常生活では、その影響をすぐには感じることはありません。
- プランク定数は国際キログラム原器の質量にもとづいて決定されているからです。
→ 定義改定の影響で、はかりの指示値が正しくなくなることはありません。



プランク定数が国際キログラム原器の質量
を基準にして決められていないと、、、

新たなキログラムの定義がもたらす影響



- ピコグラム(1兆分の1 g)オーダーの正確な質量測定が可能に
- 微小な質量の測定を実現するための技術基盤

キログラムの定義改定の質量の国家標準への影響

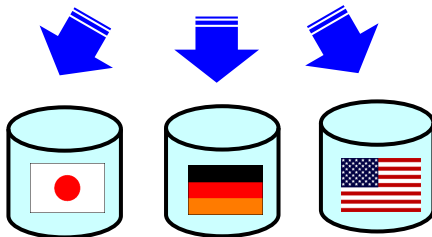
定義改定前

定義: 国際キログラム原器の質量

国際度量衡局



- 天びんによる質量比較



各国のキログラム原器

- 国際キログラム原器にもとづき、各国の国家標準(キログラム原器)の質量を測定
- 各国の国家標準の精度は一定

定義改定後

定義: プランク定数

産総研

ドイツ

カナダ

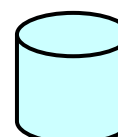
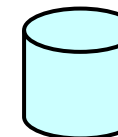
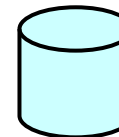
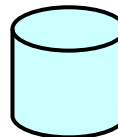
米国

X線結晶密度法

X線結晶密度法

キップルバランス法

キップルバランス法



各国の国家標準

- 独自に国家標準の質量を測定することが可能
 - 国家標準の精度は、各国の技術力によって変動
- 産業技術力強化のために、国家標準の精度を高める研究開発を各国がそれぞれ実施

プランク定数にもとづく質量の国家基準の作り方

プランク定数の定義値 → シリコン原子の質量 m_{Si}
 球体体積測定など → 球体中のシリコン原子の数 n_{Si}



$m_{Si} \times n_{Si}$
 シリコン単結晶のみの部分の質量

+

球体表面分析 → 球体表面層の質量 m_{SL}



表面層の質量 m_{SL}

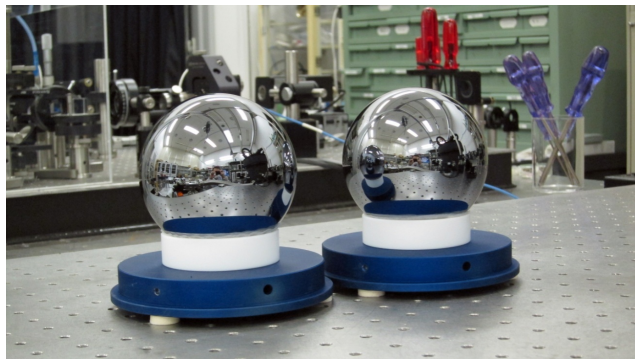


$(m_{Si} \times n_{Si}) + m_{SL}$

シリコン球体質量



・ 天びんによる質量比較



^{28}Si 単結晶球体

- 定義改定後:プランク定数にもとづき質量の基準を作り出す役割を担う



シリコン球体表面モデル



質量の国家標準

新しい定義は未来の人類を鼓舞するメッセージ

新しいキログラムの定義

キログラムは、プランク定数を $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J sと定めることによって定義される

- キログラムとプランク定数がどのように結びつけられるかをイメージしづらい

➤ ただし、

「キログラムは、 $5.018 \dots \times 10^{25}$ 個の炭素原子 ^{12}C の質量に等しい」

のような具体的な定義にしてしまうと



➤ この定義の文言にとらわれすぎて、将来、現在では想像もつかないような、プランク定数とキログラムを結びつける技術の開発に誰も取り組まなくなってしまうかもしれない

→ 新たな定義: 必要最低限の文言

➤ 新たな定義は、未来の人類が、より自由な発想でキログラムとプランク定数を結びつける技術の開発に取り組むよう鼓舞する私達からのメッセージ

まとめ

- 様々な計測技術の進歩によって、プランク定数の測定精度が国際キログラム原器の質量の長期安定性よりも良くなりました。
- 2019年5月20日、プランク定数にもとづく新たな定義が施行されました。
- 科学の歴史に残るキログラムの定義改定に、日本の研究機関や日本人の研究者の名前が今後も明確に残り続けるかたちで貢献することができました。
- 定義改定は、微小な質量を高精度に測定する技術創出のトリガーとなることが期待されています。

キログラム定義改定にかかわった産総研関係者

東 康史、稲場 肇、大久保 章、黒河 明、田中 充、張 ルウルウ、中山 貫、
成川 知弘、日置 昭治、藤井 賢一、藤田 一慧、藤本 弘之、水島 茂喜、
山澤 一彰、早稻田 篤 (50音順)

外部研究費

- 科研費 基盤研究(B) 24360037:二次元ダークフリンジ法による球体直径測定原理開発とアボガドロ定数精密決定への応用、2012年 - 2014年、研究代表者:倉本直樹
- 科研費 基盤研究(B) 16H03901 :質量の単位「キログラム」を基礎物理定数によって定義するための研究開発、2016年 - 2018年、研究代表者:倉本直樹
- 科研費 基盤研究(B) 20H02630 :プランク定数にもとづくキログラムの新たな定義を利用した微小質量測定方法の開発、2020年 - 2022年、研究代表者:倉本直樹

ご静聴ありがとうございました

- キログラムの定義改定にかかる詳細な情報は、産業技術総合研究所 質量標準研究グループHPに掲載されております。

<https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/>

- ご不明な点があれば、下記のメールアドレスまでお知らせください。

産業技術総合研究所 質量標準研究グループ長 倉本直樹

n.kuramoto@aist.go.jp