

量子计量

曾长淦

<http://ldp.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学物理学院/ICQD

2024年12月3日

计量是实现测量单位统一，保证量值准确可靠的活动

王大珩：计量学是提高物理量量化精确度的科学，是物理的基础和前沿。

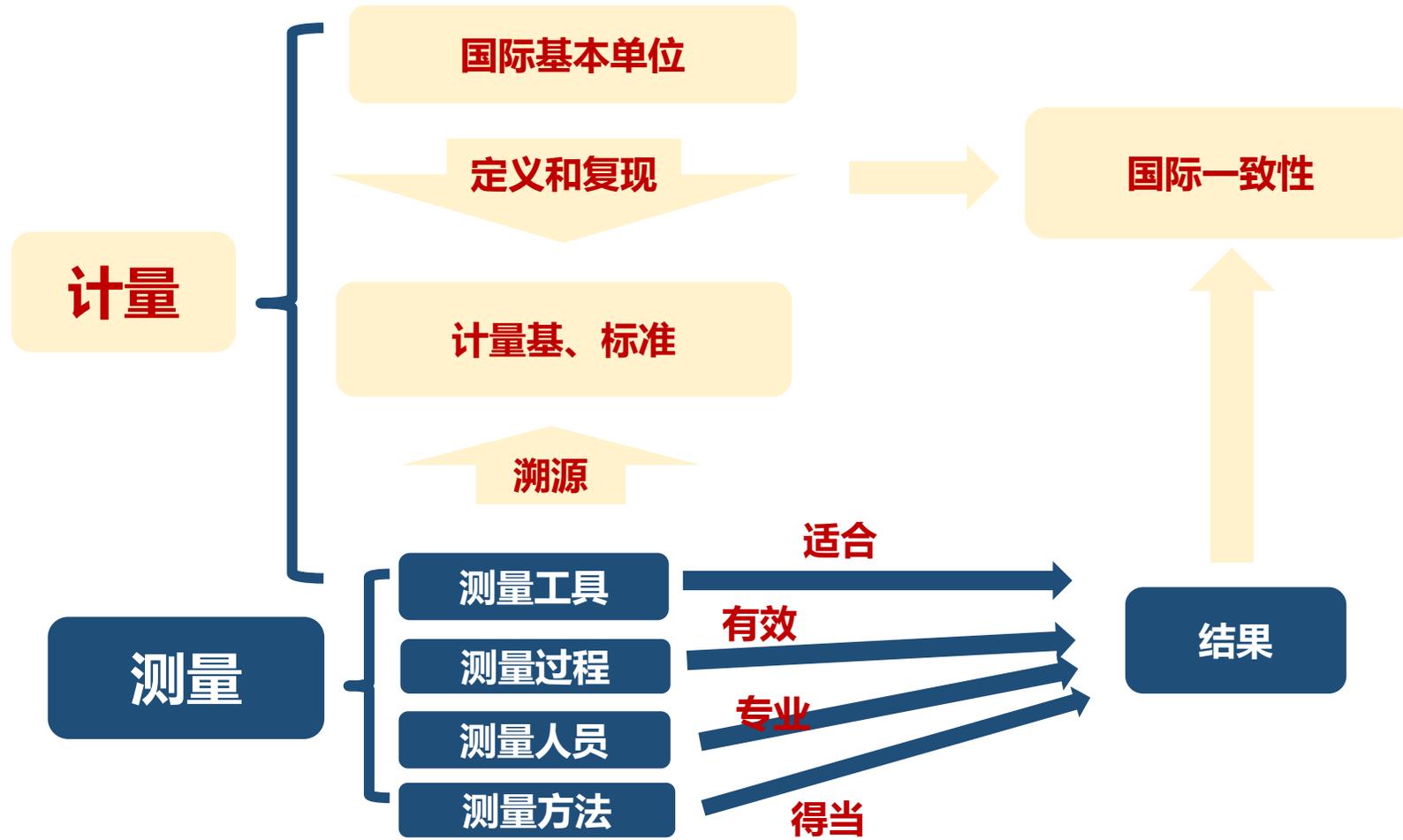
John. Hall (2005年诺贝尔物理奖得主)：计量学是科学之母 (Metrology is Mother of Science)，它是理论与实验之间的桥梁，提供物理进展的方法。



科技发展、经贸活动、国家安全等均依赖于计量技术

- **国家主权的象征**
- **国家核心竞争力的标志之一**
- **国家质量基础的核心**

计量体系



计量-测量关系

□ 计量属于测量的一种，但不同于测量

- **测量**：为确定量值而进行的全部操作，是对非量化实物的量化过程，其目的是用数据描述事物。
- **计量**：实现单位统一保障量值准确可靠的活动。
- **准确性、一致性、溯源性和法制性**是计量最重要的四个特征，测量则不必具备以上所有特征。
- 计量属于测量的一种，源于测量而又严于测量。
- 整体来看，计量科学主要有两项任务，一是一切事物只要可以测量，就要测得更准；二是一切尚不可测量的事物，要实现对其可测量。

计量重要性

贸易公平需要计量



统一的度量器具、单位是贸易公平的基础



秦始皇统一度量衡

计量误差导致严重后果

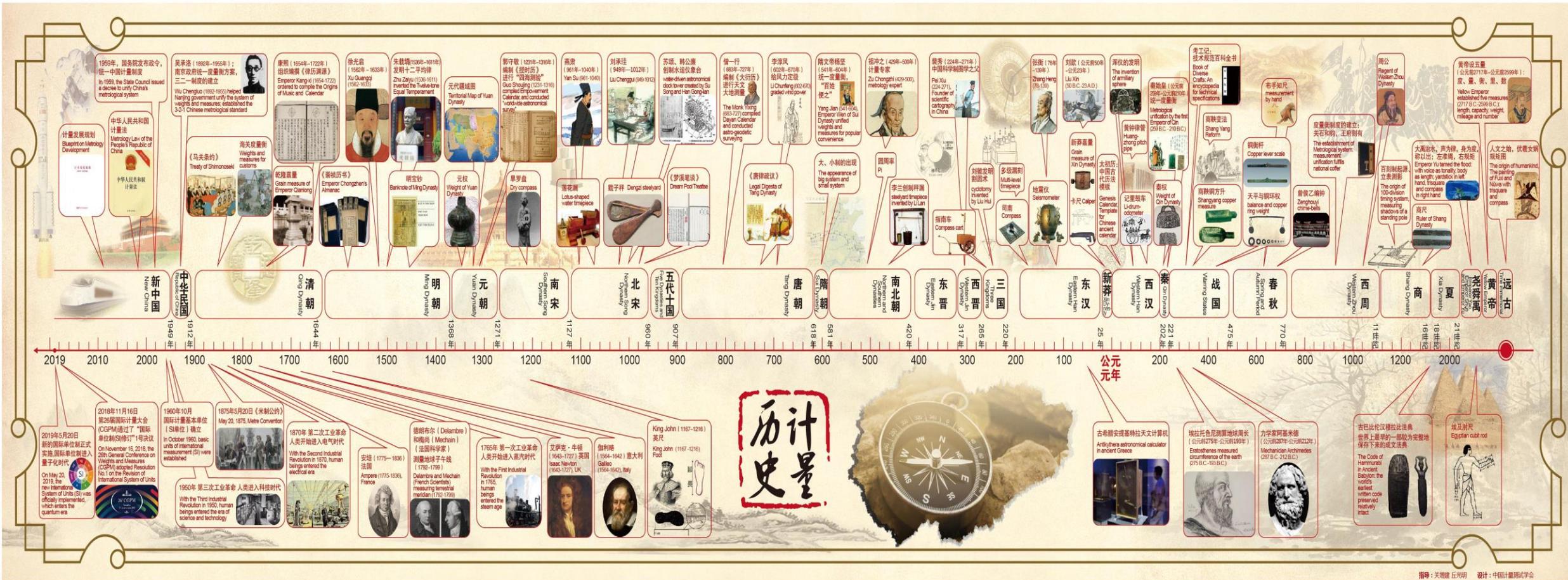


抗美援朝战场炮弹炮膛尺寸不统一

炸膛事故频发

促使我国国防计量体系建立

计量发展



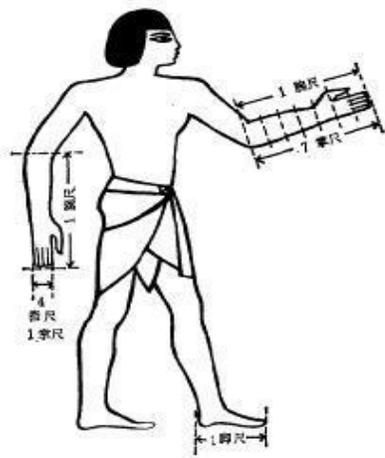
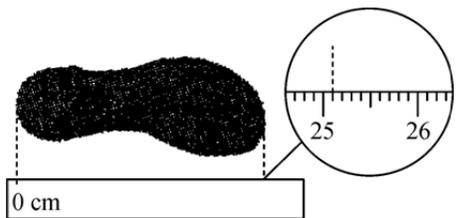
计量历史是人类认识世界的发展史

计量是人类定义世界的标尺，是经济发展、工业生产、科技进步的重要支柱

指导: 关德隆 丘光明 设计: 中国计量测试学会

计量发展

□ 第一阶段 以身体为计量单位



□ 第二阶段 以自然物特征为基本单位

《汉书·律历志》：“度者……本起黄钟之长。以子谷秬黍中者，一黍之广度之，九十分黄钟之长，一为一分。”

1066年，英国的1英寸：3颗大麦首尾相连的长度；1英尺：36颗大麦首尾相连的长度。

印度1英寸：3颗大米首尾相连的长度；1英尺：36颗大米首尾相连的长度。



□ 第三阶段 以人造物为标准

黄钟律管

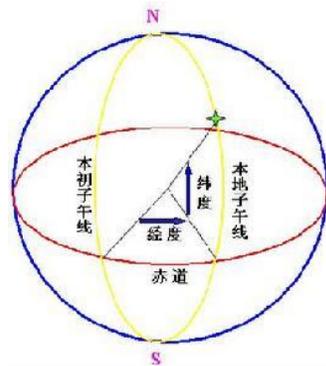


壁羨度尺



《周禮·考工記·玉人》：“壁羨度尺，好三寸，以爲度。”

□ 第四阶段 以“不变物”特征为基本单位



1791年3月25日，法国国民议会决定采纳了只基于一个长度基本单位“米”的计量制度。

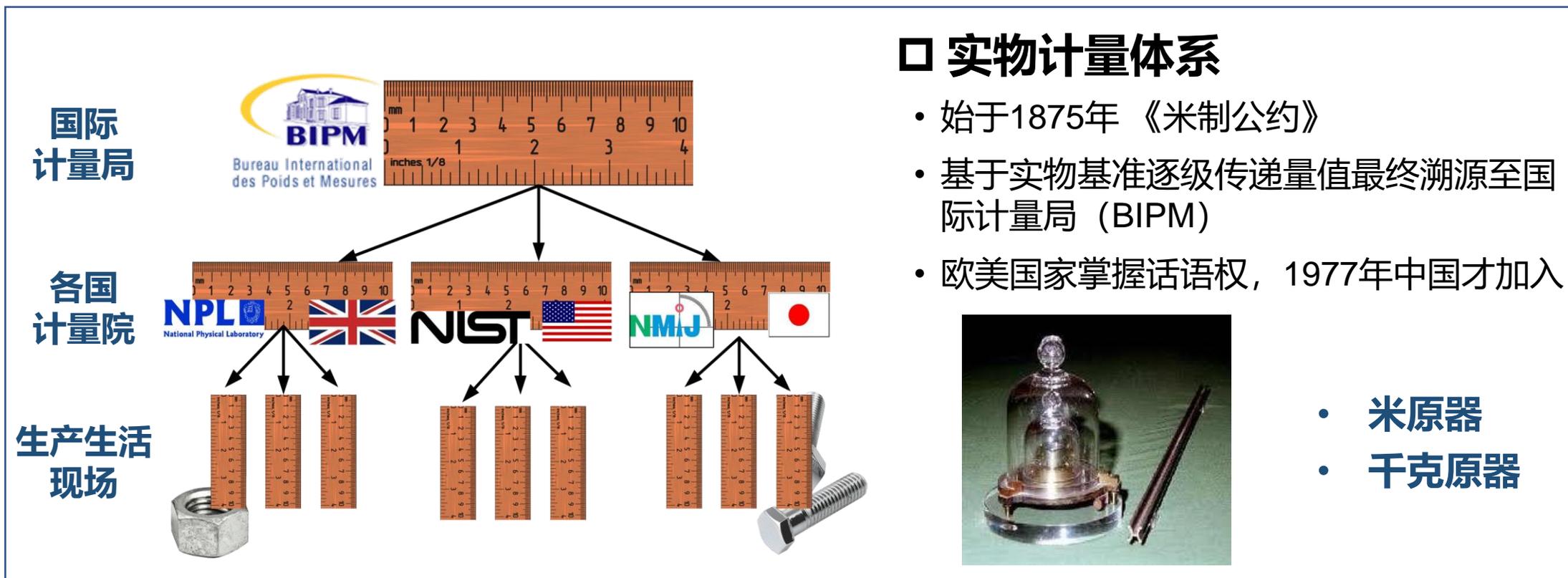
米制公约

□ 通过计量基准逐级传递量值到用户端

- 计量基准：以现代科学技术所能达到的**最高准确度和稳定性**保存和复现基本的计量单位

□ 实物计量体系

- 始于1875年 《米制公约》
- 基于实物基准逐级传递量值最终溯源至国际计量局 (BIPM)
- 欧美国家掌握话语权，1977年中国才加入



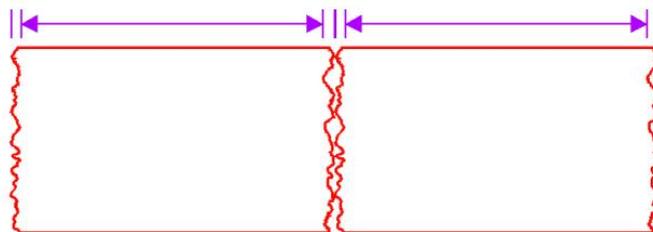
欧美国家对计量的重视支撑了近现代工业的发展

- 四十多个国家将计量写入宪法
- 德国成立PTB有力支撑了工业技术发展

实物计量弊端

□ 实物计量体系弊端

- 精度难以提升
- 实物基准本身存在不稳定性
- 复杂传递中逐级损失精度



□ 米原器

- 精度最高0.1微米
- 刻度难以准确读取



□ 千克原器

- 100多年变化50微克量级
- 量值传递复杂

能否通过不变的量定义和复现基本单位?

量子计量思想起源

如果希望得到绝对恒久的标准，我们不能以地球的大小或运动来寻找，而应以波长、振动周期和这些永恒不变的绝对数值，来寻找永恒不变且完全相似的计量单元。

----- Jame Clerk Maxwell 1870

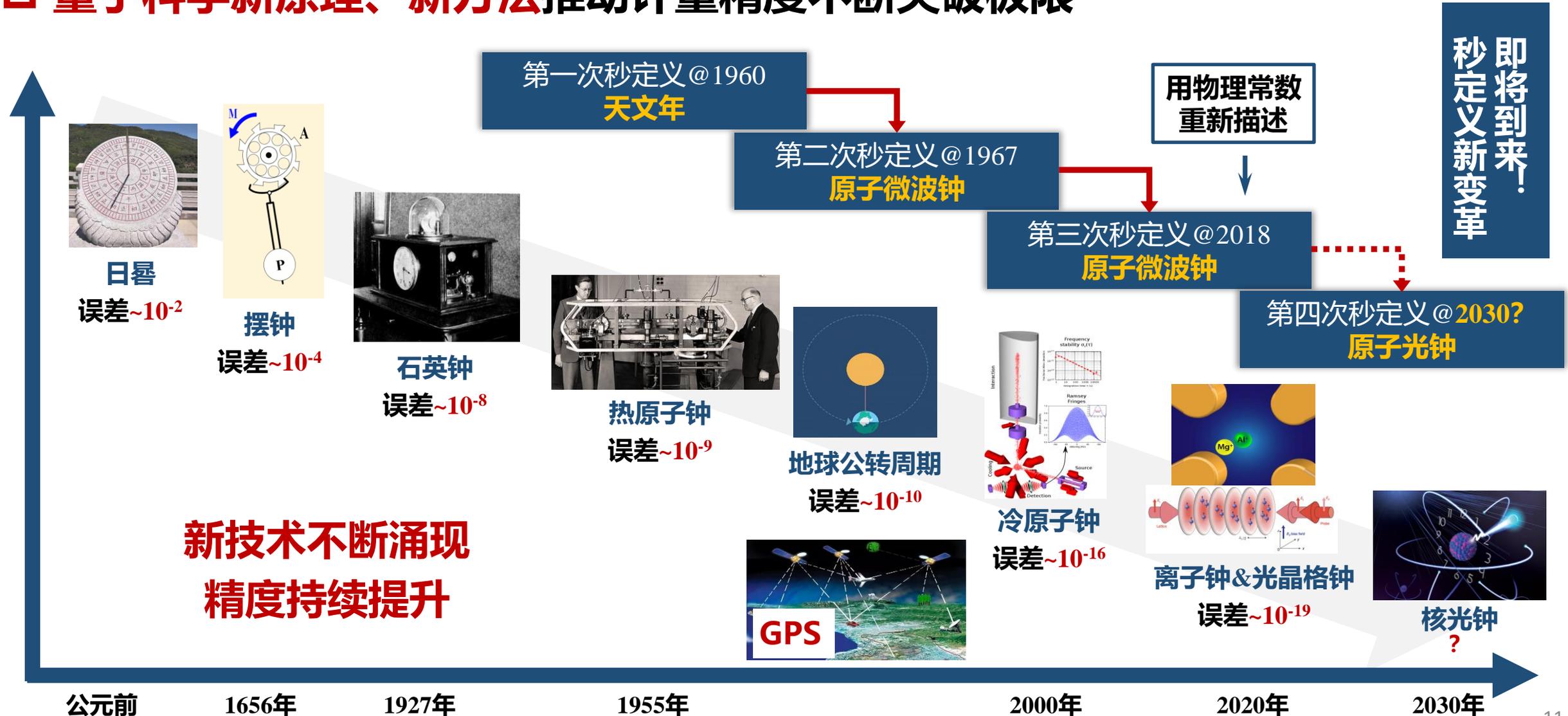


辐射熵传递方程中的 h 和 k 两个常数，提供了建立不依赖于特定主体或材料的长度、质量、时间、温度计量单位的可能性，这些单位定义将普适于任意时间、任何文明。

----- Max Planck 1900

计量量子化变革

量子科学新原理、新方法推动计量精度不断突破极限



计量量子化变革

国际单位制变革：用基本物理常数定义计量基本单位



2018年第26届国际计量大会上，包括中国在内的各国代表团一致通过了关于“修订国际单位制 (SI)”的1号决议，全部SI基本单位均由基本物理常数定义，告别了实物计量的历史，开启计量量子化时代

自法国大革命以来最伟大的计量革命
—威廉·菲利普斯（1997年诺贝尔物理学奖）

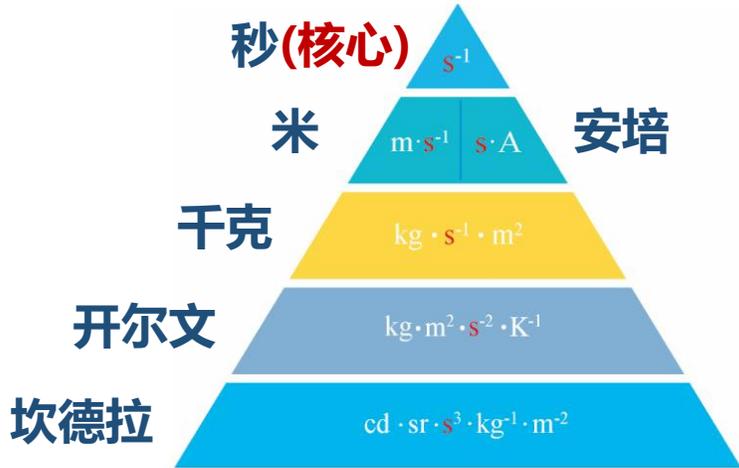
国际单位制基本单位	基本物理常数	
时间 (秒)	^{133}Cs 原子跃迁频率	$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$
长度 (米)	真空中光速	$c = 299\,792\,458\text{ m/s}$
质量 (千克)	普朗克常数	$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$
电流 (安培)	基本电荷	$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}$
温度 (开尔文)	玻尔兹曼常数	$k = 1.380\,649 \times 10^{-23}\text{ J/K}$
物质的量 (摩尔)	阿伏伽德罗常数	$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
发光强度 (坎德拉)	光视效能	$K_{\text{cd}} = 683\text{ lm/W}$

基本单位重新定义

2018

新定义复现与传递 (计量新基准建立)

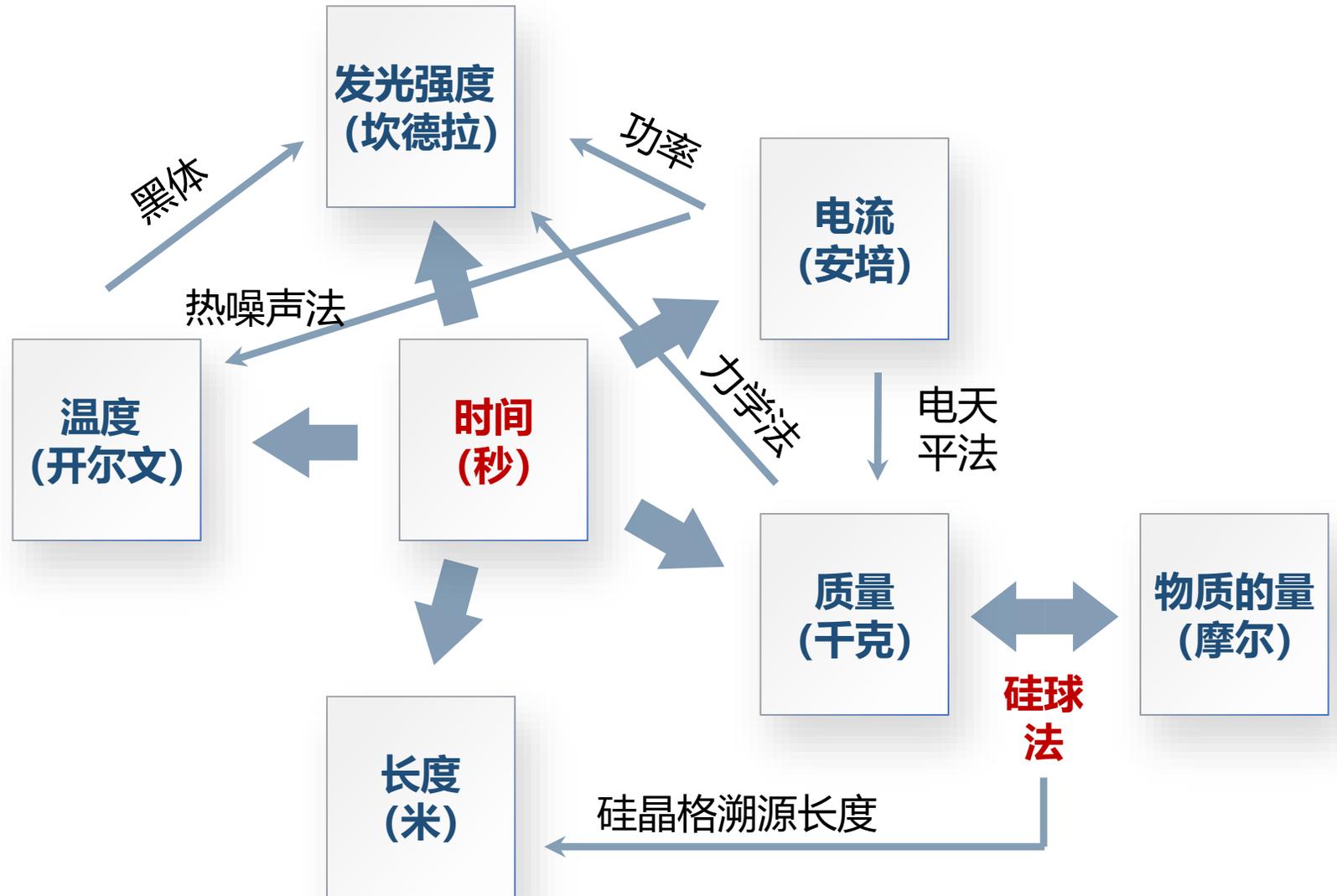
基本单位量子计量关系



□ 基本单位之间具有物理上的内禀关联性

□ 基准建立和可靠应用需要各单位之间的相互支撑

- 例：**时间**的研究可以**支撑**其他**5个单位**的基准研究
- 例：**硅球法**是**质量**、**物质的量**、**长度****3个单位**的**共同基准技术**

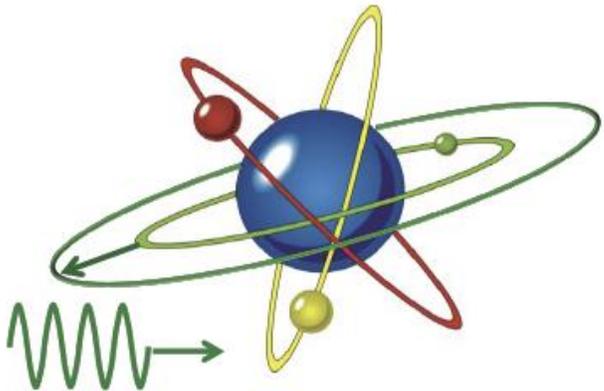


量子计量优势

量子计量

利用量子物理原理和技术复现计量单位

- 直接溯源至基本物理常数
(源于量子精密测量而严于量子精密测量)
- 显著提升的准确度、稳定性和量值范围
- 可在任意时间、地点，由任意主体复现



$$h\nu = E_{|e\rangle} - E_{|g\rangle}$$

时间计量：电子能级跃迁频率不随时间/空间变化

建立超高精度的国家最高计量基准

- 国家主权
- 质量基础核心



实现用户端零链条溯源的原位标校

- “去中心化”先进计量体系

实物基准



国家最高基准

社会公用计量标准

工作计量器具

溯源复杂，精度损失，一致性差

量子基准

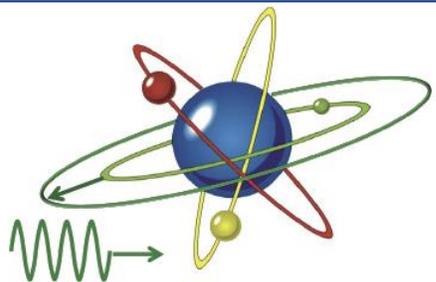


原级量子计量装备/器件

用户端直接溯源至基本物理常数

用户生产生活

量子计量成功案例-时间基准



$$h\nu = E_{|e\rangle} - E_{|g\rangle}$$

^{133}Cs 原子跃迁频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$



秒长国家基准: NIM5铯原子喷泉钟
不确定度 9×10^{-16}



支撑



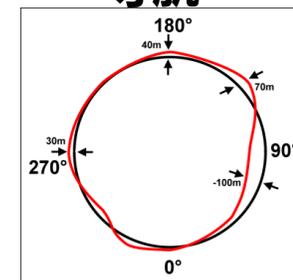
通讯



导航



时间同步

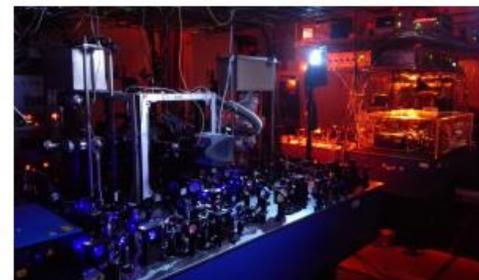


科学研究



支撑

发展



Sr原子光晶格钟



Yb⁺光钟

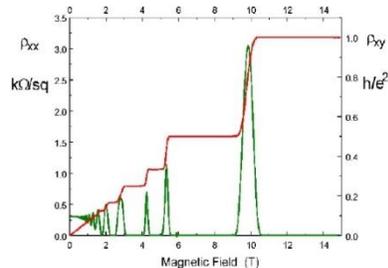
不确定度提升至 10^{-19}

量子计量成功案例-电学基准

■ 电阻



Klaus von Klitzing



□ 量子霍尔效应

$$\rho_H = \rho_{xy} = -\frac{1}{n} \frac{h}{e^2}, n=1, 2, 3, \dots$$

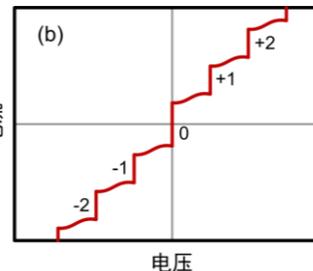
与材料体系无关，稳定可靠，容易推广。



量子电阻基准

不确定度 10^{-10}

■ 电压



□ 约瑟夫森效应

$$u_n = \left(n \cdot \frac{h}{2e}\right) \cdot f$$

合成频谱纯净的任意电压信号量值准确，复现性好。



量子电压系统

不确定度 10^{-9}

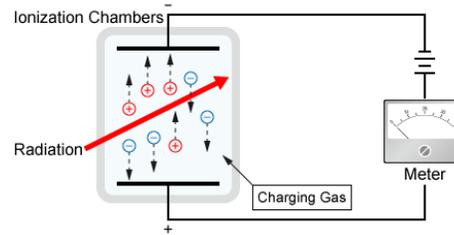
支撑相关领域创新发展



电能计量



高端芯片

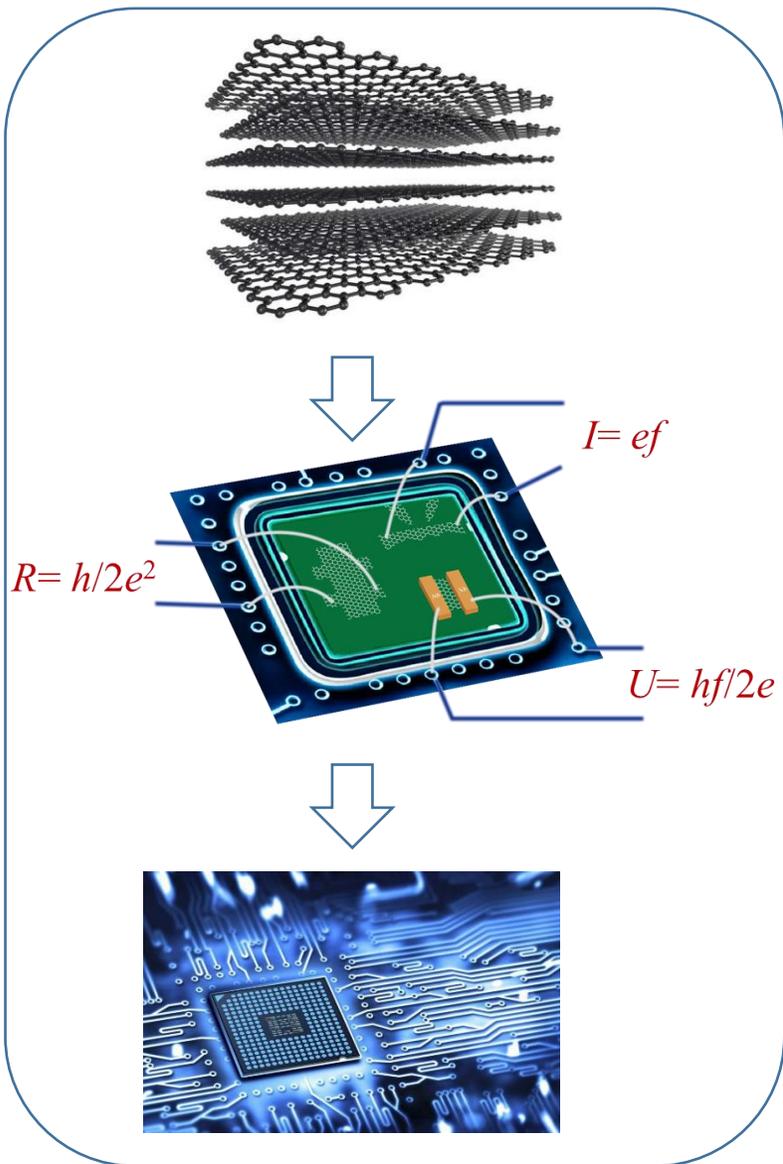


微弱信号检测



精密源表

总结与展望



- 实物基准向量子基准过渡，为我国计量技术发展甚至赶超提供了很好的契机，同时对相关领域和从业人员提出了有力挑战；
- 电学参量量子计量与固体材料量子效应密切关联，使得从事量子材料基础研究的科研人员有机会参与量子计量技术研发；
- 量子计量芯片研发同时面向相关科技前沿和未来国家重大战略需求，是科学与技术融合的良好范例，也有望催生基础领域原创突破；
- 量子计量芯片与量子计量装备的研发需要更多地协同攻关，以保证从基础物理到技术落地的全链条创新发展；
- 需密切关注科学研究、技术研发、生产生活等实际应用场景对于量子计量技术的精准需求，助力建立真正意义上扁平化计量体系。



創寰宇學府 育天下英才

UNIVERSITY OF SCIENCE AND
TECHNOLOGY OF CHINA

谢谢

