

模块 · 知识与推理的根基 · 第 013 日

013

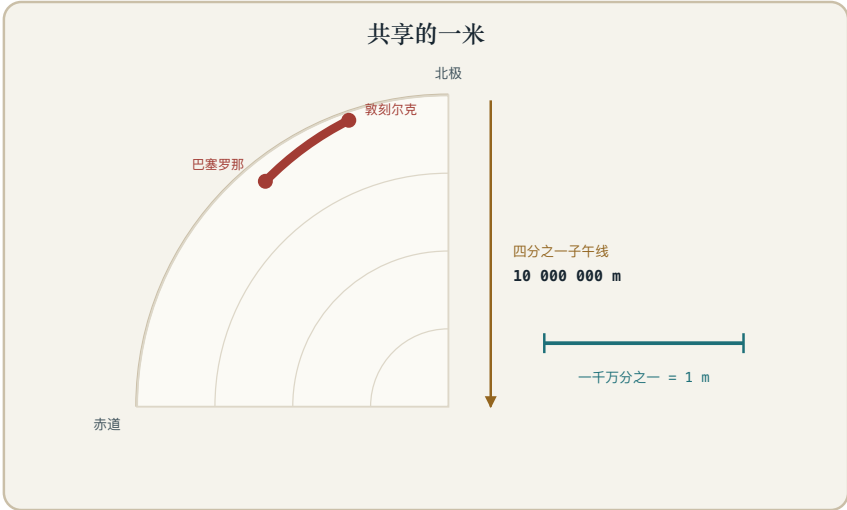
测量与单位

一米到底有多长？答案已经变过四次，而最近一次变化最为奇特。

研究路线 · 轻装版

测量与单位

一米究竟有多长？答案已经变过四次——而最后一次最为奇特。



最初的米试图取地球子午线四分之一的一千万分之一。德朗布尔与梅尚只测量了其中一小段，再用大地模型推及全弧；定义虽有偏差，单位仍因共同使用而成立。

1794 年冬，在巴塞罗纳一间租来的房间里，法国天文学家皮埃尔·梅尚发现自己的两次纬度读数并不一致，这击垮了他。大革命把他派往南方，执行一项堪称史上最浪漫的官僚任务：测量地球的大小，让人类终于拥有一个不属于任何人的长度单位——*à tous les temps, à tous les peuples*，为一切时代，为一切人民。不是国王的前臂，也不是地方行会的码尺，而是从行星本身取出一米：北极到赤道距离的一千万分之一。

梅尚负责测量弧的南半段，让·巴蒂斯特·德朗布尔负责北半段。梅尚在巴塞罗纳两处地点取得的读数相差约三角秒，对应地面上约一百米。当时还没有成熟的随机观测误差理论，梅尚便把这项差异视为个人失败。他隐瞒并调整了数据，多年间反复回到这个问题，最终于 1804 年在试图重新测量该弧时死于黄热病。德朗布尔后来在他的文稿中发现了那项被隐瞒的差异。

这项误差并不意味着梅尚的仪器毫无用处。地球并不规则，测得的弧无法让预定的四分之一子午线恰好等于 10,000,000 米。现代大地测量给出的北极到赤道子午线距离约为 10,002,290 米，因此历史上的一米比最初理想短约 0.2 毫米。我们仍然沿用了它。单位的职责不是揭示某个唯一真实的长度，而是供大家共同使用。

当前位置

十二天里，我们搭起了一套认识论工具；今天，这套工具终于要接触世界。测量是数字与事物之间的一次握手。第 1 日以一个「按定义永远正确」的标准回归，第 10 日则以地图上的约定与疆域中属性的差别回归，而第 12 日带回了一张校准网络：它曾经终止于法国一座地库中的一只圆柱。第 7 日告诉我们信息是物理的；单位则是它的镜像，是抽象不得不化为硬件的地方。

模型

确定一米的三种办法

剥去浪漫色彩，每个单位都在回答同一个问题：怎样让两个陌生人达成一致？现代测量继承了三种大体策略。

策略一：指向一件东西。实物定义把某个特定物体定为标准。1799 年，子午线测量的结果被落实为铂制的 *Mètre des Archives*（档案米原器）；1889 年，这件端面标准又被国际米原器取代。后者是一件线纹标准，由 90% 的铂和 10% 的铱制成，采用 X 形截面以提高刚性，并规定在 0℃ 下使用。两条细刻线之间的距离并不只是测量一米；那段标记出的间隔就是一米。这条谱系也厘清了次数：最初的子午线定义之后，有四个正式继承者——1799 年的档案米原器、1889 年的国际米原器、1960 年的氦波长定义，以及 1983 年的光速定义。

策略二：指向一种现象。实物会遭遇火灾、盗窃、热膨胀、污染和损坏。1960 年，一米被重新定义为氪-86 某一指定跃迁所发橙红色辐射在真空中波长的 1,650,763.73 倍。同一种同位素的原子具有可复现性：设备合适的实验室不再需要把自己的尺子与巴黎那根独一无二的金属棒比对。

策略三：指向一个数字。1983 年，第 17 届国际计量大会把真空光速精确固定为：

$c = 299,792,458$ 米每秒。

这个数值不再是一个带有不确定度的实验估计。相反，一米由它导出：光在真空中于 1/299,792,458 秒内行进的距离。

这正是今天的关键转折。实验室无法改进 c 以米每秒表示时的数值；它能改进的是对米和秒的复现。这个常数成了两者之间精确的换算因子。先固定常数，再从 c 中导出单位——这场大反转是现代计量学这门测量科学的核心思想。

布里奇曼的幽灵

珀西·布里奇曼在 *The Logic of Modern Physics*（1927）中把这项更广泛的哲学思想称为操作定义：一个概念与用来测量它的操作相联系。布里奇曼因高压物理学获得 1946 年诺贝尔奖，操作主义也在 1930 年代的心理学中广为传播。但作为一般意义理论，它过于严格；改用激光而非尺子测量长度，不应

因此产生一个不同的长度概念。不过在计量学中，一个更克制的版本以 *mise en pratique*（复现办法）的形式保留下来：它是实际复现某项 SI 定义的操作说明。定义的法令放在书架上，车间手册摆在工作台上。

困局

Le Grand K：塞夫尔的停摆时钟

当米从物体走向辐射，再走向固定常数时，仍有一个基本单位留在保险库里。直到 2019 年为止的 130 年间，千克就是一个实物。

国际千克原器是一只高 39 毫米、直径 39 毫米的铂铱圆柱，制成于 1889 年，存放在巴黎郊外塞夫尔的国际计量局一座环境受控的保险库内，罩在三层套叠的钟形罩之下。开启保险库需要三把分别保管的钥匙。1889 年、1946 年以及 1989—1991 年前后的一轮工作中，人们曾正式把它与官方复制品进行比对。它的昵称是 Le Grand K，也就是「大 K」。

Le Grand K 的质量恰好是一千克，定义不确定度为零，因为千克就是按它的质量定义的。第 1 日关于停摆时钟的警告在这里回来了。

把它与六件官方复制品——即 *témoins*（见证原器）——以及各国原器比对后发现，这一整族原器在一个世纪中已经相差数十微克。以美国原器 K4 为例，1889 年它比国际千克原器轻 75 微克，1984 年则轻 106 微克，其偏移量改变了 31 微克。到 1999 年，它比国际千克原器轻 116 微克，较 1889 年改变了 41 微克。

究竟是哪件物体变了？这套体系无法告诉我们。按其构造，Le Grand K 始终是一千克；一切差异都被归到其他物体身上。一个按定义永远正确的标准，永远不可能被发现正在变化。这种循环性使它不适合用于检测漂移。

那个熟悉的漂移故事，只对了一半

流行说法常称 Le Grand K 神秘地损失了 50 微克。这个数字实际描述的是整族原器之间的分化。国际计量局 2015 年的一次比对发现，自 1991 年以来，国际千克原器及其六件官方复制品作为一个整体保持一致，平均变化约为一微克。没有实验表明 Le Grand K 本身正在漂移。更深层的问题是，这项定义使这种检验根本无法进行。真正的问题是循环性，而不是已经证实的质量损失。

网络问题同样严重。药房里的秤、半导体质量标准和药物剂量校准，都要经过国家标准和官方复制品，沿计量溯源链追溯到一座保险库里的一只圆柱。全球质量体系只有一个根节点，可能遭遇污染、刮擦、盗窃、火灾或其他损坏。

2018 年 11 月 16 日，第 26 届国际计量大会在凡尔赛投票决定移除这个根节点。

改革

2019 年 5 月 20 日：世界不再拿一块金属衡量自身

修订后的国际单位制于 2019 年世界计量日生效。它把 1983 年的反转推广到全部七个基本单位，精确固定了七个常数：

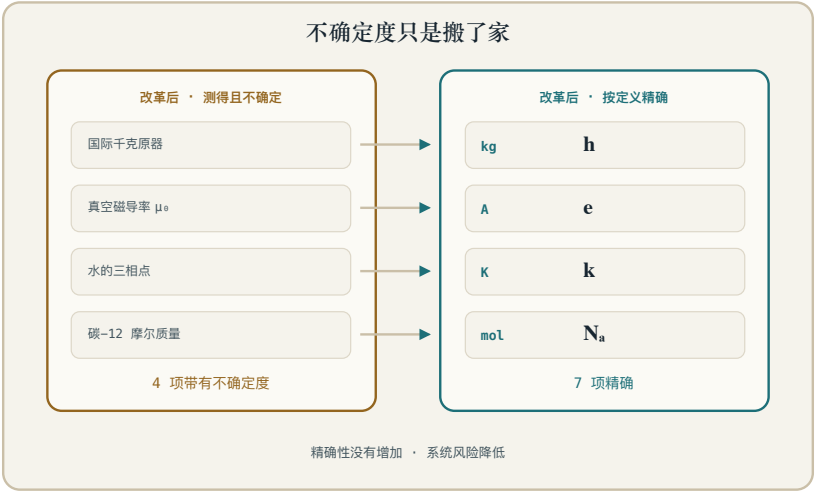
- $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9,192,631,770 \text{ Hz}$ ——铯-133 超精细跃迁频率，用于定义秒。
- $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ ——真空光速，用于定义米。
- $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ——普朗克常数，用于定义千克。
- $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ——元电荷，用于定义安培。
- $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ——玻尔兹曼常数，用于定义开尔文。
- $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ——阿伏伽德罗常数，用于定义摩尔。
- $K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W}$ ，适用于频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色辐射——发光效能，用于帮助定义坎德拉。

如今，所有 SI 单位都由这些精确值及其物理复现程序导出。原则上，火星上一间设备充足的实验室无须与地球上的任何物体比对，就能复现一千克。

这场改革并未让自然变得更确定，而是转移了不确定度。2019 年以前，Le Grand K 的质量是精确值，普朗克常数则是带有不确定度的测得值。2019 年以后， h 成为精确值，而 Le Grand K 的质量成了带有约 10 微克测量不确定度的测得值，终于可以自由变化。四个被重新定义的单位都进行了同一类交换。

图 · 不确定度账本

2019 年 5 月 20 日前后，都是七项量按定义精确，四项量带有测量不确定度。四个自然常数进入精确一栏，四个旧锚点则离开。精确性被交换，而非凭空创造。下表改革前的测得值采用 CODATA 2014 调整值，改革后的测得值采用 CODATA 2022。



2019 年，h、e、k 与 N_a 成为按定义精确的常数；国际千克原器、 μ_0 、水的三相点与碳-12 摩尔质量开始带有测量不确定度。改革前后都是七项精确、四项不确定。

量	2019 年 5 月 20 日以前	2019 年 5 月 20 日以后
光速 c	299,792,458 m/s; 自 1983 年起为精确值	299,792,458 m/s; 精确值
铯频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9,192,631,770 Hz; 自 1967 年起为精确值	9,192,631,770 Hz; 精确值
发光效能 Kcd	683 lm/W; 自 1979 年起为精确值	683 lm/W; 精确值
普朗克常数 h	$6.626\,070\,040(81) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; 相对不确定度 1.2×10^{-8}	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; 精确值
Le Grand K 的质量	1 kg; 按定义精确	约 $1 \text{ kg} \pm 10 \text{ }\mu\text{g}$; 相对不确定度约 1×10^{-8}
元电荷 e	$1.602\,176\,6208(98) \times 10^{-19} \text{ C}$; 相对不确定度 6.1×10^{-9}	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$; 精确值
真空磁导率 μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; 按旧安培定义为精确值	$1.256\,637\,061\,27(20) \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$; 相对不确定度 1.6×10^{-10}
玻尔兹曼常数 k	$1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23} \text{ J/K}$; 相对不确定度 5.7×10^{-7}	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; 精确值
水三相点	273.16 K; 按旧开尔文定义为精确值	约 $273.1600 \text{ K} \pm 0.0001 \text{ K}$
阿伏伽德罗常数 NA	$6.022\,140\,857(74) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; 相对不确定度 1.2×10^{-8}	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; 精确值
碳-12 的摩尔质量	12 g/mol; 按旧摩尔定义为精确值	$12.000\,000\,0126(37) \text{ g/mol}$; 相对不确定度 3.1×10^{-10}

四次直接交换分别是：千克，Le Grand K $\rightarrow h$ ；安培，固定 $\mu_0 \rightarrow e$ ；开尔文，水三相点 $\rightarrow k$ ；摩尔，12 克碳-12 $\rightarrow NA$ 。七项精确、四项不确定，是这场改革的结构特征，并非自然定律。四个单位各自用一个精确锚点换下了另一个。

机器

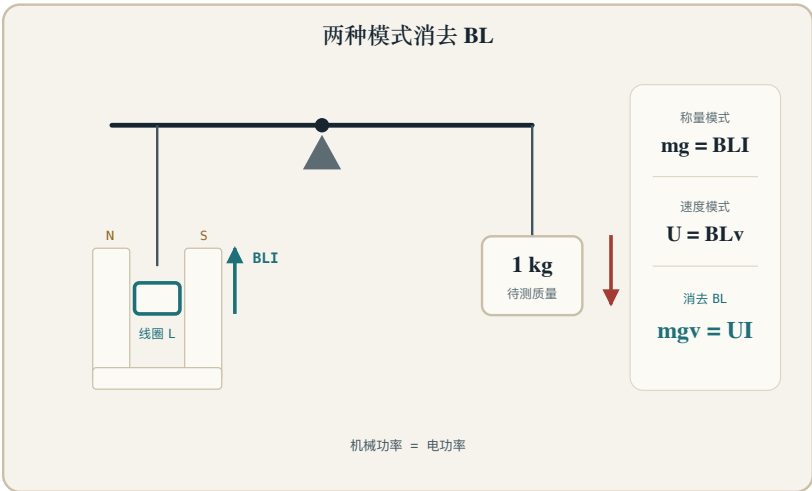
怎样用普朗克常数称出一千克

普朗克常数属于量子力学。它怎么能称一袋糖？

1975 年，英国国家物理实验室的布赖恩·基布尔给出了答案。基布尔天平把一个质量与电磁力进行比较，再把电学测量连接到量子标准。它以两种模式运行，同一组难以测准的几何量会同时出现在两种模式中。

图·基布尔天平的两种模式

称量模式用电磁力平衡质量的重量。速度模式让同一线圈穿过同一磁场运动。联立两条方程后，磁场强度与有效导线长度都会消去。



称量模式给出 $mg = BLI$ ，速度模式给出 $U = BLv$ 。联立方程后，难以独立测准的磁场 B 与导线长度 L 同时消去，得到 $mgv = UI$ 。

模式	关系式	观测量
称量	$m g = B L I$	电流 I 产生向上的力 BLI ，与重量 mg 平衡。
速度	$U = B L v$	让线圈以速度 v 穿过磁场运动，产生电压 U 。
联立	$m g v = U I$ ，因此 $m = U I / (g v)$	难以测准的量 B 和 L 相消。

电压用约瑟夫森结复现，其量子化台阶通过 h 和 e 把电压与频率联系起来。电阻则通过与 h/e^2 成正比的量子霍尔平台复现。随后可由电压与电阻求得电流。在乘积 $U \times I$ 中，元电荷相消， h 保留下来。重力测量给出 g ，激光干涉测量给出 v 。计量溯源链最终落在精确的 h 、 c 和 $\Delta\nu Cs$ 上，而不是一只金属圆柱上。

冗余使结果更可信。千克还有第二条大体独立的复现路线：硅球。把近乎完美的同位素富集硅-28 晶体研磨成极为接近球形的球体，再测量其体积、用 X 射线干涉测量晶格间距，并测定同位素组成，就能确定其中的原子数，并把结果连接到阿伏伽德罗常数和 h 。重新定义之前，CODATA 2017 特别调整要求硅球与基布尔天平两类实验在 10^{-8} 水平上一致。它们做到了。

两条路线采用了大不相同的实验物理，却收敛到同一个值。这正是第 2 日教我们珍视的那种有风险的一致。

史上最昂贵的单位换算

1999 年 9 月 23 日，NASA 的火星气候轨道器在入轨过程中失事。洛克希德·马丁的地面软件以磅力秒报告推进器冲量，而 JPL 的导航软件预期的是牛顿秒，两者相差约 4.45 倍。这项不匹配持续了数月。航天器原本应安全接近火星，却以估计约 57 千米的高度掠过，并在穿越大气后解体或逃逸。据报该任务耗资 3.276 亿美元。调查委员会强调，这是一场系统失效，而不是某个人的算术错误：本应暴露不兼容接口的检查并未做到。单位是一纸条约，只有接口强制执行它，条约才会生效。

争论

「光速在变化吗？」是一个不完整的问题

国际单位制以常数为锚，那么这些常数真的恒定吗？自狄拉克 1937 年提出大数假说以来，物理学家一直在探索 c 、 G 或电子电荷是否会随宇宙时间漂移。变光速宇宙学让这个问题听起来十分直接。其实并非如此。

迈克尔·达夫在与列夫·奥昆和加布里埃莱·韦内齐亚诺的三方论辩中，给出了最尖锐的反对意见。这场论辩于 2002 年以 *Dialogue on the Number of Fundamental Constants* 为题发表。奥昆认为有三个基本有量纲常数： c 、 $\hbar$ 和 G ；韦内齐亚诺认为有两个；达夫认为一个也没有。

像 c 这样的有量纲常数带有单位，因此部分记录了我们坐标和换算约定的选择。仅仅说 c 的数值发生了变化，还没有指明一个不随单位改变的物理观测。自 1983

年起，它在国际单位制中的数值已按定义固定。一套具有物理内容的变常数理论，必须说明哪个可观测的无量纲比值发生变化，以及怎样变化。

把米换成英尺，或把秒换成年，都无法改变无量纲数。两个核心例子是：

- 精细结构常数 α approximately $1/137.035\,999$ ，它表征电磁耦合，并参与决定原子光谱与化学性质；
- 质子—电子质量比 $\mu = m_p/m_e$ approximately 1836.15 。

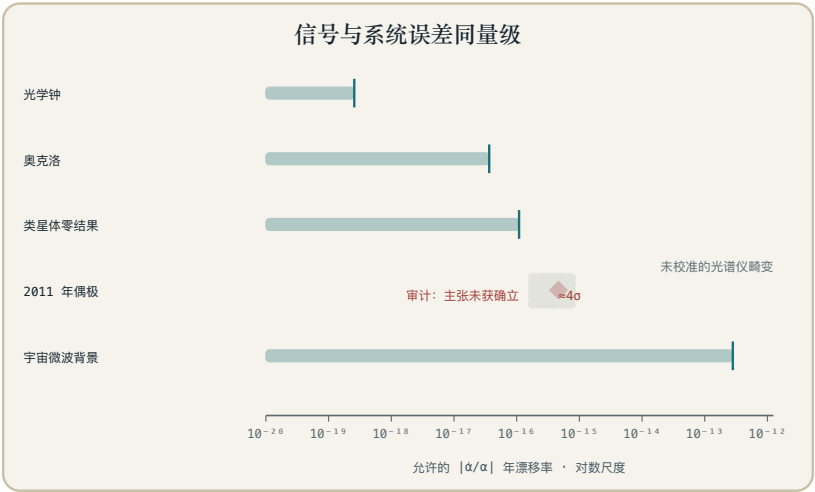
如果一项所谓的变化能够通过更换单位而消失，它就还不是一项关于世界的主张。

这就是第 10 日「地图与疆域」的物理版本。无量纲常数编码了网格的一部分；无量纲比值则表达任何单位制都必须保留的关系。这也是第 2 日的可检验性规则：「光速在变化」若没有不随单位改变的预测，就不排除任何观测。明确指出哪个比值在变化，这项主张才变得可检验。

那么， α 变过吗？

图 · 精细结构常数漂移的限值

实验室时钟、地质证据、类星体光谱和宇宙微波背景探测着不同的时代。每项经过校准的结果都与无变化相容。2011 年的类星体偶极主张单独列出，因为后来的仪器审计发现了与所称信号相当的畸变。



2011 年约 4σ 的类星体偶极信号，与后来在光谱仪中发现的长程波长畸变同量级。校准更充分的仪器得到与零漂移相容的结果。

探针	时间基线	报告的约束或结果	解读
PTB 的 Yb ⁺ 光学原子钟	26 个月	$(1/\alpha)(d\alpha/dt) = 1.8 \pm 2.5 \times 10^{-19}$ 每年	与零相容；本课中最严格的实验室直接漂移限值。
奥克洛天然反应堆	18 亿年	在核模型假设下， $ \Delta\alpha/\alpha $ 低于约 10^{-7}	约束很强，但依赖模型；夸克质量若同时变化，会改变推断。
经过现代校准的类星体光谱	约 100 亿年的回溯时间	示例： $\Delta\alpha/\alpha = 0.30 \pm 1.44$ ppm	与零相容。
2011 年 Keck 与 VLT 的偶极主张	约 300 个类星体吸收系统；约 100 亿年的回溯时间	振幅约 0.97×10^{-5} ，约为 4σ	2015 年的一次审计发现每 Å 约 0.2 m/s 的波长畸变，与信号相当，却未计入其误差预算。
普朗克宇宙微波背景	138 亿年	复合时期的 $\Delta\alpha/\alpha = (3.6 \pm 3.7) \times 10^{-3}$	宽松得多，但在图中最早的时代仍与零相容。

天文观测条目约束的是 $\Delta\alpha/\alpha$ ，而不是一个恒定漂移率。要把它们放到同一条速率轴上，必须除以回溯时间，这等于假定漂移是线性的。因此，这幅图只能提供数量级指引，而不是不依赖模型的排名。奥克洛推断同样以其他核参数的假设为条件。

前沿 · 2026 年 7 月

证据抵达何处

前沿 01 ● 光学原子钟性能已确立 ● 秒的重定义拟于 2030 年提出，尚未完成

秒可能在 2030 年重新定义——时钟早已跑在定义前面

自 1967 年以来，一秒就是铯-133 超精细跃迁 9,192,631,770 个周期所持续的时间。领先的铯原子喷泉钟 NIST-F2 于 2014 年报告了 1.1×10^{-16} 的系统不确定度，相当于约 3 亿年才偏差一秒。光学原子钟以高得多的频率振荡，如今报告的不确定度已经小了 100 倍以上。

NIST 的铝离子量子逻辑钟于 2025 年 7 月 14 日在 *Physical Review Letters* 报告了 5.5×10^{-19} 的系统不确定度。它探测单个 $^{27}\text{Al}^+$ 离子，由一枚共俘获的 $^{25}\text{Mg}^+$ 离子对其进行交感冷却，并使用通过 3.6 千米光纤连接的低温硅参考腔。JILA 的锶光晶格钟于 2024 年报告了 8.1×10^{-19} 。媒体报道把铝离子装置称为「世界上最准确的时钟」，并宣称达到小数点后 19 位；同行评议论文确立的结果，是上述不确定度以及稳定性提升至原来的三倍。

现有定义已经成为瓶颈。国际计量大会路线图要求计量学界做好准备，以便在 2030 年第 29 届国际计量大会上提出重定义方案，前提是具备可靠的光学标准、超稳定连接、跨实验室可复现性，以及基于不同跃迁的时钟之间达成一致。国际计量局一份日期为 2026 年 6 月 30 日的决议草案指出，对于采用单一原子种类还是一组跃迁，仍未形成共识。性能里程碑已经确立；具体选择与重定义尚未完成。

前沿 02

● 频率比已测得

● 敏感性尚属预测

● 未探测到暗物质

原子核内的一次时钟跃迁

精密原子钟通常利用电子跃迁。钐-229 拥有一个异常低的核激发态，能量接近 8.4 eV，可以用激光触及。2024 年，一连串结果迅速抵达这一状态：Tiedau 及其同事报告在 PTB 以激光激发钐-229 同质异能态；Elwell 及其同事报告了固态激发；Zhang、Ooi、Higgins 及合作者则使用真空紫外频率梳，把核跃迁直接与 JILA 的镱原子钟比较。2024 年 9 月 4 日发表于 *Nature* 的结果，把核频率的精密度提高了约一百万倍。

原子核比原子小约 10,000 倍，电子云又能屏蔽许多外场，因此可以制备高密度固态样品。该跃迁的能量还源于若干巨大核贡献之间的近乎相消，这可能放大它对 alpha 变化的敏感性。把敏感性断言为恰好提高 10,000 倍，显得过分确定：Beeks 及其同事在 2025 年估计增强因子为 $K = 5900 \pm 2300$ ，不确定度约 40%，并且依赖半经典核模型。这项跃迁确实提供了新的测量平台；探测暗物质或 alpha 的变化仍然只是研究目标。

前沿 03

● 精细结构常数漂移零结果已确立

最严格的直接答案与零相容

同一枚镱离子中的两种跃迁对 alpha 的响应不同。PTB 对 E3 八极跃迁与 E2 四极跃迁进行了 26 个月的比较：

$$(1/\alpha)(d\alpha/dt) = 1.8 \pm 2.5 \times 10^{-19} \text{ 每年}$$

Filzinger 等, *Physical Review Letters* 130:253001, 2023 年 6 月 22 日。

这个估计以零附近为中心。它改进了 2021 年的一次比较；后者报告 alpha 的年变化率为 $1.0(1.1) \times 10^{-18}$ ， μ 的年变化率为 $-8(36) \times 10^{-18}$ 。如果所引 2.5×10^{-19} 每年的 1σ 敏感性尺度在 138 亿年间线性延续，累积变化约为十亿分之 3.5——这是有意采用线性模型的外推，并非宇宙学约束。在核模型假设下，奥克洛 18 亿年前的天然反应堆把 $|\Delta\alpha/\alpha|$ 约束在 10^{-7} 左右。普朗克的宇宙微波背景分析则给出复合时期、即 138 亿年前的 $\Delta\alpha/\alpha = (3.6 \pm 3.7) \times 10^{-3}$ 。尽管假设与时代各不相同，这里展示的每项结果都与零相容。

前沿 04

● 类星体 ALPHA 偶极受到仪器系统效应质疑

一项被自身仪器削弱的漂亮主张

Webb、King、Murphy、Flambaum 及其同事对约 300 个类星体吸收系统使用多重态组合法 (many-multiplet method)，于 2011 年报告：alpha 在天空一个方向上似乎更小，在相反方向上则更大，构成约 4σ 的空间偶极。该结果合并了夏威夷 Keck 天文台 HIRES 光谱仪与智利 VLT 的 UVES 光谱仪观测。

Whitmore 与 Murphy——Murphy 也是原始报告的作者——于 2015 年用小行星和太阳孪生星光谱对两台仪器进行超校准审计。他们在两台仪器中都发现了每 Å 约 0.2 m/s 的长程波长畸变。这些畸变没有进入原始误差预算，而且足以模仿所报告量级的信号。HARPS 和 ESPRESSO 等校准更充分的仪器，在高精度单系统研究中给出了零结果，其中包括 $\Delta\alpha/\alpha = 0.30 \pm 1.44$ ppm。因此，这个偶极尚不能算作空间变化已经确立的证据；仪器系统效应提供了足够有力的竞争性解释。

前沿 05 ● 精细结构常数测量差异尚未解决

alpha 很稳定，我们最好的测量却彼此冲突

反差十分鲜明：我们没有检测到 alpha 漂移，但两项最精确的原子反冲测定却不一致。伯克利的铯测量于 2018 年给出 $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,046(27)$ 。巴黎的铷结果于 2020 年 12 月 2 日给出 $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,206(11)$ ，不确定度为万亿分之 81。两者相差约 5.4σ 。

CODATA 2022 把输入不确定度扩大了 2.5 倍，以处理这项不一致，并推荐 $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,177(21)$ 。哈佛 2023 年通过电子 g 因子测定得到 $137.035\,999\,166(15)$ ，更接近巴黎结果，却仍不足以解决反冲测量的差异。主流预期是至少一项测量中存在尚未识别的系统效应，而不是出现了新物理；但目前还没有找到公认原因。alpha 的数值将在第 46 日再次出现，届时它会进入标准模型对 μ 子磁矩的预测。

前沿 06 ● 万有引力常数的测量难题已确立

G 依然极难测量

alpha 推荐值的相对不确定度约为 100 亿分之 1.5。CODATA 2018 中，牛顿万有引力常数 G 的相对不确定度约为 10 万分之 2.2: $6.674\,30(15) \times 10^{-11}$ 。最好的实验彼此间的差异超过各自声明的误差。2018 年，Li、Xue、Luo 及合作者在同一间实验室用两种独立方法测量 G ，每种方法的不确定度都接近 11.6 ppm，两项结果却依然不同。

为什么不仿照国际单位制固定 h 的方式，直接固定 G ？一个有用的定义常数必须支持单位的实际复现。没有任何装置能在 10^{-8} 水平上，通过实验室质量块之间的引力来传递千克量值。量子电学效应足够可控，可以用于基布尔天平；实验室引力却不行。因此， G 仍是一个带有不确定度的测得量。

前沿 07 ● 毫米尺度引力红移已确立 ● 时钟网络暗物质搜寻有前景

时钟能检测一毫米的高度差

广义相对论预言，引力场中位置更深的时钟走得更慢。2022 年，Bothwell、Kennedy、Aeppli、Ye 及合作者分辨出了横跨铯原子云一毫米范围的引力红移。他们测得每

厘米 $[-12.4 \pm 0.7(\text{stat}) \pm 2.5(\text{sys})] \times 10^{-19}$ 的频率梯度，与预言的 $-10.9 \times 10^{-19}/\text{cm}$ 一致。

达到这种敏感性后，时钟就成了高度计。钟测水准通过比较不同高度的时钟，测量地球引力势之差。ESA 的 ACES 载荷于 2025 年 4 月 21 日发射，随后安装到国际空间站，并于 4 月 28 日开始激活。到 2026 年，调试仍在进行，尚未完成科学观测任务。报道称其 PHARAO 铯钟性能符合指标，而空间氢脉泽的工作仍在继续。ACES 旨在从轨道上检验引力红移和常数变化。

彼此分离的时钟网络也在搜寻超轻标量暗物质。当地球穿过这种场时，它可能调制无量纲常数，并产生相关或差分频率信号。目前尚无探测结果；已经确立的是越来越敏感的测量方法，以及它所给出的限值。

测量之上的一道阴影——留给第 134 日

长度、质量和频率都拥有经过充分检验的定量结构。但我们也会给智力、疼痛、幸福和工作满意度赋予数字。1940 年，英国科学促进会的弗格森委员会得出结论：感觉强度尚未被证明能以所要求的意义加以测量。S. S. Stevens 于 1946 年回应，把测量定义为「依照规则把数字指派给对象」，并推广了名义、顺序、区间和比率量表。此后，这套框架主导了统计学教学。Joel Michell 认为，心理测量学往往没有证明某种属性具有定量结构，便直接假定它具有这种结构。把这场争论留到第 134 日。每当一个数字出现时，都要问：这种属性已被证明具有量值，还是仅仅被赋予了一个分数？

未决问题

真正仍无定论的事

- 哪一种光学跃迁应当定义秒？铯、镱、铝，还是加权组合？基础设施影响会延续很久，而目前没有任何选择形成共识。
- 为什么伯克利与巴黎对 α 的测量相差 5.4σ ？至少一项测量很可能存在未识别的系统效应，但尚无公认解释。
- 为什么 G 依然如此难测？两个世纪过去，领先结果的误差棒仍互不相容。尚未解决的原因可能是技术问题、被低估的系统效应，或模型未包含的物理。
- 无量纲常数是否会在今日限值以下漂移？许多超越标准模型的理论允许极微小的变化。接近每年 10^{-19} 的零结果约束了耦合，却不能证明绝对恒定。
- 是否存在某种具有特殊地位的自然单位制？普朗克单位由 c 、 $\hbar$ 和 G 组合而成。如果有无量纲常数部分编码的是约定，那么普朗克单位揭示了深层结构，还是只提供了一套格外好用的网格？
- 固定定义会隐藏哪些信息？精确的 SI 数值无法记录漂移，但无量纲比值的比较仍然敏感。这正是实验监测 α 、 μ 及其他不变量组合的原因。

核心观点

单位是一项共同条约。现代计量学固定一个常数，再从中导出单位：米在 1983 年完成了这场反转，另有四个基本单位于 2019 年 5 月 20 日更换了锚点。

最佳类比

Le Grand K 是用铂铸成的第 1 日停摆时钟。因为它按定义恰好是一千克，这套体系永远无法检测它是否发生变化；2019 年的不确定度账本把精确性转移给了各实验室能够独立复现的常数。

仍在争论

这里展示的每种无量纲探针都与 α 无漂移相容，仪器畸变也削弱了著名的类星体偶极。然而，两项领先的 α 原子反冲测量相差 5.4σ ，而我们对 G 的认知仍远没有这么精确。

信息（单位是共享代码；不确定度是一项可以转移的预算）· 能量（ h 、 k 、约瑟夫森结与量子霍尔效应）· 计算（把计量溯源性视为有根网络，而 2019 年移除了唯一根节点）· 轻涌现——第 7 日的「信息是物理的」在这里遇见自己的镜像：单位是抽象化为硬件的地方。

明日 → 第 14 日

综合：我们如何知道

模块一就此收束。十三天为我们提供了各种工具：盖梯尔的运气、波普尔的天鹅、贝叶斯的刻度盘、珀尔的剪刀、香农的比特、安德森的「多者异也」、梅多斯的回路、博克斯有用的谎言、西蒙的剪刀、巴拉巴西的枢纽，以及今天的不确定度账本。明天，我们要把这些工具转向自己，为余下 166 天建立一套个人置信度校准框架。认识论模块以另一个测量问题结束：怎样用一个经过校准的数字，表示你有多确定？

资料来源

资料来源与延伸阅读

1. BIPM. *The International System of Units (SI Brochure)*, 9th edition (2019, updated 2024). [bipm.org/en/publications/si-brochure](https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure) 七个定义常数及其精确值；第 26 届国际计量大会于 2018 年 11 月 16 日通过，2019 年 5 月 20 日生效。
2. Alder, K. (2002). *The Measure of All Things: The Seven-Year Odyssey and Hidden Error That Transformed the World*. Free Press. 德朗布尔与梅尚，1792—1799 年；巴塞罗那纬度差异及其隐瞒经过。

3. Newell, D. B. et al. (2018). 「The CODATA 2017 values of h , e , k , and NA for the revision of the SI.」 *Metrologia* 55(1): L13–L16. 把 h 固定为 $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 的特别调整；doi:10.1088/1681-7575/aa950a。
4. Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N. & Tiesinga, E. (2024). 「CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2022.」 arXiv:2409.03787. $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,177(21)$ ；为容纳反冲测量的不一致，采用 2.5 的扩展因子；CODATA 2018 的 $G = 6.674\,30(15) \times 10^{-11}$ 。
5. Marshall, M. et al. (2025). 「High-Stability Single-Ion Clock with 5.5×10^{-19} Systematic Uncertainty.」 *Physical Review Letters* 135:033201. 发表于 2025 年 7 月 14 日；NIST $^{27}\text{Al}^+$ 量子逻辑钟。
6. Aeppli, A., Kim, K., Warfield, W., Safronova, M. S. & Ye, J. (2024). 「Clock with 8×10^{-19} Systematic Uncertainty.」 *Physical Review Letters* 133:023401. JILA 镱光晶格钟；报告值为 8.1×10^{-19} 。
7. Bothwell, T., Kennedy, C. J., Aeppli, A. et al. (2022). 「Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample.」 *Nature* 602:420–424. 发表于 2022 年 2 月 17 日；doi:10.1038/s41586-021-04349-7。
8. Zhang, C., Ooi, T., Higgins, J. S. et al. (2024). 「Frequency ratio of the $^{229\text{m}}\text{Th}$ nuclear isomeric transition and the ^{87}Sr atomic clock.」 *Nature* 633:63–70. 发表于 2024 年 9 月 4 日；首次核跃迁—原子跃迁频率比较。
9. Tiedau, J. et al. (2024). 「Laser Excitation of the Th-229 Nucleus.」 *Physical Review Letters* 132:182501. PTB 的激光激发实验；另见 Elwell 等发表于 *Physical Review Letters* 133:013201 (2024) 的固态激发研究。
10. Beeks, K. et al. (2025). 「Fine-structure constant sensitivity of the Th-229 nuclear clock transition.」 *Nature Communications* 16:9147. 增强因子 $K = 5900(2300)$ ，具有显著不确定度和模型依赖性。
11. Filzinger, M. et al. (2023). 「Improved limits on the coupling of ultralight bosonic dark matter to photons from optical atomic clock comparisons.」 *Physical Review Letters* 130:253001. 发表于 2023 年 6 月 22 日；根据历时 26 个月的 $^{171}\text{Yb}^+$ E3/E2 比较得到 $(1/\alpha)(d\alpha/dt) = 1.8(2.5) \times 10^{-19} \text{ yr}^{-1}$ 。
12. Lange, R. et al. (2021). 「Improved Limits for Violations of Local Position Invariance from Atomic Clock Comparisons.」 *Physical Review Letters* 126:011102. 发表于 2021 年 1 月 8 日； α 与 μ 的漂移约束。
13. Duff, M. J., Okun, L. B. & Veneziano, G. (2002). 「Trialogue on the number of fundamental constants.」 *JHEP* 03:023. 发表于 2002 年 4 月 8 日；有量纲常数作为单位约定，以及无量纲比值的可观测作用。
14. Damour, T. & Dyson, F. (1996). 「The Oklo bound on the time variation of the fine-structure constant revisited.」 *Nuclear Physics B* 480:37–54. 在模型假设下，18 亿年间的 $|\Delta\alpha/\alpha|$ 约为 10^{-7} 量级；夸克质量敏感性另见 Flambaum 与 Wirlinga (2009)。
15. Webb, J. K., King, J. A., Murphy, M. T. et al. (2011). 「Indications of a spatial variation of the fine structure constant.」 *Physical Review Letters* 107:191101. 约 4σ 的「澳大利亚偶极」主张，振幅接近 0.97×10^{-5} 。
16. Whitmore, J. B. & Murphy, M. T. (2015). 「Impact of instrumental systematic errors on fine-structure constant measurements with quasar spectra.」 *MNRAS* 447:446–462. HIRES 与 UVES 中每 $\text{\AA}$ 约 0.2 m/s 的长程波长畸变，与所称偶极相当。
17. Parker, R. H., Yu, C., Zhong, W., Estey, B. & Müller, H. (2018). 「Measurement of the fine-structure constant as a test of the Standard Model.」 *Science* 360:191–195. 伯克利铯原子反冲结果， $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,046(27)$ 。
18. Morel, L., Yao, Z., Cladé, P. & Guellati-Khélifa, S. (2020). 「Determination of the fine-structure constant with an accuracy of 81 parts per trillion.」 *Nature* 588:61–65. 发表于 2020 年 12 月 2 日；巴黎铷原子反冲结果， $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,206(11)$ 。
19. Li, Q., Xue, C., Luo, J. et al. (2018). 「Measurements of the gravitational constant using two independent methods.」 *Nature* 560:582–588. 两种 HUST 方法的不确定度均约 11.6 ppm，但结果彼此不同。

20. Dimarcq, N. et al. (2024). 「Roadmap towards the redefinition of the second.」 *Metrologia* 61:012001. CCTF/CGPM 路线图，目标是在 2030 年第 29 届国际计量大会上提出方案；2022 年 11 月由国际计量大会第 5 号决议认可。
21. Heavner, T. P. et al. (2014). 「First accuracy evaluation of NIST-F2.」 *Metrologia* 51:174. 铯原子喷泉钟的系统不确定度为 1.1×10^{-16} 。
22. Boulder Atomic Clock Optical Network Collaboration (2021). 「Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network.」 *Nature* 591:564–569.
23. Planck Collaboration (2015). 「Planck intermediate results. XXIV. Constraints on variation of fundamental constants.」 *Astronomy & Astrophysics* 580:A22. 复合时期的 $\Delta\alpha/\alpha = (3.6 \pm 3.7) \times 10^{-3}$; arXiv:1406.7482。
24. Bridgman, P. W. (1927). *The Logic of Modern Physics*. Macmillan. 操作定义；另见 Stanford Encyclopedia of Philosophy, 「Operationalism」。
25. Stevens, S. S. (1946). 「On the theory of scales of measurement.」 *Science* 103:677–680. 名义、顺序、区间与比率量表；写于弗格森委员会报告之后。反对意见见 Michell, J., *Measurement in Psychology* (Cambridge University Press, 1999)。
26. NASA/JPL (1999). *Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board – Phase I Report*. 发表于 1999 年 11 月 10 日；磅力秒与牛顿秒的不一致，以及任务损失。
27. BIPM. 「The Metre Convention.」 bipm.org/en/metre-convention 17 个国家于 1875 年 5 月 20 日签署；2025 年为 150 周年。另见国际计量大会第 3 号决议（2022 年 11 月），该决议采用了词头 ronna, quetta, ronto 和 quecto。
28. BIPM (30 June 2026). *Draft Resolutions – 28th meeting of the CGPM*, version 4. CGPM/2026-Draft Resolutions 决议草案 B 记载：关于秒的新定义应采用单一原子种类还是一组跃迁，尚未形成共识；并要求在 2030 年第 29 届国际计量大会上提出方案。
29. ESA (25 April 2025). 「ACES finds its home in orbit.」 esa.int 2025 年 4 月 21 日发射，4 月 25 日安装到国际空间站，以及后续调试计划。
30. CNES (Winter 2026). 「PHARAO putting clocks right.」 *CNESMAG* 99. 英文版 (PDF) PHARAO 在轨性能达到预期；空间氢脉泽仍未运行，团队正在研究替代方案。
31. NIST (1985, 2001). Measurements of United States prototype kilogram K4. 1985 年比对；1999 年重新校准报告。1889 年 K4 比国际千克原器轻 75 μg ，1984 年轻 106 μg ，1999 年轻 116 μg 。

可选附录 · 第 013 日 · 1/2

机器中的化石

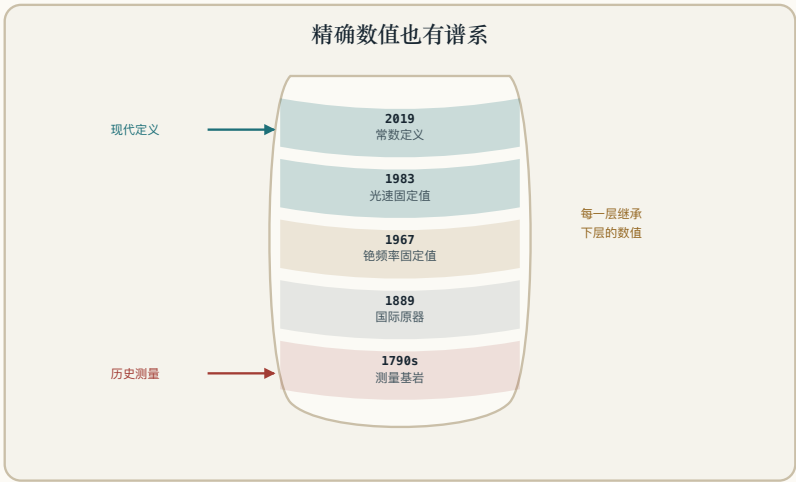
正文之外 · 可选阅读

主线下潜结束后，有一个问题应当一直萦绕在你心头。2019 年的国际单位制（SI）建立在七个定义常数之上，其精确数值由国际协定赋予。很好。但看看这些数： $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ； $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ ； $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ 。既然国际计量大会（CGPM）有权写下这些数，为什么不把 c 取整为 $300\,000\,000$ ，再把米缩短约 0.07% ？实验室之外几乎无人会察觉。

答案并非一个技术细节。每一个这样的数，都是为了与它所取代的标准保持连续而反向确定的。连续性高于优雅和方便，因为单位一旦悄然改变大小，就违背了它唯一的承诺。这些数字是继承来的，并非随意选定。逐层向下追索，你会发现科学中最现代的定义竟携带着化石。

图 · 国际单位制的岩芯剖面

七个定义常数之下，是从 1983、1967、1889 和 1799 年层层继承的标准。最底层埋着法国子午线测量、法国大革命时期的水，以及对月球的观测。



现代国际单位制的精确数字并非从零开始选择；每一层都必须保持单位大小连续，因此继承了旧定义、原器与历史测量的痕迹。

接续主线下潜

上一节结束在达夫剃刀：如果一个所谓的“变化”会在更换单位后消失，那么它从来就不是关于世界的主张。我们还看到一份账本，说明 2019 年改革只是转移了不确定度，并未将其消灭。现在，让我们拆开这台机器，检查六件事：埋在精确数值里的化石；实验室不得不绕开的单位；为什么一块有缺陷的半导体能提供可复现到十位数字的标准；不确定度预算中的模型与判断；藏在宇宙不变量之间的人眼；以及秒的定义、地球形状与格陵兰冰盖融化之间的碰撞。

第一部分谱系

沿着数字向下追索

先看 c 。1983 年，CGPM 将光速固定为 299 792 458 m/s。这是当时最佳的测量值——当然，是用米测出来的。1983 年的米沿用的是 1960 年的氦波长定义；这一标准被设计成与 1889 年的铂铱合金米原器吻合；后者又尽可能忠实地复制了 1799 年的档案米原器（*Mètre des Archives*）。而档案米原器的长度来自德朗布尔与梅尚在 1792 至 1798 年间横贯法国完成的测量——那次测量中藏着一处未公开的偏差。

因此，299 792 458 这个数并非光的某种无单位指纹。它保存了用继承而来的米和秒测得的 c 的最佳数值；这两种单位的谱系穿过氦光谱线和天文时，一直抵达法国的一次测量与对月球的观测。物理对象是光，数字中却也记录着梅尚，以及后来的那些钟。

千克的祖先更湿润。秒的祖先则更奇异：它末尾的数字编码了 1954 至 1958 年间拍摄到的月球运动。随便挑一个单位，向下钻探吧。

图 · 一个精确数值的谱系

每一层都从下方一层继承数值。关键转折发生在带有不确定度的测量值变成精确定义之处。



固定 c 时采用的数字来自旧米下的最佳测量值；旧米又逐层继承更早的标准。现代精确值因此保存了历史测量的谱系。

单位与层次	定义或复现方式	该数值继承了什么
米 · 2019 年至今	通过七个定义常数定义米	实质上自 1983 年起未变。
米 · 1983 年	$c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ，精确值；一米是光在 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 内传播的距离	冻结当时的最佳测量值，使光定义的米与氩波长定义的米吻合。
米 · 1960 年	氩-86 橙红色 $2p_{10}-5d_5$ 谱线的 $1\,650\,763.73$ 个波长	这个不规整的计数是为了与 1889 年米原器吻合。
米 · 1889 年	国际米原器，90% Pt / 10% Ir，X 形截面；在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时读取两条刻线之间的距离	为复制档案米原器（Mètre des Archives）而制。
米 · 1799 年	铂制端面米原器 Mètre des Archives，存放于巴黎	依据德朗布尔—梅尚测量结果制成。
米 · 1792–1798 年	敦刻尔克—巴塞罗那子午线测量	梅尚隐瞒的三角秒偏差，加上对地球扁率的高估，使米比原定义意图短约 0.2 mm ；子午线象限长约 $10\,002\,290\text{ m}$ 。
千克 · 2019 年	$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J} \cdot \text{s}$ ，精确值；用基布尔天平或硅球复现	CODATA 2017 年特别调整使新千克与 Le Grand K 保持连续。
千克 · 1889 年	Le Grand K，90% Pt / 10% Ir 圆柱， $39\text{ mm} \times 39\text{ mm}$ ，在塞夫尔由三把钥匙共同保管	为与档案千克原器（Kilogramme des Archives）吻合而制。
千克 · 1799 年	铂制 Kilogramme des Archives，由度量衡委员会接纳	原意是等于最大密度时一立方分米水的质量。
千克 · 1793–1799 年	由于冰点难以复现，勒费弗尔-吉诺与法布罗尼称量接近 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的纯水	这桶水使 Le Grand K 比真正一升水的质量重约 28 ppm 。
秒 · 2019 年至今	通过 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义秒	实质上自 1967 年起未变。
秒 · 1967 年	铯-133 基态超精细跃迁的 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ ，精确值	采纳 1958 年测得的频率，并舍弃其在历书时标度上的 $\pm 20\text{ Hz}$ 不确定度。
秒 · 1958 年	每历书秒 $9\,192\,631\,770 \pm 20$ 个周期，Physical Review Letters 1:105	把铯频率与 1954.0–1958.5 年间的历书时比较；历书时由月球相机照片读取。
秒 · 1960 年	1900 回归年的 $1/31\,556\,925.9747$	这个年份由纽康的太阳表计算得出，并非观测所得。
秒 · 基岩层	1954–1958 年的月掩星摄影，以及纽康 19 世纪的太阳星历表	在更下方，秒曾是并不规则的地球自转日的 $1/86\,400$ 。

升不等于升的六十三年

千克原本应当是一立方分米水的质量，但事实并不完全如此。1889 年，物理学家铸造 Le Grand K 以匹配档案千克原器（*Kilogramme des Archives*）时，继承了一处小误差：这个圆柱比真正一升水的质量重约百万分之 28。1901 年，第 3 届 CGPM 又把升定义为最大密度时一千克水所占的体积，让一个体积单位悬挂在质量标准之下。从 1901 到 1964 年，一升的官方定义是 $1.000\,028$ 立方分米。第 12 届 CGPM 于 1964 年废止该定义，让升重新归属于米。

这个实物原器污染了它所触及的一切。

秒的谱系包含本附录最重要的一步。1958年，马科维茨、霍尔、埃森和帕里报告了相对于历书时的铯频率：每历书秒 $9\,192\,631\,770 \pm 20$ 个周期。这是一个带有不确定度的频率测量值。

1967年，第13届CGPM取来这个测量值，舍弃 ± 20 ，并宣布剩下的数为精确值。这等于把2019年改革提前了五十二年。不确定度并未蒸发，而是被吸收到定义之中；2019年 h 的不确定度与1983年 c 的不确定度也经历了同样的过程。每当我们把一个常数变成精确值，都在重复同一种仪式：冻结最后的测量值，把它的不确定度移到别处。

定义常数冻结一个测得的数值，使单位保持连续。物理本身以及每一种无量纲比较，仍然可以接受检验。

第二部分实验室不得不绕开的单位

安培长达二十九年的秘密

下面是2019年之前的安培定义：

安培是一恒定电流；若保持在真空中相距1米、长度无限、圆形截面可忽略不计的两根平行直导线内，则这两根导线每米长度之间产生的力等于 2×10^{-7} 牛顿。

无限长。截面可忽略。真空。没有任何装置能完全实现这些理想化条件。有限尺寸的电流天平可以近似满足它们，再加入计算得到的修正，但这个定义极难准确复现。它从1948年一直留在国际计量法规中，直到2019年，前后长达七十一年。

因此，电学计量学家另起炉灶。1990年1月1日，依照国际计量委员会（CIPM）的建议，他们为实际使用的两个量子常数采用了协定值¹——有意而明确地不属于SI：

- $K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz/V}$ ，约瑟夫森常数；
- $R_{K-90} = 25\,812.807 \, \Omega$ ，冯·克利青常数。

二者都被赋予零不确定度，由此形成一套平行体系：协定伏特 V_{90} 、协定欧姆 Ω_{90} 和协定安培 A_{90} 。二十九年间，每一台精密电压表都是用一种与SI法定货币极其接近、但严格说来并非法定货币的币制来校准的。精密电学测量失去了对基本物理常数的正式计量溯源性。

¹电学协定值是在国际单位制之外使用的精确约定值，使实验室能够借助量子效应以可复现的方式得到伏特和欧姆。

2019 年改革结束了这场分裂。第 26 届 CGPM 废止协定值，通过 e 定义安培，并将电学实验室一直在做的事纳入 SI。

改革的设计目标是让单位大小不发生可见变化。这个承诺处处兑现，唯一的例外正是曾脱离旧体系的领域。2019 年 5 月 20 日，与电压有关的量增大了 1.067×10^{-7} ，与电阻有关的量增大了 1.779×10^{-8} 。这一阶跃在日常生活中无从察觉，对校准电压基准的人却如同地震。改革唯一可见的扰动，恰好落在旧定义最难使用的地方。

第三部分这一切为何可行

计量学家最好的朋友是整数

在基布尔天平路线中，千克通过基于约瑟夫森效应和量子霍尔效应的电学标准来复现。另一条独立的硅球路线使用不同的实验物理。超导结或半导体样品明明是不完美的物体，由不同实验室用不同材料制成，为什么仍能把 $h/2e$ 和 h/e^2 复现到十位有效数字？

因为它们的输出是数出来的，而不是量出来的。

布赖恩·约瑟夫森在 1962 年预测了第一种效应；当时他是 22 岁的研究生，后来获得 1973 年诺贝尔物理学奖。用频率为 f 的微波照射超导结，其电压会锁定在离散台阶上：

$$U = nf \frac{h}{2e},$$

其中 n 是整数。在有效的约瑟夫森工作台阶上，标称电压取决于微波频率和两个定义常数，而不取决于材料或几何形状。实际复现仍有不确定度，来源包括频率、接线、台阶识别，以及结是否始终处于所需工作区间。

克劳斯·冯·克利青在 1980 年发现了同一种模式，并获得 1985 年诺贝尔物理学奖。把二维电子气置于强磁场中，霍尔电阻会沿台阶上升：

$$R = \frac{R_K}{i} = \frac{h}{ie^2},$$

其中 i 是整数。硅、砷化镓和石墨烯给出的平台相同，平台高度在 10^{10} 分之一的量级上一致。

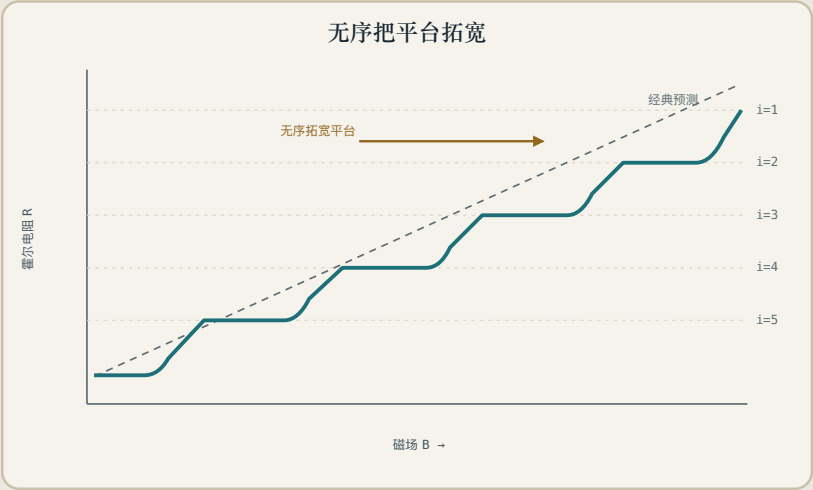
这种量子化具有拓扑性²。在适当的低温、强磁场、无耗散区内，整数不变量不可能漂移 0.1%；它只能在系统离开该区间或跳到另一个平台时改变。因此，真实标准必须核验平台选择、接触电阻、电流上限，以及是否未发生击穿。

有用的转折在于，样品越纯净，平台并不会越好。没有无序，宽平台根本不会出现。无序使朗道能级之间的电子态局域化，让每个平台获得有限宽度——成为一个可以安放测量的平坦搁板。完全纯净的晶体只会在孤立的磁场值上给出精确量子化：正确，却无用。缺陷在这里承担着关键功能。

²拓扑保护把霍尔平台与一个整数不变量绑定；小的形变或缺陷无法让该不变量连续改变。

图 · 量子霍尔阶梯

示意模型：无序拓宽了霍尔电阻锁定在整数平台上的磁场范围，却不改变平台的理想高度。滑块展示的是定性机制，并非对真实材料响应的计算。



样品无序把量子化点拓宽成可供测量的平坦平台，却不改变平台高度。杂质不是被容忍的缺陷，而是量子霍尔电阻标准的工作条件。

无序程度	曲线形状	计量学后果
几乎没有 · 示意	示意响应接近经典斜坡；量子化数值只占据趋近于零宽度的区间。	没有可供测量停驻的稳定平台。
适度 · 示意	模型中出现平台，但仍然狭窄，容易受磁场漂移影响。	原理上量子化，实践中难以使用。
显著 · 示意	平台变宽、变平，而理想高度仍为 RK/i 。	在经过验证的工作区间内， $i = 2$ 复现精确定义关系 $RK/2 = 12\,906.403\,729\,652\cdots\Omega$ ，同时实际复现仍有有限不确定度。

这项结果构成 2019 年改革隐藏的脊梁：建立理想输出离散且受保护的标准。实物原器可能掉落一个指纹重量的铂；灯的温度可能略微偏高。量子标准仍可能被误认、误数，或被驱动到工作区间之外，但这些失效模式可以检验，不会悄然改写单位定义。

SI 一直坚定地走向计数。1960 年的米以波长计数，2019 年的摩尔以实体计数，硅球千克以原子计数；约瑟夫森伏特识别台阶，量子霍尔欧姆识别平台，秒则对振荡计数。每一次摆脱实物原器，都更加依赖离散结构，并核查装置是否正在复现预期状态。

这是第 7 日从一个意外方向返回。香农告诉我们，信息是离散且物理的。计量学补上一条推论：离散性可以让标准更鲁棒，因为经过验证的整数台阶，比实物原器持续变化的表面更不易受到微小材料漂移的影响。

第四部分经过校准的误差算术

精密、正确还是准确？三者并不相同

人们常把熟悉的箭靶图讲反。区分三者很重要：

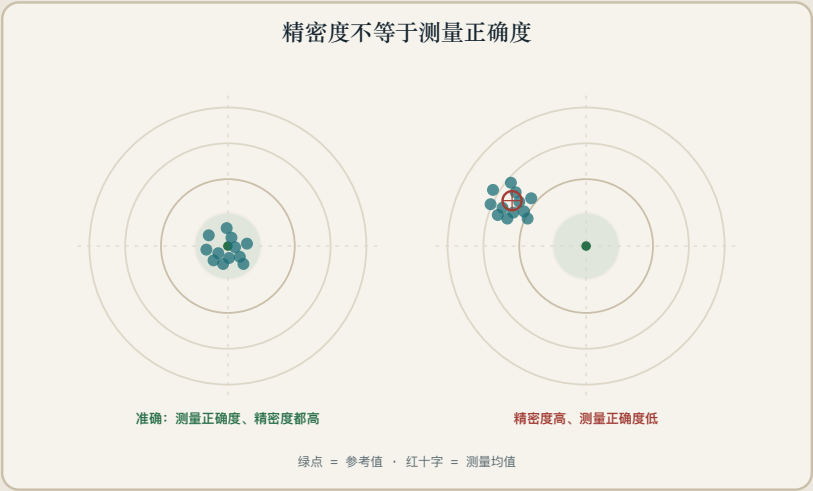
- 测量精密度描述结果聚集得有多紧密：重复测量值的离散程度有多大。
- 测量正确度追问结果群的中心是否落在靶心：它关乎偏倚。
- 测量准确度要求二者兼备。

这种不对称令人不安：从实验室内部就能看见测量精密度，却看不见测量正确度。重复测量一千次，你会知道装置与自身有多一致；但仅靠这些重复，无法知道它与世界是否一致。因此，最危险的象限并非凌乱的点云，而是一簇紧密、笃定，却偏离靶心的点。它看起来很适合发表。

主线下潜中的 α 偶极展示了这种危险，却没有给出教科书式的干净裁决。已发表的误差预算漏掉了与所声称信号相当的长程波长畸变。2015 年的审计并未证明一切可能的偶极都不存在；它只是消除了把这一结果视为已确立的依据。继续使用同一批未经修正的仪器观测，可能只会让围绕伪迹的区间越来越窄；外部校准审计却揭出了遗漏的系统效应。

图 · 测量精密度、测量正确度与测量准确度

偏倚使均值偏离参考量值；离散则让重复测量值散布在其均值周围。四种组合需要不同的补救办法。



精密度描述重复测量的聚集程度，测量正确度描述均值与参考值的接近程度。紧密但有偏的结果最危险：增加重复次数只会让有偏答案显得更确定。

偏倚	离散	诊断	有效做法
低	低	准确：测量正确度高，测量精密度也高。	保持校准和独立核查。
低	高	平均而言测量正确度高，但测量精密度低。	更多独立测量可按 $1/\sqrt{N}$ 减小离散。
高	低	精密却错误——最危险的象限。	更多重复只会让错误答案显得更确定；只有校准或外部审计才能揭示偏倚。
高	高	测量正确度和测量精密度都低：看得见的混乱有时比紧密但有偏倚的点簇更安全，因为它不会冒充确定性。	同时减小系统偏倚和随机离散。

每份不确定度预算中的判断

GUM³，即 *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*，规范着校准证书的写法。它并未废除误差，而是把某个具体结果不可知的实际误差，与用来表征可合理归属于被测量之量值的测量不确定度区分开来。

「误差」是测得值与参考量值之差，但实际误差通常仍然未知。测量不确定度⁴表征的则是可合理归属于被测量之量值的离散程度。报告可以给出标准不确定度，也

³ 《测量不确定度表示指南》规定了报告和合成测量不确定度所采用的国际框架。
⁴ 测量不确定度表征可合理归属于被测量之量值的离散程度；它不是与真值之间已知的距离。

可以在注明覆盖假设的前提下给出扩展区间。二者都不是直达真值的通道，而且报告中的不确定度并不都等同于频率学派的置信区间。

GUM 随后把评定方法分为两类：

- 测量不确定度的 A 类评定用重复观测值的统计分析完成，描述可统计的变异与测量精密度。
- 测量不确定度的 B 类评定使用其他可得信息：校准证书、制造商数据表、手册数值、物理模型、既往经验，以及最终由专家审慎作出的判断。

B 类是一条评定路径，并不意味着每项输入都是主观贝叶斯先验。其概率分布可以视具体情况来自校准数据、物理模型、已发布的技术规格或专家判断。一旦表示为标准不确定度，A 类与 B 类贡献就通过同一份不确定度预算传播。这里更窄也更持久的认识论要点是：若不确定度模型遗漏了仪器偏倚，即使报告为 5.4σ 的差异也可能经不起检验；报告中的「 $\pm$ 」不仅取决于重复性统计，也可能取决于对模型、校准和潜在系统效应的判断。这就是伯克利—巴黎 alpha 张力至今未决的原因，也是未经识别的系统效应为何能在漂亮的误差棒中潜伏多年。

在精密度之前，先有定义

在 A 类或 B 类评定之前，GUM 还承认定义不确定度^a：它来自被测量定义的细节有限。「这个房间的温度」究竟是什么——天花板处还是地板处，以何种方式平均，覆盖哪段时间？任何温度计都无法挽救一个含糊的问题，因为含糊属于被测量本身。把被测量界定清楚，不确定度预算中的很大一部分可能随之消失；任其含糊，再高的精密度也救不了它。请把这一点留到第 134 日，届时会有人试图测量「智能」。

^a定义不确定度是由于被测量无法被无限细致地说明而留下的不确定度分量。

第五部分另外四个单位

倾听气体、数一打实体，以及藏在 SI 里的人眼

开尔文：用倾听确定玻尔兹曼常数

确定 k 的主要路线是声学气体测温法⁵。在精密加工的共振腔中充入氦气，让它鸣响，再测量声速 u 。由于理想气体满足 $u^2 = \gamma kT/m$ ，气体的音高会揭示玻尔兹曼常数。独立核查来自介电常数气体测温法——达到约 1.9×10^{-6} ——以及约翰逊噪声测温法，后者从电阻两端的热噪声中提取 k 。三条互不相关的物理路线汇聚到同一个数。

新开尔文真正的回报出现在极端温度。旧定义把热力学温度锚定在水的三相点 273.16 K；随后，原级测温法与实用温标通过多种方法和固定点进行量值传递，

⁵声学气体测温法利用性质与腔体几何均已知的气体共振频率，推断热力学温度或玻尔兹曼常数。

离锚点越远，计量溯源链就越不直接。新开尔文允许在所关注的温度上直接进行原级复现。改革没有改变厨房里的任何事，却在极端温度开辟了更好的路线。

官方实用温标

多数实验室并不直接使用热力学温度，而是使用 ITS-90，即 1990 年国际温标：一套由固定点和内插公式构成的实用温标。人们知道 ITS-90 与热力学温度存在差异：差值 $T - T_{90}$ 已被测量、制表并发布。这套工作温标是对热力学温度有据可查的近似。它就是第 10 日「所有模型都是错的，但有些很有用」的实例，只不过偏差已被驯服成一张查找表。

摩尔：放大的一打——化学家提出异议

自 2019 年起，一摩尔精确等于 $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 个实体。它是一个计数，已与千克脱钩。一些化学家提出尖锐异议：如果摩尔只是一个数，「物质的量」真的是基本量吗，还是一个穿上单位外衣的无量纲计数？一打不是基本单位，摩尔为什么是？这场争论并非咬文嚼字，而是触及一个问题：拥有七个基本单位的 SI 反映的是自然，还是委员会的历史？

坎德拉：外星文明永远无法从物理推导它

坎德拉为频率 540×10^{12} Hz 的单色辐射——约 555 nm 的绿光——固定了 $K_{cd} = 683$ lm/W。这个频率位于明视觉光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 的峰值； $V(\lambda)$ 是国际照明委员会（CIE）在 1924 年根据一组规模不大的观察者样本采纳的标准人眼响应曲线。光度学用 $V(\lambda)$ 为其他所有波长加权。

因此，在光速、作用量子 and 元电荷之间，第七个定义席位正式收录的竟是人类视网膜的平均敏感性。就连 683 也是为了与基于蜡烛的标准保持连续而反向确定的。把七个定义数值交给一个外星文明，它可以复现全部七个 SI 单位，却无法仅从物理学推导出其中任何一个单位的历史尺度选择。坎德拉的独特之处，在于其定义额外加入了人类视觉响应函数，而不是因为其余六个数值尺度是必然的。

那么，为什么是七个？审慎的答案也许是零

这个数目由历史造就。麦克斯韦提出长度、质量和时间；乔治在 1901 年主张电磁学需要第四个单位；摩尔与坎德拉又分别为化学和照明加入。基本单位与导出单位之分是一种记账约定，而不是一项自然发现。

普朗克单位把 c 、 h 、 G ，以及通常还有 k ，设为一，向相反方向推进：长度约 1.62×10^{-35} m，时间约 5.39×10^{-44} s，温度约 1.42×10^{32} K。然而，普朗克质量约为 22 微克，大致相当于一枚蚤卵；与小得无法想象的长度和巨大温度并列时，它竟离奇地接近人类尺度。这种并置本身并不是层级问题；真正的物理问题是电弱尺

度与普朗克尺度之间的巨大鸿沟，第 45 日将再次讨论。达夫的问题仍在：普朗克单位是自然的单位，还是一套更整洁的任意网格？

第六部分时间凌乱的边界

秒与地球形状相撞

地球是一只糟糕的钟。月球潮汐使地球自转逐渐减慢，日长每世纪增加约 1.7 毫秒。地核与地幔交换角动量；地壳仍在从约一万年前的冰期中回弹；大气随厄尔尼诺而运动；地震会改变转动惯量。这种摆动并不规则。

因此，计时人员同时维护三种时间。国际原子时 TAI 只数铯原子的节拍，不看天空。世界时 UT1 测量地球实际的自转角，它决定天文正午。协调世界时 UTC 以原子秒运行，但会在需要时插入闰秒⁶，把它与 UT1 的差控制在 0.9 秒以内。自 1972 年以来共插入 27 个闰秒，最近一次是在 2016 年 12 月 31 日。

闰秒无法提前很久安排——由于地球自转不可预测，通知通常只会提前约六个月发布——而且它们曾扰乱计算机系统。2022 年 11 月，CGPM 决议不晚于 2035 年增大 UT1 与 UTC 之间允许的差值，预期由此让闰秒调整长期停用。「废除闰秒」是一种方便的简称，并非决议的原文。

随后，地球加速了。2020 至 2024 年间出现了一些异常短的日子，由此带来一个史无前例的可能性：负闰秒，也就是只有 59 秒的一分钟。多数闰秒软件都假定调整方向为正；反方向的调整从未实际部署。

前沿 A1 ● 已确立 ● 外推

全球变暖正在推迟第一个负闰秒

邓肯·阿格纽于 2024 年 3 月 27 日在 *Nature* 628: 333–336 发表了这项分析。地球自转的两种变化正在相互抵消。

第一，自 1972 年以来，液态地核一直在稳定减速。角动量守恒使地球其余部分加速；如今的一天比五十年前短约 0.0025 秒。

第二，格陵兰与南极洲的冰融化后，质量从两极向赤道重新分布；这种变化已由卫星重力测量捕捉。地球变得稍微更扁，自转也随之减慢，如同旋转中的滑冰运动员伸展开双臂。

融冰效应正在抵消地核效应。阿格纽的外推表明，如果没有极地冰损失，UTC 可能会在 2026 年前后首次需要负闰秒；计入融冰效应后，这个时间点推迟到约 2029 年。

证据标签很重要。极地冰损失已可测量地减慢地球自转；这一测量已确立，以卫星重力测量为基础。阿格纽的论文依据当时可得的趋势外推出约 2029 年这个时间点；它并不是一项已经确定的当前预测。这一效应也不是气候变化的「一线好处」：变暖只是在推迟一个软件问题。

⁶闰秒是偶尔对 UTC 作出的一秒调整，使民用原子时与地球并不规则的自转时间 UT1 保持接近。

认识论上的回报令人惊叹。钟已精密到足以探测另一种行星过程。我们能从铯原子的计时中听见冰盖融化。第 9 日的耦合系统、第 177 日的气候与第 13 日的计量学，在一个可能于 2029 年出现、也可能不会出现的秒上相遇。

前沿 A2 ● 已确立

海平面是时钟彼此一致之处

在 10^{-18} 量级，钟的速率取决于它所在的位置。把一只钟抬高一厘米，广义相对论会使其走时速率改变约 1.1×10^{-18} ；如今，这个量已经可以测量。因此，比较两台前沿时钟，需要把它们相对大地水准面的高度确定到约一厘米——而全球大地水准面还没有被了解得这么精确。

秒的定义撞上了大地测量学。阿尔内·比耶哈马尔在 1985 年提出，可把相对论大地水准面定义为最接近平均海平面、且时钟以相同速率运行的曲面。海平面就是时钟彼此一致之处。

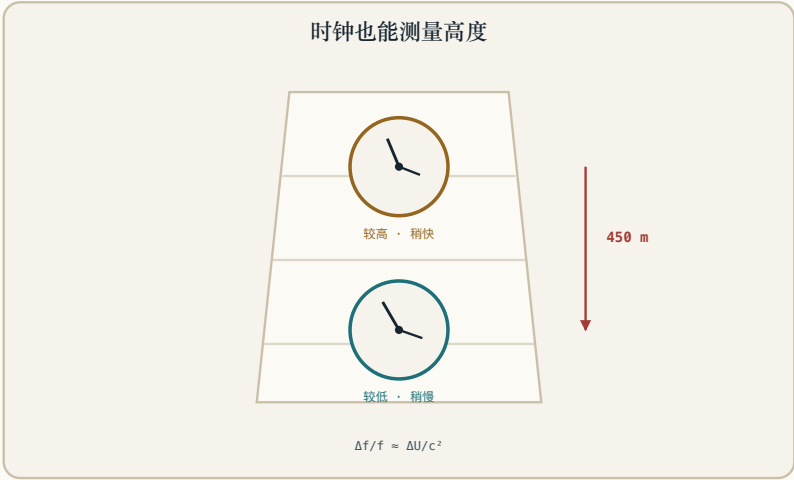
把这个想法反过来，钟测水准⁷就能把时钟当作高度计。香取秀俊的团队把两台可运输锶光晶格钟带进东京晴空塔，一台放在塔底，另一台放在高 450 m 的观景台上，并用 700 m 光纤连接。上方时钟在约 429 万亿赫兹的频率上快了约 21.18 Hz，以 $(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$ 的水平检验了引力红移（Takamoto et al., *Nature Photonics* 14: 411–415, 2020 年 4 月 6 日）。

时钟网络可以利用这些过程对时间的引力效应，监测火山膨胀、地壳形变与冰层变薄。我们原本打算测量时间，结果造出了一台测量整颗行星高度的仪器。

⁷钟测水准通过比较时钟速率来推断引力势差，进而推断高度差。

图 · 作为高度计的时钟

东京晴空塔中垂直相隔 450 米的两台铯钟，测出了走时速率的相对论差异。



广义相对论使高处的钟走得稍快。现代光学钟比较可以把频率差转换为重力势差，并由此测量厘米乃至更小尺度的高程变化。

第七部分消耗纠缠

底线之下的底线——以及为何压缩并非免费

量子力学如今从被测量的对象，变成了被消耗的资源。

探测 N 个相互独立的原子，每次读出都会坍塌为「激发」或「未激发」。独立的量子结果只会让频率不确定度按 $1/\sqrt{N}$ 下降。这种量子投影噪声⁸确立了标准量子极限⁹。它是无关联粒子的极限，不是激光器、真空系统或经费预算的极限。

出路是让原子彼此关联。自旋压缩态¹⁰通过让一个集体分量更嘈杂，使另一个分量更安静。原则上，极限标度可以从 $1/\sqrt{N}$ 朝海森堡极限 $1/N$ 改善。纠缠由此成为资源。

这种方法确实有效。埃克纳及其同事利用里德伯相互作用压缩一个可编程铯钟阵列，获得约 4 dB 的计量增益、1 s 时 $1.087(1) \times 10^{-15}$ 的稳定度，以及低于 SQL 1.94(1) dB 的性能 (*Nature* 621: 734–739, 2023 年 8 月 30 日)。2025 年，二维晶格中两个各含约 30 000 个铯原子的自旋压缩系综，通过腔 QED 量子无损测量读

⁸量子投影噪声是测量彼此独立的量子二能级系统时产生的统计涨落。

⁹标准量子极限给出 N 个独立、无关联探针所能达到的 $1/\sqrt{N}$ 精密度标度。

¹⁰自旋压缩让一个系综发生纠缠，以共轭方向上更大的量子不确定度为代价，减小测量方向上的量子不确定度。

出，达到 1.1×10^{-18} 的分数频率精密度，相对 SQL 获得 2.0(2) dB 增益 (*Physical Review Letters* 135: 193202, 2025 年 11 月 7 日)；这是资料来源中报告的最精密纠缠增强时钟。

前沿 A3 ● 已确立 ● 夸大解读

标题省略的限制条件

只有当量子投影噪声是限制因素时，压缩才有帮助。在大型光晶格钟中，情况通常并非如此。一旦系综中的原子多于一个不大的数量，探测激光噪声就可能占据主导；测量周期之间的死时间还会通过迪克效应使这种噪声发生混叠。

舒尔特、利斯达特、施密特、斯特尔和哈默勒量化了这一限制 (*Nature Communications* 11: 5955, 2020)。若使用当时领先的时钟激光器，对单个系综进行传统周期性拉姆齐探测，只有在临界原子数约一千以下时，压缩才能改善锶光晶格钟。即使激光器性能提高十倍，临界数仍低于约 100 000。小型多离子阱与光镊阵列可以在不同于大型晶格系综的区间获益；单个离子本身则没有可供压缩的系综。

这些演示与增益都是真实的，但其回报取决于特定噪声区间，而许多旗舰时钟并不处在该区间。「纠缠会让时钟无限趋近完美」只在某种极限下成立，放到实际实验室中则会误导。

未决问题

仍无定论

- 「物质的量」是真正的基本量，还是说摩尔不过是获得诺贝尔奖的一打？
- 当坎德拉的加权依据是 1924 年的平均视网膜时，它还应当保留为基本单位吗？
- 全球大地水准面能否有朝一日被确定到一厘米？如果不能，限制重新定义秒的可能不是时钟，而是地图。
- 新秒应当建立在单一光学跃迁上——简单却脆弱——还是建立在加权组合上——鲁棒、不够优雅，却更能适应未来？BIPM 一份日期为 2026 年 6 月 30 日的决议草案记载，目前尚未达成共识，并要求计量界向 2030 年第 29 届 CGPM 提交重新定义方案。
- 固定一个常数会不会阻止我们发现它的变化？不会：只有无量纲比值承载不依赖单位的主张，而这些比值仍可测量。重要的是理解其中原因。
- 如果精确数值是人类历史的化石，外星文明会为同一套物理使用不同数字。科学的哪些部分描述世界，哪些部分记录着测量者是我们？

结语

机器中的幽灵

2019 年的 SI 是一座由不变量建成的大教堂。其中没有任何东西会生锈、被盗、沾上指纹，或从紧张的技术员手中掉落。它是官僚机构建造过的最耐久之物之一。

然而，在它的岩芯剖面底部，埋着：

- 一条测量有误的子午线，穿过大革命时期的法国，其中包括梅尚隐瞒、并最终吞噬了他的偏差；
- 一立方分米水，在 1799 年称量，偏差为百万分之 28；
- 四年的月球照片，拍摄于 1954 至 1958 年，并与一份在人们发现电子之前就已算出的太阳表核对。

我们没有逃离历史，而是把历史编码了进去。常数如今是精确的，但它们精确地是我们的数字：这些值是在标准过渡时的不确定度范围内，为保持与先前标准和测量的连续而选定的。这不是缺陷，而是整个体系的运作方式。

因此，单位是一份横跨空间与时间的条约。拒绝把 c 取整，就是向所有先于我们完成测量的人承诺：他们数字的含义不会悄然改变。梅尚隐瞒了一处偏差，那处偏差也击垮了他。两个世纪后，计量学理解了它；它没有改变米的大小，而是维持了建于其上的一切的连续性。

核心观点

SI 的精确数值是为保持与所取代标准的连续而反向确定的化石。单位不仅是跨越空间的条约，也是跨越时间的条约；现代计量学反复把测量值转化为精确定义，同时把不确定度移到别处。

最佳类比

钻穿一层层定义，你会在基岩处找到法国子午线、大革命时期的水和月球照片。量子霍尔阶梯又添了一幅图景：无序让精确的整数标准变得可用，却不改变其数值。

仍在争论

纠缠突破了标准量子极限，但激光噪声可能抹去实际增益；极地冰损失可测量地减慢地球自转，但负闰秒的日期仍是外推；大地测量还可能限制下一次秒的定义。

信息（离散性作为可信度的根基）· 计算（计量溯源链与闰秒软件）· 能量（约瑟夫森结、量子霍尔标准与声学气体测温法）· 涌现（在无序中存续的拓扑保护）。回望第 4 日仍有帮助，但范围必须明确：一些 B 类评定确实包含专家对模型与系统效应的判断，但这一类别本身并不等同于贝叶斯先验。

返回主线 · 第 14 日

综合：化石保留了什么

请带着两个想法继续前行。第一，测量精密度可以从系统内部测得，而测量正确度需要外部参考。第二，不确定度预算可以把重复观测统计与校准数据、模型、技术规格和专家的审慎判断结合起来。经过校准的回应，应当辨明这些输入，并说明其适用范围。

资料来源与延伸阅读

1. Markowitz, W., Hall, R. G., Essen, L. & Parry, J. V. L. (1958). 「Frequency of Cesium in Terms of Ephemeris Time.」 *Physical Review Letters* **1**(3): 105–107. doi:10.1103/PhysRevLett.1.105——9 192 631 770 的来源；该数依据 1954.0–1958.5 年月球相机观测测得，每历书秒的不确定度为 ± 20 个周期。第 13 届 CGPM 于 1967 年采纳该值，并舍弃不确定度。
2. 第 11 届 CGPM (1960)，第 9 号决议：秒等于历书时 1900 年 1 月 0 日 12 时所对应回归年的 $1/31\,556\,925.9747$ 。该年份由纽康的太阳表计算得出，并非观测所得。官方历史见 Dimarcq et al., *Metrologia* **61**:012001 (2024), §2。
3. 第 3 届 CGPM (1901)，第 1 号声明——升等于最大密度时 1 kg 水的体积；第 12 届 CGPM (1964) 第 6 号决议将其废止。BIPM 决议。在这 63 年间，1 litre = 1.000 028 dm³。
4. 「The Millilitre.」 *Nature* **124**: 622 (1929). nature.com/articles/124622a0. 拉瓦锡与阿羽依的临时标准：勒费弗尔-吉诺与法布罗尼在 1799 年测定一立方分米水的质量——它是 Le Grand K 的祖先，因而也是 h 的祖先。
5. Stock, M., Davis, R., de Mirandés, E. & Milton, M. J. T. (2019). 「The revision of the SI—the result of three decades of progress in metrology.」 *Metrologia* **56**: 022001. doi:10.1088/1681-7575/ab0013——2019 年 5 月 20 日的电学阶跃：与电压有关的量增大 1.067×10^{-7} ，与电阻有关的量增大 1.779×10^{-8} 。
6. BIPM, *SI Brochure, 9th ed., Appendix 2: Practical realization of the ampere* (2019 年 5 月 20 日)。BIPM PDF。KJ = 483 597.848 416 984 GHz/V 和 RK = 25 812.807 459 3045 Ω 均为精确值；RK 比 RK-90 大 17.793×10^{-9} 。
7. Taylor, B. N. & Witt, T. J. (1989)；CIPM 建议采纳 **KJ-90 = 483 597.9 GHz/V** 和 **RK-90 = 25 812.807 Ω** ，自 1990 年 1 月 1 日起生效。关于正式 SI 计量溯源性的丧失，见 Kaneko, N. (2017)，「Review of quantum electrical standards…」，*IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering* **12**: 1–13。
8. Josephson, B. D. (1962). 「Possible new effects in superconductive tunnelling.」 *Physics Letters* **1**: 251–253. 1973 年诺贝尔物理学奖。
9. von Klitzing, K., Dorda, G. & Pepper, M. (1980). 「New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance.」 *Physical Review Letters* **45**: 494. 1985 年诺贝尔物理学奖。关于拓扑起源，见 Thouless, Kohmoto, Nightingale & den Nijs, *Physical Review Letters* **49**: 405 (1982)。
10. JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. BIPM JCGM 出版物。误差与不确定度的区别，A 类评定与 B 类评定，以及定义不确定度。

11. Agnew, D. C. (2024). 「A global timekeeping problem postponed by global warming.」 *Nature* **628**: 333–336. 发表于 2024 年 3 月 27 日; doi:10.1038/s41586-024-07170-0——极地冰损失减慢了地球自转: 论文的外推把可能首次出现的负闰秒从约 2026 年推迟到约 2029 年。本文并未把该日期写成已经确定的当前预测。
12. 第 27 届 CGPM (2022 年 11 月), 第 4 号决议 *On the use and future development of UTC*——不晚于 2035 年增大 $|\text{UT1} - \text{UTC}|$ 所允许的最大值, 使闰秒调整长期停用。同次会议的第 3 号决议采纳了前缀 *ronna*、*quetta*、*ronto* 和 *quecto*。
13. Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Yahagi, T., Kokado, K., Shinkai, H. & Katori, H. (2020). 「Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks.」 *Nature Photonics* **14**: 411–415. 2020 年 4 月 6 日; doi:10.1038/s41566-020-0619-8——东京晴空塔, 高差 450 m, 以 $(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$ 的水平检验红移。
14. Mehlstäubler, T. E., Grosche, G., Lisdat, C., Schmidt, P. O. & Denker, H. (2018). 「Atomic clocks for geodesy.」 *Reports on Progress in Physics* **81**: 064401. 钟测水准, 以及 10^{-18} 时钟性能与 1 cm 高度之间的对应关系。另见 Denker et al., *Journal of Geodesy* **92**: 487–516 (2018); Bjerhammar (1985) 关于相对论大地水准面的讨论; 以及 Vermeer (1983) 关于「chronometric levelling」的讨论。
15. Eckner, W. J., Darkwah Oppong, N., Cao, A., Young, A. W., Milner, W. R., Robinson, J. M., Ye, J. & Kaufman, A. M. (2023). 「Realizing spin squeezing with Rydberg interactions in an optical clock.」 *Nature* **621**: 734–739. 2023 年 8 月 30 日——约 4 dB 计量增益, 1 s 时稳定度为 $1.087(1) \times 10^{-15}$, 性能低于标准量子极限 $1.94(1)$ dB。
16. 「Clock Precision beyond the Standard Quantum Limit at the 10^{-18} Level.」 *Physical Review Letters* **135**: 193202 (2025 年 11 月 7 日)。arXiv:2505.04538——两个各含约 30 000 个 ^{87}Sr 原子的自旋压缩系综; 经 SPAM 修正后, 分数频率精密度为 1.1×10^{-18} , 相对 SQL 增益为 $2.0(2)$ dB。
17. Schulte, M., Lisdat, C., Schmidt, P. O., Sterr, U. & Hammerer, K. (2020). 「Prospects and challenges for squeezing-enhanced optical atomic clocks.」 *Nature Communications* **11**: 5955. 使用当时领先的时钟激光器时, 只有在临界原子数约 1000 以下, 压缩才有助于 Sr 光晶格钟; 即使激光器性能提高十倍, 临界数仍低于约 10^3 。
18. Itano, W. M. et al. (1993). 「Quantum projection noise: Population fluctuations in two-level systems.」 *Physical Review A* **47**: 3554. 另见 Wineland et al. (1992), *Physical Review A* **46**: R6797, 以及 Kitagawa & Ueda (1993), *Physical Review A* **47**: 5138; 二者是自旋压缩的奠基论文。
19. Dimarcq, N. et al. (2024). 「Roadmap towards the redefinition of the second.」 *Metrologia* **61**: 012001. 强制性标准及已发布的达成程度; ^{87}Sr 698 nm 跃迁于 2006 年 10 月成为秒的次级表示。关于单一跃迁与组合方案的选择, 见 NIST 的公众概要; 另见 BIPM 2026 年 6 月 30 日的决议草案, 其中记载尚无共识, 并要求在 2030 年提交方案。
20. 第 16 届 CGPM (1979), 第 3 号决议: 通过 540×10^{12} Hz 和 $1/683 \text{ W/sr}$ 定义坎德拉。该频率是 CIE 1924 明视觉光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 的峰值; 683 保持了与烛光标准的连续性。
21. Fischer, J. et al. (2018). 「The Boltzmann project.」 *Metrologia* **55**: R1–R20. 声学气体测温法、介电常数气体测温法与约翰逊噪声测温法, 是确定 k 的三条独立路线。关于实用温标, 见 BIPM 的 *Supplementary Information for the ITS-90* 以及已发布的 $T - T_{90}$ 差值。

可选附录 · 第 013 日 · 2/2

研究前沿

正文之外 · 可选阅读

2025 年 10 月 22 日, *Nature* 发表了 Joseph Aziz 与 Richard Howl 的一篇论文。论文题为 *Classical theories of gravity produce entanglement* ; 如果结论成立, 它将推翻一项旗舰级拟议量子引力实验的推理逻辑。该实验会让两个质量体处于叠加态, 仅通过引力相互作用, 再检验它们最终是否纠缠。局域经典信道不应产生纠缠, 因此, 阳性结果一直被视为引力本身必定量子化的证据。

Aziz 与 Howl 认为, 在完整量子场论中, 这一推论会发生变化: 经典引力场同样可以使两个质量体纠缠。不到三周, Marletto、Oppenheim、Vedral、Wilson、Diósi 与 Di Biagio 就发布了首批技术回应; Xue 团队与 Gundhi 团队在 2026 年 4 月跟进。其中数篇回应指出, 一旦把被舍弃的跃迁振幅补回, 相关效应便会相互抵消。这场争论仍在进行且存在分歧; 关键反驳仍是预印本, 尚未形成经同行评议的定论。

这就是从内部看到的研究前沿。下文多数条目是 2020 年以后经同行评议的结果。其中一个核心条目——钷-229 反馈回路时钟及其暗物质约束——是 2026 年 6 月 3 日发布的预印本, 全文均明确标注。论文发表只说明一项主张已可供检验, 并不说明其结论已经盖棺定论。

图 · 研究前沿的证据集中在低就绪度一端

已确立的测量、现场部署、实验室演示、预印本、理论方案与进行中的争论，代表不同种类的证据。研究前沿的证据集中在低就绪度一端，但这些类别回答的是不同问题，并不构成一套普适的总排序。



前沿研究不能只按标题排序。可行性提案、实验室演示、同行评议测量与现场部署回答的是不同问题，需要分别标示，不能简单排成同一条高低轴。

如何阅读本附录

主线下潜介绍了已经稳定下来的计量学；附录一则揭示其中继承下来的历史。本附录有意保留其暂定性质：它把实验或计算已经演示的内容，与由此向外推得的更强结论区分开来。请始终记住第 2 日的问题：「什么结果能够证明这项主张为假？」无论发表平台多有声望，无法回答这个问题的主张都尚未就绪。

第一部分时钟物种大爆发

如今，人人都在造不一样的时钟

二十年来，光学原子钟领域基本是两条路线的竞赛：一边是晶格中的中性原子，尤其是锶或镱；另一边是单个囚禁离子，尤其是铝或镱。2020 年以来，这一领域开始分化，因为目标已不只是计时。不同的时钟对不同的潜在新物理响应不同；当一整套时钟彼此不一致时，变化的常数或暗物质场就可能显露踪迹。

用剥去电子的原子造钟

从氩原子的十八个电子中剥去十三个，剩下的就是 Ar^{13+} ：一种高电荷态离子（HCI），其电子深处于原子核场中。它对困扰其他时钟的杂散场相对不敏感，而高电荷态离子中的某些跃迁对 α 异常敏感。

障碍在于如何冷却并读出一种没有可用冷却跃迁的离子。2022 年，PTB 的 Steven King、Lukas Spieß、Piet Schmidt 及同事把 Ar^{13+} 与一个铍离子共同囚禁，通过协同冷却为其降温，并借助量子逻辑读出。首台 HCI 光学原子钟在首次演示中便达到 2.2×10^{-17} 的系统不确定度（King 等，*Nature* 611: 43–47, 2022 年 11 月 2 日）。对 $^{36}\text{Ar}^{13+}$ 与 $^{40}\text{Ar}^{13+}$ 的比较还首次分辨出多电子体系中核反冲的 QED 贡献。

● 已确立的演示 ● 尚属外推 这项时钟演示已经确立。目前它的不确定度约为最佳 Al^+ 时钟结果的二十多倍，而且尚无 HCI 时钟给出有竞争力的新物理约束。它的吸引力在于可能达到更高上限、具备更强敏感度，而不是已经交付了这样的结果。

用分子造钟

原子钟对 α 高度敏感。质子—电子质量比 $\mu = m_p/m_e \approx 1836$ 则不那么容易显现，因为原子对核质量的响应很弱。分子会振动，而它的振动频率直接取决于核质量。

最简单的分子 HD^+ 含有一个质子、一个氘核与一个电子。2020 年，两个团队推进了它的精密光谱学：Alighanbari、Giri、Constantin、Korobov 与 Schiller (*Nature* 581: 152–158)，以及 Patra、Germann、Karr、Koelemeij 等人 (*Science* 369: 1238)。他们在检验三体 QED 的同时，把 μ 测定到万亿分之一量级。Kortunov 等人实现了约 3×10^{11} 的分辨本领，对应约 3.3×10^{-12} 的跃迁频率相对不确定度 (*Nature Physics* 17: 569, 2021)。

因此，氢分子离子正从单纯的检验对象，转变为基本常数的一条独立测定途径。当两项领先的 α 测量已经存在 5.4σ 的分歧时，独立路径尤为重要。

能够出海的时钟

2022 年，Vector Atomic 制造的三台光学钟随一艘海军舰艇绕夏威夷群岛航行了二十天。每套 35 升的设备都包含碘光谱仪、光纤频率梳与控制装置。这些时钟连续运行，累计计时误差低于每天 300 皮秒（Roslund 等，*Nature* 628: 736–740, 2024 年 4 月 24 日）。

这并不是精密度纪录。论文把海上时钟与相对不准确度低于 10^{-18} 的实验室光学钟作对照，但海上数据衡量的是计时误差和不稳定度，不能视为口径一致的准确度比较。这个结果之所以重要，是因为领先的实验室时钟并不容易部署：时钟大地测量、暗物质网络与不依赖 GPS 的导航，不仅受精密度限制，也受设备的坚固耐用程度限制。● 已确立

图 · 就绪度阶梯

下表按实际演示内容比较 2020 年后的八项主张，而不是按标题有多吸睛来排序。可靠测量、现场部署、方法演示、预印本结果与理论方案是不同的证据类别，并非一套普适排名。



反氢下落、轨道等效原理检验、电子电偶极矩上限、特种光学钟和远距离暗物质检验都有测量；钍核钟约束仍是预印本，单引力子探测仍是提案。

主张	已演示	尚未演示或仍存的限定条件	状态
反氢向下坠落	ALPHA-g 测得 $g\text{H} = 0.75 \pm 0.13(\text{stat}+\text{sys}) \pm 0.16(\text{sim})$ ，单位为 g。	是否与普通物质的引力相等；该检验的相对不确定度约为 25%。	已确立，粗略检验
在 10^{-15} 量级检验弱等效原理	MICROSCOPE 在轨运行 2.5 年后发现 Eötvös 比与零相容，并设置了一对同成分对照质量体。	未探测到等效原理违背。	已确立的零结果
电子电偶极矩（eEDM）低于 $4.1 \times 10^{-30} \text{ e} \cdot \text{cm}$	HfF^+ 实验以约三秒的相干时间给出 90% 置信水平上限。	声称它直接排除 10 TeV 以上的所有物理，取决于耦合与抵消。	已确立，范围受模型约束
用 Ar^{13+} 制成的时钟	首台 HCl 光学原子钟达到 2.2×10^{-17} 的系统不确定度，并分辨出 QED 核反冲。	尚无 HCl 时钟给出有竞争力的 alpha 变化约束。	已确立的演示

主张	已演示	尚未演示或仍存的限定条件	状态
出海的光学钟	三台 35 升碘钟运行 20 天，计时误差低于 300 ps/天。	实验室光学钟更准确，但计时误差数据并非口径一致的准确度指标；该结果考察的是设备能否在复杂环境中可靠部署。	已确立的部署
2,220 km 光学腔链路协助搜寻暗物质	相隔 2,220 km 的光学腔稳频激光器频率比较，加上 GPS 原子钟，首次约束了仅与电子耦合的标量暗物质。	未探测到暗物质；这是使用已确立方法得到的零结果。	已确立的方法
核钟约束强相互作用	2026 年 6 月 3 日的一篇预印本报告闭环反馈回路，并在 20 秒至一天的时间尺度上给出暗物质约束。	仍需同行评议和独立确认；alpha 敏感度因子 $K = 5900 \pm 2300$ 带来很大的理论不确定度。	有前景的预印本
探测单个引力子	2024 年的一篇论文为高质量谐振器中的声子分辨吸收提出理论可行性论证。	尚未建成探测器，也未探测到引力子；即使观察到量子化吸收，也未必能证明场已量子化。	理论方案

第二部分核钟长大了

从「我们激发了它」到「我们用它约束暗物质」

主线下潜把钍-229 核钟作为一项引人注目的演示来介绍：2024 年 4 月，PTB 用激光激发原子核；同年 9 月，它又与铯钟直接比较。当时，暗物质应用是理由充分的愿景，尚不是已经取得的结果。

如今，由维也纳工业大学牵头的合作团队报告称，他们闭合了反馈回路——这一步把光谱测量与真正运行的时钟区分开来。连续吸收光谱提供快速反馈，将一台连续波激光器稳定到嵌入毫米尺度氟化钙晶体中的 ²²⁹Th 原子核 148 nm 跃迁；实验在室温下完成。随后，团队在 20 秒到一天的时间尺度上搜寻该跃迁的周期变化与缓慢漂移。

报告给出的光子耦合约束可与原子钟界限竞争。报告对强相互作用与夸克质量的敏感度触及电子跃迁时钟无法进入的参数空间，因为钍同质异能态的能量来自电磁相互作用与强相互作用贡献的近乎抵消。

● 预印本：未经同行评议 该结果见 arXiv:2606.04997，提交于 2026 年 6 月 3 日，在本文所述时间点尚未经过同行评议。如果它经得住审视，便确立了一种新方法。推得的约束范围还依赖一个相对不确定度约为 40% 的 alpha 敏感度因子 $K = 5900 \pm 2300$ (Beeks 等, *Nature Communications* 16: 9147, 2025)。此外，强相互作用与夸克耦合的精确核敏感度因子目前尚无法计算，因此预印本以 10^4 和 10^5 展示示意性的基准带。这个相差十倍的跨度是一段基准范围，而不是经统计量化的不确定度分布。这恰好重现了第 6 日的模式：严密的实验乘上宽松的系数。

为什么这项结果可能重要

按照预印本的报告，核钟跨过了一道意义重大的门槛：它不再只是跃迁可以被激发的对象，而成了用来约束另一种现象的仪器。基布尔天平与光学频率梳也是在完成这种从对象到仪器的转变时，才产生了变革性的科学影响。本附录原稿预测，这种时钟会在 2040 年前进入教科书；这只是编辑层面的预测，核钟是否真正跨过门槛，仍要由同行评议与独立使用来决定。

第三部分把时钟用作暗物质探测器

相隔遥远的传感器，看见同一道波的不同部分

假设暗物质是一种超轻标量场¹¹，而不是撞击探测器的粒子。如果这种场与普通物质耦合，常数就可能振荡：电子质量会轻微变化，时钟频率也会随之摆动。

对最轻的候选者而言，波长可能超过一间实验室，甚至超过整个太阳系。于是，同一地点的每台仪器在同一时刻采样到的场几乎完全相同。有些耦合会让同地且响应相同的参考频率一起移动，从而在比较中抵消。对这样的参考对而言，该耦合在结构上不可见，并非只是约束得不够强。

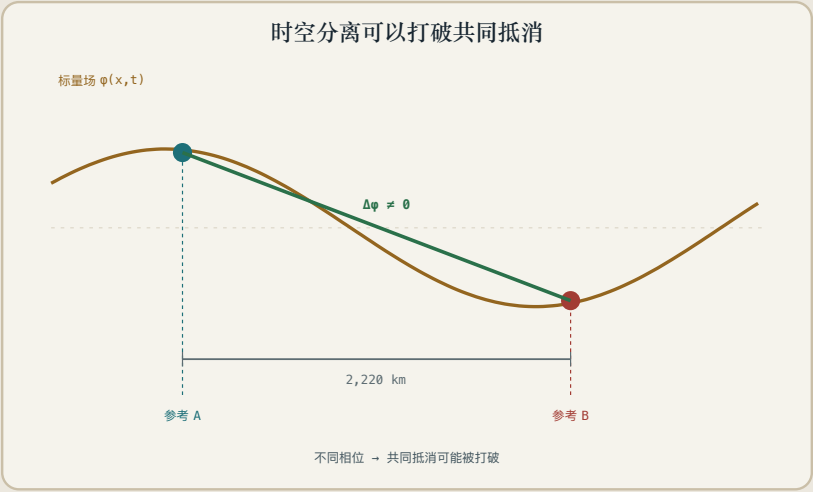
2025 年的解决方案，是不再只做局域比较。Filzinger、Caddell、Jani、Steinel、Giani、Huntemann 与 Roberts 比较了在时间和空间上分离的传感器，使它们采样不同的场相位。现有数据包括相隔 2,220 km、由光纤连接的两个光学腔之间的频率比较，以及 GPS 卫星上的原子钟。该分析针对 10^{-19} 至 $2 \times 10^{-15} \text{ eV}/c^2$ 的质量范围，首次约束了仅与电子耦合的标量暗物质 (*Physical Review Letters* 134: 031001, 2025 年 1 月 23 日)。

● 已确立：零结果 实验没有探测到暗物质。进展在于，无需建造新探测器就打开了一扇新窗口：地理基线本身成了实验装置。

¹¹ 超轻标量暗物质模型把暗物质视为相干振荡的场；其巨大波长可使它在天文尺度上表现得像一道波。

图 · 分离打破盲区

当两个响应相同的参考源采样完全共同的场偏移时，不会产生差分信号。把传感器在时间和空间上分离，可以让它们采样不同相位或到达时刻，从而使基线成为探测器的一部分。



示意图展示共同响应怎样因时空分离而不再抵消；实际研究比较的是腔稳激光并另行分析 GPS 钟，而且在可探测质量范围内主要依靠采样时间延迟，而非图中的空间相位。

传感器几何布局	差分信号	解释
地点、相位与响应都相同	对于完全共同的偏移，即使场效应很大，差分也为零。	响应相同的参考源存在结构性盲区：共模运动在比较中抵消。
由长基线分隔	采样到不同相位或到达时刻，可以产生非零差值。	抵消可以被打破：传感器间距成为实验装置的一部分。
场的波长更短	较小的间距也能产生较大的相位差。	质量更大的候选场可以在较短基线上发生变化。
Filzinger 等人的分析	2,220 km 光学腔链路加 GPS 时钟。	对相关质量范围，传感器采样时刻之间的时间延迟才是主导的实际效应；波形几何图表达的是同一种打破抵消原理。

第四部分用量子物体称量引力

小到一枚跳蚤卵——然后有趣的部分才开始

引力测量通常使用很大的源质量——Cavendish 用铅球，现代的 G 测量则使用数千克钨——因为让等密度球体变小，会迅速削弱信号。在几何布局相近时，源质量按 R^3 缩放，因此半径减半，可用的引力效应就会缩小到八分之一。

2021 年，Tobias Westphal、Hans Hepach、Jeremias Pfaff 与 Markus Aspelmeyer 测量了两个半径 1 mm、质量 90 mg 的金球之间的引力耦合；这个质量约相当于四只家蝇。微型扭秤经过 350 小时积分，达到 $4 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$ 的系统准确度（*Nature* 591: 225–228，2021 年 3 月 11 日）。当时，这是引力场被直接测量过的最小源质量。

普朗克质量约为 22 微克；在一些量子引力方案中，它是一个目标尺度，而不是硬性的实验阈值。若能把源质量降至这一尺度附近或以下，使源质量进入量子叠加态就可能成为现实目标，进而提出一个问题：它的引力场是否也必须是量子的？

从另一个方向出发，Holger Müller 团队把原子束缚在光晶格中，取代自由落体原子仅有的数秒测量时间。他们让干涉仪保持开启长达一分钟，测得微型源质量产生的引力为 $33.3 \pm 5.6(\text{stat}) \pm 2.7(\text{syst}) \text{ nm/s}^2$ ，总体准确度为 6.2 nm/s^2 ——比同一源质量的自由落体测量好四倍以上。结果与牛顿引力一致，并在所分析的自然参数区域内排除了具有屏蔽机制的第五力变色龙模型与对称子模型（Panda 等，*Nature* 631: 515–520，2024 年 7 月 18 日）。

前沿 B1 ● 已确立 ● 粗略精密度

反物质向下坠落；确切速率仍是未决问题

几十年来，一种边缘但可检验的可能性始终存在：反物质也许会向上坠落。广义相对论的预测相反，但此前尚未直接检验这一预测。

2023 年，欧洲核子研究中心（CERN）的 ALPHA 合作组把反氢囚禁在竖直的 ALPHA-g 磁瓶中，降低顶部与底部的势垒，并在一个月内存记录约 2,000 个反原子的湮灭位置（*Nature*，2023 年 9 月 28 日）。

反氢会向下坠落。以 g 为单位，其加速度为 $g_{\bar{H}} = 0.75 \pm 0.13 (\text{stat} + \text{sys}) \pm 0.16 (\text{sim})$ ，与吸引力一致，相对不确定度约为 25%。方向已经确立：是否与普通物质完全相等则尚未确立。普通物质的等效原理已经检验到约 10^{15} 分之一，两类检验之间相差十四个数量级。哪怕要达到 1%，也需要把磁场梯度与初始条件带来的系统效应降低一个数量级；AEGIS 与 GBAR 正采用不同方法，因此也面对不同的失效模式。

前沿 B2 ● 已确立

在轨道上把伽利略实验做到小数点后十五位

弱等效原理认为，物体成分不会改变自由落体加速度。MICROSCOPE 卫星在轨道上用彼此嵌套的钛合金与铂质量体检验这一原理，测量维持它们对齐所需的静电力。在 2.5 年任务期间，它获得五个月的干净科学数据，其中三分之一的数据还包含一对同成分对照质量体（Touboul 等，*Physical Review Letters* 129: 121102, 2022 年 9 月 14 日）。

Eötvös 比 η 在 10^{-15} 量级上与零相容，没有发现违背。因此，普通物质已经检验到小数点后十五位，而反物质直接检验的相对不确定度仍约为四分之一。

前沿 B3

● 已确立

● 依赖模型

电子的偶极矩——以及桌面实验为何能触及对撞机之外

电子电偶极矩（eEDM）并不是对几何圆度的字面测量。它是一个与自旋对齐的电偶极；若其值非零，就会违背宇称与时间反演对称性。标准模型的预测远低于当前实验能力，而许多扩展理论预言的数值在 10^{-27} 至 $10^{-30} e \cdot \text{cm}$ 范围内。因此，非零的 eEDM 将成为新物理的证据。

JILA 囚禁 HfF^+ 分子离子，让其中的电子感受到巨大的内部电场，并使其相干进动长达三秒。Roussy 等人报告（*Science* 381: 46–50, 2023 年 7 月）：

在 90% 置信水平下， $|d_e| < 4.1 \times 10^{-30} e \cdot \text{cm}$ 。

结果与零相容，把此前的上限改进了约 2.4 倍。原始资料用一个类比描述允许的不对称程度：如果把电子放大到地球大小，凸起也比几个原子还小。这只是尺度类比，并非电子形状的字面图像。

常见的「这项实验探测了 10 TeV 以上」之说，只有在对耦合强度作出假设并假定不存在抵消时才成立。这是依赖模型的触及范围，不是对能量前沿的直接排除结论。桌面实验与周长 27 km 的大型强子对撞机（LHC）测量的是不同对象；上限已经确立，但吸睛的比较仍有条件。

第五部分通向安培的两条路线

两种安培复现——以及一个尚未闭合的三角形

2019 年的安培通过元电荷 e 定义：电流就是每秒计数的电荷量。最直观的复现方式是单电子泵¹²：一种纳米尺度的栅极以已知频率 f 每次移动一个电子，因此 $I = ef$ 。在 1 GHz 下，电流约为 160 pA——定义得极为精确，却很难测量。

实用的直接电子计数标准所追求的相对不确定度约为 10^8 分之一。泵得太慢，产生的电流太小，难以用足够低的不确定度作比较；泵得太快，又会漏掉或多送电

¹²单电子泵在每个周期传输一个受控的整数电子数；理想情况下，驱动频率为 f 时产生电流 $I = ef$ 。

子。因此，固定 e 的定义先于足够准确的直接计数复现问世，不过安培仍可通过其他电学标准复现。

时间顺序很重要。2017 年，一个硅单陷阱泵在 7.4 GHz 下超过 1 nA，但电流偏离理想值约百万分之 20，测量不确定度约为百万分之一——远未达到 10^{-8} 目标。2025 年，一项可扩展的硅器件演示让四台泵在 200 MHz 下并联运行，并用三台泵在 2.1 GHz 下产生了超过 2 nA 的平台。这确立了通向更高电流的路线，而不是已经达到 10^{-8} 的相对不确定度目标。

另一条路线通过欧姆定律把约瑟夫森电压标准与量子霍尔电阻标准结合起来，并使用超导低温电流比较仪进行量程转换。2025 年的一项 *Nature Communications* 实验产生了微安电流，相对不确定度低于 10^{-8} 。这是一种已经确立的安培复现，但它从约瑟夫森效应与量子霍尔效应推导电流，而不是独立计数电子。

量子计量三角形 (QMT) 是一项独立比较：单电子泵产生的电流，是否与通过 $V = IR$ 从约瑟夫森电压和量子霍尔电阻推导出的电流一致？仅使用约瑟夫森效应与量子霍尔效应的发生器会重复利用其中两条边，因此无法闭合这项三边检验。

如果反复进行的独立三角形检验在排除系统效应后仍然失败，就需要重新审视三种量子电学效应之间的一致性——或它们复现方式之间的一致性。

在 10^{-8} 量级闭合三角形所需的独立电子泵比较仍未完成。 ● 已确立，低于 10^{-8}

● 有前景：尚未完成

一场更安静的革命：欧姆走出地下室

传统量子霍尔电阻标准需要低于 1 K 的温度和约十特斯拉的磁场，因此只能留在国家级实验室。如今，外延石墨烯标准在 4.2 K、4.5 T 和高电流条件下，测量结果与理想值的一致程度优于 $2 \text{ n}\Omega/\Omega$ 。2025 年的一篇 *Physical Review Applied* 报告发现，设备在研究机构之间经过 800 km 公路运输后仍保持这一表现。低温制冷机系统还可免去液氮。 ● 已确立 性能与公路运输检验已经确立。 ● 尚属预测 从国家级实验室向校准实验室与工业工作台更广泛迁移，目前仍只是预测；如果实现，它将使第 12 日的计量溯源网络趋于扁平。

第六部分最大胆的理论方案

能探测到单个引力子吗？

Freeman Dyson 曾论证，探测单个引力子实际上几乎无望：引力耦合太弱，足以补偿这种弱耦合的探测器可能会在自身引力下坍缩，或需要具有木星般的尺度。

2024 年，Germain Tobar、Sreenath Manikandan、Thomas Beitel 与 Igor Pikovski 提出另一条路线 (*Nature Communications* 15: 7229)。它借鉴光电效应：光的量子化并不是通过亲眼抓住一个光子来推断，而是通过离散的能量吸收来推断。

该方案并没有指定一种通用的数吨级铌探测器。所需质量与材料取决于目标源：

论文估算，针对 GW170817 调谐的铍谐振器约需 15 kg，同时也分析了吨级棒状谐振器。谐振器将在毫开尔文温度下冷却到运动基态。当天体物理引力波经过时，量子化相互作用可能驱动单声子跃迁，其吸收能量为 $E = \hbar\nu$ 。持续的量子态监测将分辨这些跃迁，并把它们与 LIGO 对同一事件的观测关联起来：这就是引力一声子光电效应。

● 理论方案：尚无探测 目前什么也没有探测到。论文确立的是理论可行性论证，而不是实验结果。尚无设备同时具备所需的谐振器质量、品质因数、毫开尔文温度与无损单声子读出能力。即使观察到离散吸收，解释上仍有一项限定条件：量子化吸收体可以从相干经典波中一份一份地接收能量，因此，量子化能量传递并不自动等同于证明引力场本身已经量子化。这个方案在概念上引人注目，但离实现还很遥远。

第七部分同行评议还不够的时候

Aziz-Howl 之争，以及它带来的启示

这套装置就是拟议的量子引力见证实验：仅通过引力使两个质量体纠缠，再根据局域经典信道不能产生纠缠，推断引力必定是量子的。

Aziz 与 Howl 经同行评议的 *Nature* 论文 (646: 813–817, 2025 年 10 月 22 日) 认为，在量子场论中，经典引力可以传递量子信息并产生纠缠。如果结论成立，这项见证实验便无法再区分经典引力与量子引力。

技术回应迅速出现。Marletto、Oppenheim、Vedral 与 Wilson 认为，该模型不会产生声称的纠缠，任何残余效应也将由量子化物质介导。Diósi 的回应题为 *No, classical gravity does not entangle quantized matter fields*；Di Biagio 则为一种可能成立的路径辩护。Gundhi 等人在 2026 年 4 月指出，被舍弃的跃迁振幅造成了表观效应；将其补回后，初始的直积态仍会保持。Xue 等人也发布了预印本回应。这里引用的反驳仍然都是预印本，这场争论仍在持续且存在分歧，不能靠数论文篇数来裁定。

前沿 B4 ● 争议仍在持续

发表只是检验的开始

教训并不是同行评议毫无用处，也不是 *Nature* 不可信。同行评议筛选的是专家判断为合格、新颖且值得审视的工作；它不是真理神谕。这里，一项严肃主张发表后，专家立即针对一个可判定计算中的具体项提出质疑。回应的速度与针对性，说明科学纠错正在进行，而不说明裁决已经出炉。

发表是一项主张生命的开始，而不是终点。应把「经同行评议」视为发令枪，而不是终点线。

最有用的状态既不是「真」，也不是「假」，而是尚无定论。

未决问题

什么能够解决这些问题

- 经典引力会产生纠缠吗？争论围绕计算中的具体项。经同行评议的综合分析、趋于一致的计算，或对被舍弃振幅达成共识，都可能解决问题。
- HCI 时钟能否突破 10^{-18} ？成功将提供一种对 alpha 敏感得多的仪器；无法消除的运动系统效应则可能让整个研究计划停留在演示阶段。
- 独立电子泵支路能否在 10^{-8} 量级闭合量子计量三角形？如果独立检验后仍然失败，将有力表明某种复现方式并不完整；只有排除系统效应后，才可能说明底层物理并不完整。
- 钽的敏感度因子能否进一步收窄？实测的 alpha 敏感度因子 K 带有约 40% 的不确定度，而强相互作用与夸克敏感度目前用示意性基准表示；核钟界限会继续这种理论依赖。
- 反物质是否恰好以 g 坠落？方向已经知道；其当前相对不确定度与普通物质等效原理检验之间相差十四个数量级。
- 时钟网络有朝一日能探测到发生振荡的常数吗？如果在多台时钟中复现彼此匹配的 alpha 振荡，并推得一致的暗物质频率，就会推翻今天的零结果图景。目前不存在这种信号。

核心观点

精密测量已经成为前沿工具：时钟搜寻暗物质，分子测定质量比，桌面实验约束新物理，毫克级球体则逼近量子引力研究的尺度。关键能力是区分演示、推论与外推。

最佳类比

引力—声子光电效应试图从离散吸收的能量中寻找量子化，而时空分离的暗物质搜寻则把 2,220 km 光学腔链路变成探测器的一部分，并把 GPS 时钟作为第二组数据。前者是尚未建成的理论方案，后者是已经确立的零结果方法。

仍在争论

Aziz 与 Howl 关于经典引力能够产生纠缠的主张经过同行评议，却遭到多篇技术预印本反驳，争论仍在继续。发表平台与评议状态标示的是审视所处的阶段，而不是最终答案。

信息（把纠缠视为信道）· 计算（电子泵计数电流，量子计量三角形检验自然的算术）· 能量（作为量子的引力子，以及作为真空探针的 eEDM）· 涌现（可运输石墨烯标准中的拓扑保护）。回扣：第 2 日的可证伪性与同行纠错，第 6 日的严密测量乘上宽松系数，第 12 日的计量溯源网络扁平化，以及第 43 日作为潜在见证的纠缠。

返回主线 · 第 14 日

综合：如何阅读前沿

第 13 日现在有三层内容：已经稳定的 SI 与零结果、从早期标准继承而来的化石数字，以及尚属暂定的研究前沿。作为校准练习，请从本附录中选出三项主张，估计每项到 2035 年仍会被接受的概率。这个练习会迫使你在同一项判断中同时权衡演示、外推与证据状态。

资料来源与延伸阅读

1. Aziz, J. & Howl, R. (2025). 「Classical theories of gravity produce entanglement.」 *Nature* **646**: 813–817. 发表于 2025 年 10 月 22 日；doi:10.1038/s41586-025-09595-7。状态：争议仍在持续。预印本回应包括 Marletto、Oppenheim、Vedral 与 Wilson 的「Classical gravity cannot mediate entanglement」(arXiv:2511.07348)；Diósi 的「No, classical gravity does not entangle quantized matter fields」(arXiv:2511.00852)；Di Biagio 的「The simple reason why classical gravity can entangle」(arXiv:2511.02683)；Xue 等 (arXiv:2604.16276)；以及 Gundhi 等的「Can classical theories of gravity produce entanglement?」(arXiv:2604.19696)。Diósi、Di Biagio 与 Marletto 等人在 2025 年 11 月提交回应；Xue 等人于 2026 年 4 月跟进。这些回应都是预印本，本身不能终结争论。
2. King, S. A., Spieß, L. J., Micke, P., Wilzewski, A., Leopold, T., Benkler, E., Lange, R., Huntemann, N., Surzhykov, A., Yerokhin, V. A. et al. (2022). 「An optical atomic clock based on a highly charged ion.」 *Nature* **611**: 43–47. 2022 年 11 月 2 日；doi:10.1038/s41586-022-05245-4—— Ar^{13+} 的系统不确定度为 2.2×10^{-17} ，并首次分辨多电子体系中的 QED 核反冲。比较对象是 Brewer 等人的「 $^{27}\text{Al}^+$ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10^{-18} 」, *Physical Review Letters* **123**: 033201 (2019)，doi:10.1103/PhysRevLett.123.033201；该文报告 9.4×10^{-19} 的系统不确定度。另见 Kozlov 等人的「Highly charged ions: optical clocks and applications in fundamental physics」, *Reviews of Modern Physics* **90**: 045005 (2018)。
3. Alighanbari, S., Giri, G. S., Constantin, F. L., Korobov, V. I. & Schiller, S. (2020). 「Precise test of quantum electrodynamics and determination of fundamental constants with HD^+ ions.」 *Nature* **581**: 152–158. 参见 Patra 等人的「Proton-electron mass ratio from laser spectroscopy of HD^+ at the part-per-trillion level」, *Science* **369**: 1238–1241 (2020)，以及 Kortunov 等，*Nature Physics* **17**: 569–573 (2021)。Kortunov 论文 2024 年的作者更正更新了推导出的质量比数值，但不改变论文结论： *Nature Physics* **20**: 1034；doi:10.1038/s41567-024-02557-2。
4. Roslund, J. D., Cingöz, A., Lunden, W. D., Partridge, G. B., Kowligy, A. S., Roller, F., Sheredy, D. B., Skulason, G. E., Song, J. P., Abo-Shaer, J. R. & Boyd, M. M. (2024). 「Optical clocks at sea.」 *Nature* **628**: 736–740. 2024 年 4 月 24 日；doi:10.1038/s41586-024-07225-2——三台 35 升碘钟在太平洋海军舰艇上运行 20 天，计时误差低于 300 ps/天。论文另指出，实验室光学钟的相对不准确度低于 10^{-18} ；这个准确度数据与海上时钟的计时误差或不稳定度数据，不能支持口径一致的倍数比较。另见 Hilton 等人的「Demonstration of a mobile optical clock ensemble at sea」, *Nature Communications* **16**: 6063 (2025)。
5. Toscani De Col, L. et al. (2026). 「A thorium-229 optical nuclear clock with feedback loop.」 arXiv:2606.04997，提交于 2026 年 6 月 3 日；预印本，在本文所述时间点未经同行评议。报告称，在室温 CaF_2 晶体中的 148 nm 跃迁上闭合反馈回路，并给出 20 s 至一天时间尺度上的暗物质约束。推得的约束范围依赖 Beeks 等，*Nature Communications* **16**: 9147 (2025)， $K = 5900(2300)$ 。预印本指出，目前无法计算精确的核敏感因子，并以 10^4 和 10^5 作为示意性基准带，而非量化的不确定度分布。参见 Higgins 等，*Physical Review Letters* **134**: 113801

- (2025); Caputo 等, *Physical Review C* **112**: L031302 (2025); 以及 Fuchs 等, *Physical Review X* **15**: 021055 (2025)。
6. Filzinger, M., Caddell, A. R., Jani, D., Steinel, M., Giani, L., Huntemann, N. & Roberts, B. M. (2025). 「Ultralight Dark Matter Search with Space-Time Separated Atomic Clocks and Cavities.」 *Physical Review Letters* **134**: 031001. 2025 年 1 月 23 日——使用 2,220 km 光纤连接的光学腔比较与 GPS 卫星时钟, 针对质量 10^{-19} 至 2×10^{-15} eV/c² 的范围, 首次约束仅与电子耦合的标量暗物质。参见 Schioppo 等, *Nature Communications* **13**: 212 (2022), 以及 Kennedy 等, *Physical Review Letters* **125**: 201302 (2020)。
 7. Westphal, T., Hepach, H., Pfaff, J. & Aspelmeyer, M. (2021). 「Measurement of gravitational coupling between millimetre-sized masses.」 *Nature* **591**: 225–228. 2021 年 3 月 11 日; doi:10.1038/s41586-021-03250-7——两个约 90 mg 的金球, 源以 12.7 mHz 调制, 积分 350 h, 系统准确度为 4×10^{-11} m/s², 统计精密密度为 4×10^{-12} m/s²。
 8. Panda, C. D., Tao, M. J., Ceja, M., Khoury, J., Tino, G. M. & Müller, H. (2024). 「Measuring gravitational attraction with a lattice atom interferometer.」 *Nature* **631**: 515–520. 2024 年 7 月 18 日; doi:10.1038/s41586-024-07561-3—— $33.3 \pm 5.6(\text{stat}) \pm 2.7(\text{syst}) \text{ nm s}^{-2}$, 总体准确度 6.2 nm s^{-2} ; 对具有屏蔽机制的第五力变色龙模型与对称子模型给出约束。参见 Panda 等人的「Coherence limits in lattice atom interferometry at the one-minute scale」, *Nature Physics* **20**: 1234 (2024)。
 9. ALPHA Collaboration (Anderson, E. K. et al.) (2023). 「Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter.」 *Nature* **621**: 716–722. 2023 年 9 月 28 日——约 2,000 个 ALPHA-g 事件; 以 g 为单位, 最佳拟合为 $g\hbar = 0.75 \pm 0.13(\text{stat+sys}) \pm 0.16(\text{sim})$ 。吸引力方向已经确立; 加速度是否与普通物质相等则尚未确立。
 10. Touboul, P., Métris, G., Rodrigues, M., Bergé, J., Robert, A. et al. (MICROSCOPE Collaboration) (2022). 「MICROSCOPE Mission: Final Results of the Test of the Equivalence Principle.」 *Physical Review Letters* **129**: 121102. 2022 年 9 月 14 日——使用铯与铂测试质量体以及一对同成分对照质量体, 发现 Eötvös 比在 10^{-15} 量级上与零相容。参见 *Classical and Quantum Gravity* **39**: 204009 (2022)。
 11. Roussy, T. S., Caldwell, L., Wright, T., Cairncross, W. B., Shagam, Y., Ng, K. B., Schlossberger, N., Park, S. Y., Wang, A., Ye, J. & Cornell, E. A. (2023). 「An improved bound on the electron's electric dipole moment.」 *Science* **381**: 46–50. 2023 年 7 月——囚禁 $^{180}\text{Hf}^{19}\text{F}^+$, 取得约三秒的相干时间, 并在 90% 置信水平下得到 $|\text{de}| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e} \cdot \text{cm}$ 。「above 10 TeV」的解释依赖模型。参见 Caldwell 等, *Physical Review A* **108**: 012804 (2023)。
 12. Tobar, G., Manikandan, S. K., Beitel, T. & Pikovski, I. (2024). 「Detecting single gravitons with quantum sensing.」 *Nature Communications* **15**: 7229. doi:10.1038/s41467-024-51420-8——理论方案, 不是探测结果。论文考虑随目标源而变的声学谐振器设计, 包括一个针对 GW170817、质量约 15 kg 的钹谐振器, 以及示意性的吨级棒状谐振器: 设备需冷却到量子基态, 并把受激吸收分辨为量子跃迁。关于场量子化的限定条件, 参见 Manikandan 与 Wilczek, *Physical Review A* **112**: 043716 (2025)。
 13. Djordjevic, S., Behr, R. & Poirier, W. (2025). 「A primary quantum current standard based on the Josephson and the quantum Hall effects.」 *Nature Communications* **16**: 1447. 2025 年 2 月 10 日; doi:10.1038/s41467-025-56413-9——结合约瑟夫森效应与量子霍尔效应, 在微安范围内产生可编程电流, 相对不确定度低于 10^{-8} ; 这是一种安培复现, 而不是独立的三支路三角形闭合。关于直接电子计数, 参见 Yamahata, G., Giblin, S. P., Kataoka, M., Karasawa, T. & Fujiwara, A., 「High-accuracy current generation in the nanoampere regime from a silicon single-trap electron pump」, *Scientific Reports* **7**: 45137 (2017), doi:10.1038/srep45137——在 7.4 GHz 下超过 1 nA, 偏差约 20 ppm, 测量不确定度约 1 ppm。关于并联扩展, 参见 Yamahata, G., Shimizu, T., Nishiguchi, K. & Fujiwara, A., 「Scalable Parallel Single-Electron Pumps in Silicon with Split-Source Control in the Nanoampere Regime」, *Nano Letters* **25**: 10202–10208 (2025), doi:10.1021/acs.nanolett.5c02327——四台泵并联, 平台超过 2 nA, 但并未达到 10^{-8} 的相对不确定度目标。另见 Scherer 与 Camarota 的「Quantum metrology triangle experiments: a status review」, *Measurement Science and Technology* **23**: 124010 (2012)。

14. 「Graphene quantum Hall resistance standard for realizing the unit of electrical resistance under relaxed experimental conditions.」 *Physical Review Applied* **23**: 014025 (2025). 在 $B = 4.5 \text{ T}$ 、 $I = 232.5 \text{ } \mu\text{A}$ 、 $T = 4.2 \text{ K}$ 条件下，测量结果与理想值的一致程度优于 $2 \text{ n}\Omega/\Omega$ ；历时 2.5 年以及经过 800 km 公路运输后，稳定性均得以保持。运输检验已经确立；更广泛的工业部署尚属预测。
15. 长基线原子干涉测量：**MAGIS-100** (Abe 等, *Quantum Science and Technology* **6**: 044003, 2021) 与 **AION** (Badurina 等, *JCAP* **05**: 011, 2020)。两个设施都以超轻暗物质和约 $0.1\text{--}10 \text{ Hz}$ 的中频段引力波为目标。一篇 AION 原型论文, *Nature* **654**: 622–628 (2026 年 6 月 17 日), doi:10.1038/s41586-026-10617-1, 通过实验验证了两个长基线干涉仪之间的共模噪声抑制。这是一项使后续研究成为可能的演示，不是暗物质或引力波探测。
16. Schulte, M., Lisdat, C., Schmidt, P. O., Sterr, U. & Hammerer, K. (2020). 「Prospects and challenges for squeezing-enhanced optical atomic clocks.」 *Nature Communications* **11**: 5955. 关于纠缠增强计量学究竟何时能改善真实时钟，这篇论文提供了始终需要记住的限定条件。

钿反馈回路结果是 2026 年 6 月的预印本，文中已明确标注。Aziz–Howl 之争中的技术回应同样是预印本；它们表明争论正在进行，而不是给出最终裁决。