

探寻引力常数之谜

葛景业 杨玲玲 黎卿[†]

(华中科技大学物理学院 基本物理量测量教育部重点实验室 武汉 430074)

2023-07-21 收到

[†] email: qingli@hust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230909

1 从牛顿到卡文迪什

引力是物理学最古老的研究对象之一。17世纪末, 牛顿在他的传世巨著《自然哲学的数学原理》中首次正式提出万有引力定律:

$$F = \frac{GMm}{r^2},$$

其中, M 和 m 为两个物体的质量, r 为它们之间的距离。作为公式的重要组成部分, 引力常数 G 也自然应运而生, G 的大小决定了引力的强弱。也许是因为引力作用太过微弱, 又或许是那个年代的科学家只关注 G 和 M 的乘积, 而并不关注 G 本身的大小, 所以在18世纪之前 G 值的大小仍然是未解之谜。

1798年, 为了知道引力的大小, 英国科学家卡文迪什进行了巧妙的测 G 实验, 开启了“弱力测量的新时代”。如图1所示, 他将两个小金属球固定在长木棒的两端, 形状就像一只哑铃, 再用一根纤细的丝把这只“哑铃”吊起来, 这就是一个典型的扭秤。两个大铅球分别吸引小金属球, 由于引力作用, 扭秤会微微偏转。如此微小的变化如何测量呢? 一束细光束经过扭秤反射, 反射点的位置会发生较大移动, 这样原本微弱的偏转便被放大了。

卡文迪什最终测量出地球的密度是水密度的5.48倍, 并计算出地球的质量为60万亿亿吨^[1], 这与当代科学家计算出的地球质量基本相同。后人由此给出历史上第一个 G 值为 $6.67(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, 卡文迪

什也因此成为了历史上第一个测得引力常数 G 的科学家。后人测 G 实验中的绝大部分实验模型都离不开扭秤, 可谓是影响深远。

2 最难测的物理学基本常数

在现代科学体系中, G 是一个与理论物理、天体物理和地球物理等密切相关的物理学基本常数。在国际科技数据委员会CODATA推荐的基本物理学常数中^[2], 像光速 c 、普朗克常数 h 等都定义为一个精确值, 而引力常数 G 推荐值的相对精度只有 10^{-5} 量级, 是所有物理学常数中最差的。 G 的精确值究竟是多少? 为什么 G 的测量精度如此之差? G 随时间和空间是否可能发生变化? 诸如此类的问题都期盼着 G 值测量能达到一个更高精度的水平。

自从卡文迪什首次揭开了 G 的神秘面纱, 两个多世纪以来, 各国科学家为探索更高精度的 G 值前仆后继, 但 G 值之谜仍未完全解开。尽管世界风云变幻, 技术不断革新, 自电力时代进入了信息时代, 用于测 G 的设备也是不断进化, 比如在传统机械装置的基础上引入计算机自动控制减小误差、引入高真空环境降低空气噪声等, 但无可奈何, G 值测量这块“难啃的骨头”让科学家往往只能望洋兴叹。

究其原因, 有人可能会说是科学家的“无

能”, 也有人会说是实验设备的陈旧或理论的匮乏, 但笔者认为更大一部分原因来自 G 值本身。其一, 引力是四大作用力中最微弱的, 对于环境的噪声要求极其严苛; 其二, G 值测量是一个典型的绝对测量, 实验中任何一个偏差都会使测量结果不可靠; 其三, 引力作用范围趋于无穷, 地球作为一个强大引力源, 对实验的引力影响无法屏蔽; 其四, 测 G 只能依赖万有引力定律, 缺乏额外的方法进行相互验证。如此, 相信读者也能理解前人面对 G 值精密测量时的无奈了吧。

3 与引力结下不解之缘

这是一个持续三十多年的漫长故事, 在罗俊老师的带领下, 一批学者踏上了追寻引力常数之谜的漫漫长路。

华中科技大学坐落于武汉市海拔最高的喻家山, 是一所名副其实的森林式大学。在喻家山脚下, 有一个山洞实验室, 该实验室恒温隔振、能够屏蔽宇宙电磁辐射, 是进

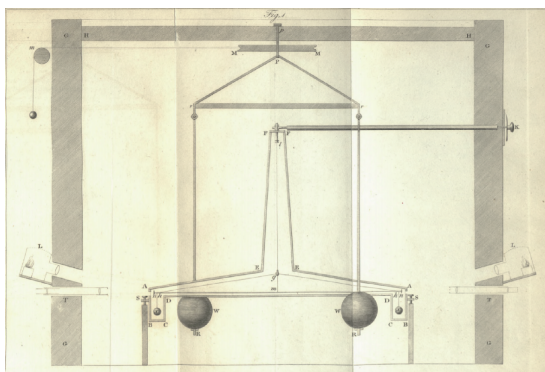


图1 卡文迪什扭秤实验原理图^[1]

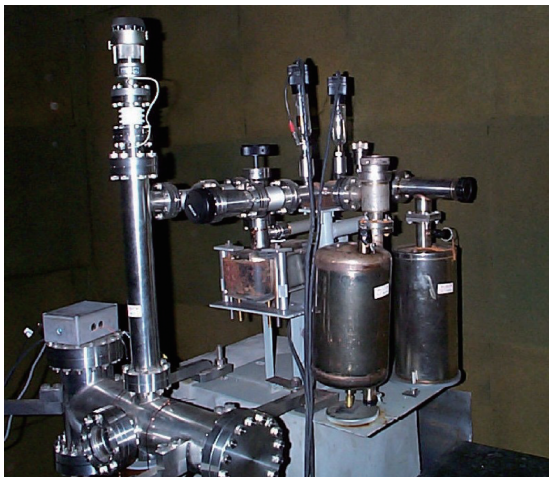


图2 HUST-99 扭秤装置图

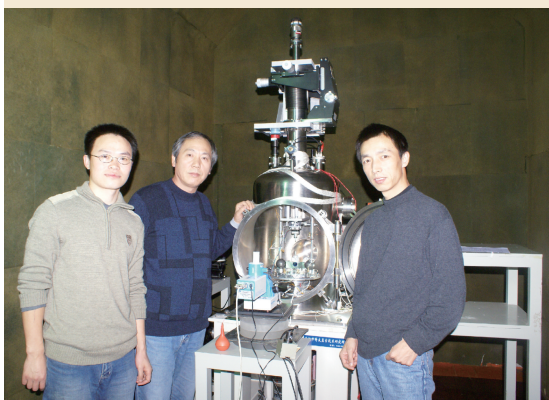


图3 HUST-09 扭秤装置图

行引力测量的绝佳场所。机缘巧合之下，罗俊老师自1980年代开始进入山洞实验室进行引力实验，从此与引力结下了不解之缘。

山洞里常年不见太阳，阴暗潮湿。除去吃饭和睡觉，罗俊老师几乎都在山洞中度过，这样的日子是枯燥而漫长的。艰苦的条件让身边的同事相继离开实验室，罗俊老师也不知道自己还能坚持多久，但对引力的痴迷一直勉励着他，使他纵使暂时看不到希望的曙光也坚持了下去。“一分耕耘，一份收获”，罗俊老师的坚持最终得到了回报，随之而来的一个个成果，比如日食对地球元素谱线波长的影响，探测中程力的新方法和月食期间扭摆运动的观测等，让罗俊老师在引力领域

初露锋芒。

之后一大批优秀的青年人陆续加入引力团队，跟随罗俊老师探索引力的奥秘。基于不对称哑铃型扭秤和圆柱体钨棒的测 G 装置(图2)，在罗俊老师和学生胡忠坤等人的努力下，从初具雏形到功能逐渐完善。实验在日复一日、年复一年地进行着，随着两个不同配置下扭秤周期数据的累积， G 值的大小也终于浮出水面。该方法称为扭秤周期法，它能将对力的测量转化为对时间的测量。最终，在1999年取得了第一个很不错的结果^[3]，被后来历届国际基本常数委员会CODATA收录，

称为HUST-99。这项成果的取得使罗俊老师团队这十余年的付出终于守得云开见月明。

4 穷千里目，上更高楼

进行 G 值的精密测量研究，原理一般简洁易懂，既用不到量子力学也沾不到相对论的边，但难就难在对误差的认识和分析。在一种测量方法中，往往包含近百项的误差需要评估，而且部分误差的评估没有现成仪器和方法可以使用，所以罗俊老师需自己研究评估误差的方法。许多测量装置从设计开始的诸多细节都需要反复测试，从而保证实验结果的可靠。

认识误差的过程困难重重，有时候距离真相的一小步往往使不少

科学家尽折腰。在2005年，由于认知水平的提高，HUST-99中隐藏的两项误差被发现，这时距离结果公布已过去了6年。考虑到这两处误差的修正，HUST-99的相对不确定度从105 ppm放大到130 ppm(ppm为百万分之一)，修正后的结果被称为HUST-05^[4]。与国际先进水平的差距激励着罗俊老师团队，一项新的实验在默默展开，更高精度的测 G 结果呼之欲出。

一些行之有效的创新举措在新实验中被采用。不对称哑铃型扭秤被矩形扭秤代替，它的运动模式变得简单，周期的精度提高了，这深刻地诠释了物理学中“简单美”的意义。圆柱体钨棒被不锈钢球代替，密度更加均匀。空气浮力的影响也被减小，因为整个实验均在真空容器中进行(图3)。实验通过远程控制，减小了人员走路带来的振动、自身产生的引力和发热等干扰。

这些创新举措最终帮助团队实现了 G 值的新突破。2009年，团队公布了采用改进的实验装置得到的最新 G 值，相对不确定度为26 ppm^[5]。该结果被称为HUST-09，是当时国际上采用扭秤周期法测得精度最高的结果，同时它也跨越了50 ppm这个里程碑，是当时国际上仅有的6个小于50 ppm的结果之一。

也许在一般人看来，从HUST-05的130 ppm到HUST-09的26 ppm，只提高了那么一点，但这一点却是精密测量前进的一大步。在这期间，团队攻坚克难，齐心协力，解决了一系列拦路虎。如实验中滞弹性这个“老大难”问题^[6]，由于技术手段的限制，一直悬而未决。最开始采用光压驱动调制扭秤频率来研究滞弹性效应，但经过分析发现这种方法存在理论上的缺陷。之

后，团队群策群力，提出了双丝双摆法。2008年冬天，凛冽的寒风让团队成员相继感冒，但科研的热情支撑着大家坚持实验。待到春暖花开，扭丝滞弹性效应在实验上得到了首次验证，支撑了测 G 结果的发表。实验中像这样的例子数不胜数，而团队成员们乐在其中，每一次战胜困难都是大家开心的源泉。

5 梅花香自苦寒来

事物总是在矛盾的对立统一中螺旋上升。关于误差的认识在不断深入，其演化的过程与“矛盾论”不谋而合。在HUST-05实验中，扭秤周期的稳定性是主要矛盾，而到了HUST-09实验，主要矛盾演化为球心间距的测量。之后，一个新的问题又产生了，那就是测 G 实验怎么进一步开展呢？纵观全球，有很多小组也给出了高精度的 G 值，但数值之间相差甚远。不同小组 G 值的差异便成为了目前的主要矛盾。

举个简单的例子，假如有一块玻璃，A用一种方法测得玻璃厚度为5.0000(2) cm，B用另一种方法测量，精度更高，结果显示为5.1000(1) cm。不知道大家有没有发现其中的“诡异”之处，那就是两者各自精度很高，均达到万分之一，但两者的中心值却差了十分之一。在精密测量实验中，这种“诡异”无处不在，时常困扰着科学家们。在当时， G 值测量所面临的的就是这种困境。

在不同时间、不同地点，采用不同方法测量的 G 值是否一样呢？为了寻求这个答案，一段新的测 G 之旅就此展开。扭秤周期法和角加速度法(图4)两种不同方法被采用，两组不同的人员在同一个实验室同时开展测 G 实验。两组人员分别操

作两个测 G 实验，“双盲法则”被利用，以此减少人为因素的影响。有别于扭秤周期法，角加速度法利用两个转台分别操控扭秤和吸引质量球，这使得测量效率大大提高。

在扭秤周期法测 G 实验中，为了进一步减小滞弹性效应，我们计划采用高纯度的石英丝进行测 G 实验。但一个问题摆在我们面前：国内没有现成的石英丝可以用。怎么办？我们自己拉制。于是，我们购买了石英棒，使用火焰融化石英棒手工拉丝。由于实验对丝的直径、长度有严格要求，且石英丝不能有缺陷，这导致成品率极低，极大地挑战着人们的耐心。但总而言之，通过不断的摸索和技巧的积累，我们终于研制了品质因数达到20万以上的石英丝。但至此，问题并没有完全解决，石英丝的不导电会让扭秤引入静电干扰……

就这样，随着一个个问题被成功解决，弹指间又是一个十年。2018年团队公布了两种方法的测量结果，分别为 $6.674184(78) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 和 $6.674484(78) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ，相对不确定度均为11.6 ppm^[7]，被称为HUST-18。两种不同方法测量的 G 值在两倍标准差范围内吻合，它们均是目前国际上精度最高的测 G 结果(图5)^[2]，同时入选了人教版高中物理教材，亦被国际同行评价为“精准测量领域卓越工艺的典范”。十年光阴，匆匆而逝，但能得此佳绩，

我们甚感欣慰。

6 路漫漫其修远兮

被称为“引力人”的喻家山人防山洞实验室的一代代坚守者，经过三十余年的努力，使得测 G 精度不断提高(表1)，为测 G 事业做了一点小贡献。从最开始的懵懂无知，心怀着对引力的向往，到一步一个脚印，逐渐揭开引力谜团的神秘面纱。但截至目前，关于引力的认识仍然只是冰山一角，眼前还有

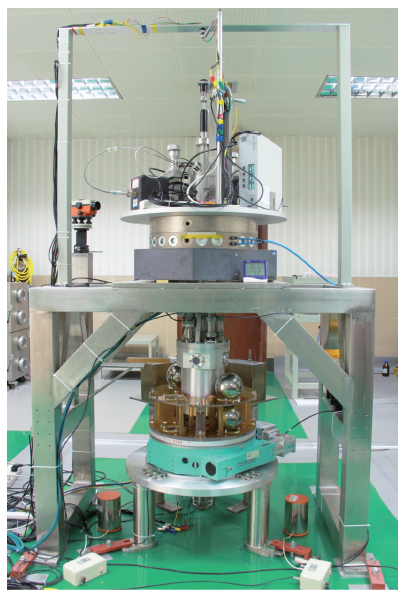


图4 HUST-18角加速度法测 G 装置图

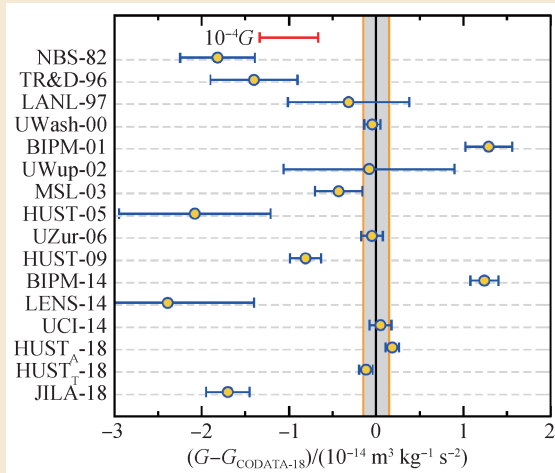


图5 HUST-18同其他小组的 G 值对比图。其中HUST_A-18是角加速度法、HUST_T-18是扭秤周期法的数值

表1 华中科技大学团队30年以来各项实验所测得的 G 值

	G 值/ $10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	相对不确定度/ppm
HUST-99	6.6699(7)	105
HUST-05	6.6723(9)	130
HUST-09	6.67349(18)	26
HUST-18周期法	6.674184(78)	11.6
HUST-18角加速度法	6.674484(78)	11.6

一片广阔的天地等待我们去探索。

华中科技大学团队从80年代正式开启引力实验研究，至今已超过了三个十年。人生短短几十载，但初探某一研究领域往往需要数十年。在罗俊老师的引领下，每一代“引力人”有他们要做的事，同时“引力人”也会进入到不同的研究领域发光发热。如胡忠坤研制了冷原子干涉重力仪，周泽兵发展了空间惯性传感器技术，涂良成在微机电系统(MEMS)领域成绩斐然。尽管他们的研究领域有所不同，但都聚焦于引力研究，正在开展的空间引力波探测“天琴计划”亦是地面引力实验向太空的拓展。

目前国际上测 G 不吻合这一难题仍未解决，使得我们不禁自问： G 值的测量该何去何从？作为一个物理学基本常数， G 有它重要的科学使命，但糟糕的精度使它陷入

了困境。是继续改进目前已有的测量方法，还是另辟蹊径寻找一条新的解决之道，有待于后来人的智慧。

也许，在未来的某一天，一种新的思想横空出世，它使 G 的测量精度达到了百亿分之一量级或者更高。这种思想另辟蹊径，它采用了极为巧妙的方法或者是运用了极为先进的技术，突破传统，大胆革新。谁能成为这种所谓的天才呢，我们拭目以待。说到这儿值得一提的是，CODATA-2018^[2]收录的LENS-14^[8]，其 G 值为 $6.67191(99) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ，相对不确定度是148 ppm，这项测 G 实验的方法与以往不同，采用的是冷原子干涉法，令人眼前一新。虽然其结果暂时差强人意，但还有进步的空间，比如太空的微重力环境能有效地提高其灵敏度。我们期待着天才的出现，在此之前，我们这些“庸人”还是踏踏实实地做好自己的“平凡”研究吧。因为我们也相信，天才的出

现并非偶然，他正是源于我们这些绝大部分“庸人”的积累和铺垫。从历史唯物主义的角度来说，那就是“人民大众是历史的推动者”，所以期待天才的同时我们也要做好自己。

在此，借用李白的一句诗与大家共勉：

行路难，行路难，
多歧路，今安在？
乘风破浪会有时，
直挂云帆济沧海。

参考文献

- [1] Cavendish H. *Philos. Trans. Roy. Soc. Lon.*, 1798, 88:469
- [2] Mohr P J, Newell D B, Taylor B N. *Rev. Mod. Phys.*, 2021, 93:025010
- [3] Luo J, Hu Z K, Fu X H *et al.* *Phys. Rev. D*, 1998, 59:42001
- [4] Hu Z K, Guo J Q. *Phys. Rev. D*, 2005, 71:578
- [5] Luo J, Liu Q, Tu L C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:240801
- [6] Yang S Q, Tu L C, Shao C G *et al.* *Phys. Rev. D*, 2009, 80:122005
- [7] Li Q, Xue C, Liu J P *et al.* *Nature*, 2018, 560:582
- [8] Rosi G, Sorrentino F, Cacciapuoti L *et al.* *Nature*, 2014, 510:518

读者和编者

新书推荐

凝聚态物理学是一门内容丰富多样、层次交错复杂的基础学科，在当前理工科人才培养中扮演极为独特的角色。在诸多凝聚态物理导论类的文献中，如何选题、如何安排难易程度都是不易权衡的难题。惟其如此，对于欲构建个人凝聚态物理学基础的读者来说，多参考几本专著从而从多个不同的角度入手便显得有必要了。

高等教育出版社2022年出版的《凝聚态物理学导论》一书，由南京

大学全国钧教授撰写。全国钧教授是物理教育名家，长期奋战在物理学研究与教学第一线，特别是对凝聚态物理的教学有丰富的实践经验和独到心得。《凝聚态物理学导论》全书分为九章，对无序系统、关联电子态、非常规相变、拓扑量子态等一般教科书较少关注的艰深主题给予了充分的讨论。特别地，本书充分利用最新的研究成果辅助对前沿问题的阐述，有利于相关专业的研究生快速进入相关专业的研究领域。

