

## 探求牛顿引力常数的精确值

(北京大学 朱星 编译自 Clive Speake, Terry Quinn. *Physics Today*, 2014, (7): 27)

引力在物理学中具有举足轻重的位置。对于初学者，这仅仅是一种不能用量子理论描述的基本相互作用。然而，引力的普遍理论——牛顿定律和爱因斯坦广义相对论——将空间与时间视为连续的经典物理量，这些理论在守恒量子基础上描述电磁力与核力。

另外，与其他基本作用力相比，引力作用非常弱，仅仅当能量接近于 Planck 数量级  $1.22 \times 10^{19}$  GeV 时，引力作用才能够与其他作用相比。这一能量比目前大型强子对撞机所使用的能量大 15 个数量级。这种不匹配现象引起了人们对粒子物理标准模型的质疑。因而，应当对引力进行比其他相互作用力更加精密的测量。

牛顿定律表述为：两个质量为  $M_1$  和  $M_2$ 、相距为  $r$  的球形物体的相互吸引力  $F$  可以表达为  $F=GM_1M_2/r^2$ 。常数  $G$  为牛顿引力常数。然而，自牛顿定律提出三个多世纪以来，并未对这个常数值达成共识。国际科学技术数据委员会每四年发布基本常数的建议值。他们给出的  $G$  为：

$$G=6.67384(80) \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}.$$

2010 年发布的数值反映了过去三十年来十余种测量方式的结果(见图 1)。尽管有些测量得到的不确定度小于 50 ppm，但是总体的数值分散度却十倍于此。由此，我们得到的  $G$  值仅有三位有效数字！引力是地球上我们最熟悉的力中最有争议的， $G$  可以作为引力的度量。在太阳系中，行星运行轨道服从牛顿定律， $G$  可以用来估算太阳的质量，如果将  $G$  值增加 0.05%，会使估算的太阳质量相应减小。

我们的问题不仅在于常数  $G$  的精确值，而是证明它是一个常量。有很多理论预言在小尺度时，牛顿平方反比率不再成立，另外一些理论预言等效性原理不成立。

迄今为止，等效性原理和牛顿平方反比率经受了实验的考验。我们对测量微弱力的方法还未能充分理解，暗示这些证实平方反比率和自由落体普适性的实验方法中存在本质的缺陷。

关于基本常数的概念在牛顿时代并不存在，牛顿并没有在他的定

律中以显式定义一个常数， $G$  仅隐含在其中，数值为 1。而将这个常数定义为  $G$  是在 1890 年。

单位制将依据 7 个自然恒量的确定数值，包括光速，普朗克常数等。我们能否用  $G$  定义千克？比如“千克是一个质量单位，其值是通过确定  $G=6.67384 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$  来决定的”在理论上这是可行的，但是实际上，利用物体的万有引力对一个物体质量的任何测量的精度为万分之几，这比现代计量学所需要的低 4 个数量级，而且可以根据普朗克常数的定义导出。对于一般实验室测试，引力实在是太弱了：一对质量为 1 kg 铜球之间的引力约为  $10^{-8}$  N，约为每个铜球重量的  $10^9$  分之一。

1798 年卡文迪许发明的扭摆天平是物理仪器史上最著名之一。在公开发表的  $G$  测量值中，几乎所有的都是用扭摆天平所测得。

国际计量局、华中科技大学、美国 JILA、苏黎世等课题组使用不同技术，探索提高不确定度的方式。最终的不确定度会小于 20 ppm。

对  $G$  的精密测量取决于精确测定质量、密度、长度、时间、电流、电压、电容以及角度。所有这些测量都必须溯源到不同的国家或者国际标准，如千克、米和秒。此外，未来的实验必须在拥有最高质量的温度和环境控制中进行。另外，国际合作必不可少。

然而，以上的进展都没有回答 CODATA Task Group 在“2014 基本物理常数推荐值”中所提出的棘手的问题：什么是  $G$  不确定度的最佳值？

有关基本常数的概念是随着物理单位制的建立而发展的。自 2018 年起，新 SI

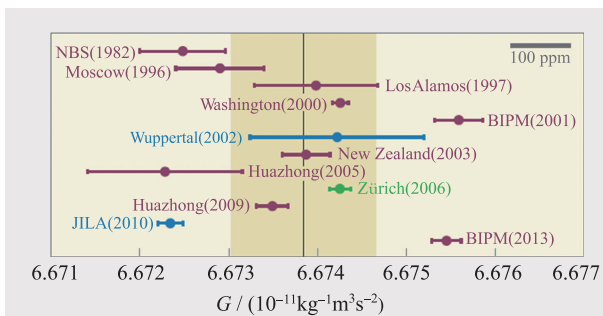


图 1 对于  $G$  的测量结果存在很大差异。图中标注出了利用扭摆天平法(褐红色)、钟摆法(蓝色)、杆-天平法(绿色)进行测试的单位和年度，误差条表示不确定度