

测量作用于粒子物质波的潮汐力

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Matt Jaffe, Holger Müller. *Physics*, May 1, 2017)

原子干涉仪已被用于对各种物理量进行高精度测量。它们与光干涉仪类似，后者的基本组成包括：用于操纵光波的面镜、分束器等。在原子干涉仪中，上述附件的功能代之由激光脉冲完成，即用脉冲激光操控原子的物质波。激光脉冲将物质波一分为二，让两分支波沿不同的路径前进，而后两者重新组合，产生干涉图样。现在，来自斯坦福大学的 Mark Kasevich 和他的同事，利用原子干涉仪测量了潮汐力对单个粒子物质波的影响。潮汐力与时空曲率密切相关，或者说与广义相对论中对引力的基本描述密切相关。

在过去的 20 年里，原子干涉仪的应用取得了惊人的进步。这些进步很大程度是基于超冷原子源，它能够在较长的时间周期，保持样品原子处于被激光脉冲照射的范围内。另外，进步也依赖于新激光器

的强大功能，它可以快速连续地追踪多组原子。有了这样的冷原子源和先进激光，加上深入理解多光子与原子的相互作用，研究者得以使用几十或者上百个光子的动量，实现物质波两分波不同路径之间的米级分裂，使原子干涉仪的灵敏度增加了数百甚至数千倍。上述进展使众多的高精度测量成为可能，例如，重力加速度测量灵敏度可达数十 $(\text{nm/s}^2)/\text{Hz}^{1/2}$ ，牛顿的引力常数测量精度可达 150×10^{-6} ，精细结构常数测量精度可达 0.7×10^{-9} ；还能严格限制驱动宇宙加速膨胀的暗能量之候选体。

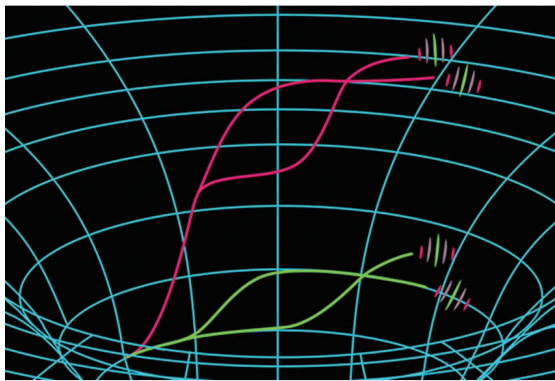
Kasevich 等研究的引力潮汐力，是引力势的二阶空间导数。它与广义相对论中描述引力场的时空曲率紧密相关。引力势本身是不可测量的，而其一阶空间导数，即自由落体的加速度，也是观察者加速状态的函数，事实上是一个引力场

的函数。举例说，假如我们在一个加速参考系中操控一台原子干涉仪，那么与在引力场中操控它是一样的。然而，曲率仅仅是一个引力场的函数，并且不能通过进入一个不同的参考系予以消除。因此说，曲率描述的是引力场本身。不像源于局地加速之粒子波函数的位相漂移，曲率引起的相移可以被描述为纯粹来自引力对一个量子系统

施加的影响。

在他们的研究中，Kasevich 及其同事测量了一台原子干涉仪内，潮汐力对单个粒子的波函数的影响，因而测量了时空曲率。测量成为可能，多亏了干涉仪两臂间大的分离(约 10 cm)，这增强了曲率的影响。先前的研究已经测量了曲率对两台分开的原子干涉仪的不同影响。Kasevich 和他的同事利用可移动的外部源质量，产生潮汐力；外部源质量允许他们辨认出常量作用。具体地说，他们通过将主干涉仪的干涉花样与另一台“参考”干涉仪的干涉花样相比较，消去了地球重力的信号，消去了设备振动的信号。“参考”干涉仪距源质量足够远(约 30 cm)，以至于对源质量产生的曲率不敏感。为了证明他们确实测量到了曲率对“传感器”干涉仪的影响，作者改变干涉仪两臂之间分开的程度，发现曲率信号对分离程度呈二次方特征依赖关系。

Kasevich 及其同事准备了约 100 万个铷原子样品，温度约 50 nK。然后他们将原子向上推送到 10 m 高的位置，形成喷泉配置。原子上下一个来回总耗时 2.8 s，在此期间他们可以进行干涉。采用来自数十个激光脉冲的大约 100 个光子，他们将每个原子波函数的空间分量分开约 30 cm。其中一对波函数分波形成“传感器”干涉，可测量曲率的影响；而另一对波函数分波形成“参考”干涉，被用来消去地球重力和设备振动的背景信号。



Kasevich 和他的同事们测量了潮汐力的作用，因而测量了时空曲率(见蓝色线网)对单个粒子波函数的影响(见绿色曲线对)，该曲线对是使用“传感器”原子干涉仪测量完成的。图中另一对红色曲线是使用被称为“参考”的原子干涉仪测量完成的，它起测量参考系的作用