

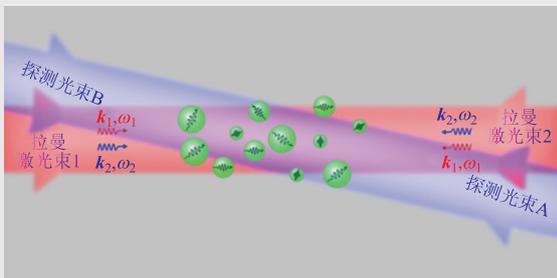
原子干涉仪热起来

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Carlos L. Garrido Alzar. *Physics*, April 17, 2017)

今天,对于高精度测量,原子干涉是最先进的技术。它的应用包括:构建绝对重力仪,研究精细结构常数的变化,测量旋转角速度,以及测试等效原理等。其敏感性源于:低温下粒子的行为可以像相干波,粒子的动量决定相干波波长。为了实现和保持干涉测量所需的相干条件,大多数的装置使用复杂的激光冷却和捕获原子方案,用以保持原子系综的温度在 μK 范围。但现在,在新墨西哥 Sandia 国家实验室,Grant Biedermann 等已经展示了一台原子干涉仪,它使用封闭于玻璃泡内的热原子气,取代传统的冷原子气。新装置消除了超高真空和激光冷却的需要,从而大大拓宽了原子干涉技术的应用范围。

原子干涉仪和光学干涉仪是基于同样的原理:物质波沿着两条不同的路径传播,之后重新结合,并可能导致相干叠加或相消。干涉产生的条纹,携带着各种效应的信息,例如重力效应,它修改描述传播原子的波函数的相位。由于干涉仪中的原子运动的速度比光速慢得多,相干原子将在更长的时间尺度上改变它们的相位。这使得原子干涉仪比光学干涉仪更灵敏。

一个领先的原子干涉测量技术是光脉冲原子干涉仪(LPAI)。LPAI 方案通常开始于原子的激光冷却(降温到百万分之一开尔文)。然后利用激光脉冲控制原子的外部自由度(位置、速度),上述过程经由原子的内部自由度(不同的磁态和超精细态)与光的耦合。这样的脉冲可以有效地做如下工作:(1)作为物质波分束器,(2)作为物质波反射镜,从而实现干涉几何。



Biedermann 等开发的热蒸气原子干涉仪方案。两束拉曼激光(波矢 k_1 和 k_2 , 频率 ω_1 和 ω_2)选择属于两个速度类的原子 ($+v_z$ 和 $-v_z$),并“踢”原子,进入相干路径……

传统的 LPAI 需要超冷原子窄的速度分布并与环境隔离。它只能通过超高真空室内采用激光冷却方案来实现。是否有可能使用热原子保持在一个简单的蒸气室中,进而实现物质波干涉?在室温下,气室的方法曾被用于原子钟和磁强计。但要将它扩展到更一般的原子干涉仪却面临两个挑战:首先是原子自旋极化损失(它源于原子-原子碰撞以及原子和容器壁的碰撞);二是原子的随机热运动。Biedermann 和同事们设计了一个巧妙的方案,解决了这两个挑战带来的问题。

为了应对原子的热扰动问题,Biedermann 等在一个宽的速度分布内,选择仅仅两类具有确定速度的原子,用以取代在传统的 LPAI 中必须要做的——制备窄速度分布的冷原子系综。冷 LPAI 与 Biedermann 等装置之间的差异,可以用光学干涉仪的类比来说明。具有相干原子物质波的冷 LPAI 干涉仪类似于具有相干光光源的光学干涉仪。而 Biedermann 等用热原子蒸气做干涉,就像用普通灯泡发出的白色非相干光来探测干涉效应。

为选择两个原子子集,研究人员使用两束对射的拉曼激光,同时激发两组原子,分别具有速度 $+v_z$ 和 $-v_z$,沿激光传播方向(见图), v_z 的大小取决于拉曼激光束的频率。经过选择,上述拉曼激光按三脉冲序列“踢”原子到两条不同的路径(在所谓的 Mach-Zehnder 干涉配置中)。

Biedermann 和同事提出的解决方案包括同时检测两组参与干涉的速度分别为 $+v_z$ 和 $-v_z$ 的原子。作者使用了两个额外的对射探测光束,测量差分信号,并从中抽取相位差。拉曼激光“询问”热原子的时长,受限于原子渡越这些光束的平均时间。由于原子的热运动速度,这套方案最大的局限性是,与冷 LPAI 相比,大大降低了相位干涉仪的灵敏度。利用 $15 \mu\text{s}$ 的最大可用询问时间,这项工作展示的加速度灵敏度是 $10^{-2} g/\sqrt{\text{Hz}}$ (其中 g 是在地球上局地的重力加速度,约 9.8 ms^{-2}),这个测量精度低于现行最优冷原子干涉仪 5 个数量级。然而,灵敏度不是唯一的性能参数。新方案与冷 LPAI 相比有两个重要的优势:首先,它可以以 10 kHz 的速率采集数据,远高于冷原子 LPAI 典型 1 Hz 的数据采集速率;第二个是可以测量更宽范围的加速度(高达 $88g$)。