德布罗意标尺 利用物质波进行精密测量

(北京大学 朱星 编译自 Markus Arndt. *Physics Today*,2014,(5):30,原文详见http://ptonline.aip.org)

1923年，德布罗意提出一个全新的概念，这个革命性的概念表达形式非常简单："可以将物质或能量的孤立部分与周期性现象相联系"。这个周期现象的德布罗意波长是$\lambda_{dB}=h/mv$。

德布罗意波向经典理论提出挑战。例如，在一个双缝中的电子衍射只可以假设为自由传播的非局域化的量子波。由于每个单一粒子可以用多个波的叠加描述，而这些波的中心是明确分离的，难于理解这个物体同时"存在"于许多不同位置。当观测大分子时，波粒两相性表现明显，可以在显微镜下观测它的粒子性，也可以在实验中观察波动形式。

薛定谔方程可以确切地描述物质的量子波的性质。然而，我们能否将这种物质的波动性质应用于方兴未艾的量子技术？近几十年来，许多人提出用原子干涉作为精密标尺，用来测量微小的场强、惯性力，以及原子的内禀性质。最近这种干涉方法已经应用于分子和超分子体系。未来还会用量子增强探测器研究大生物分子。人们期待物质波探测器的灵敏度和精确度超过常规技术。

设置一把量子标尺

在量子物理中，无质量的光子和有质量的粒子都可以用波函数描述。比如一个标量函数，$\psi=\psi_0\exp[i\phi(t)]$，$\psi_0$为振幅，$\phi(t)$为与时间相关的相位函数。波的相位是物质特性的表征，而普通的探测器仅能测量到强度$|\psi|^2$的变化。

干涉仪法提供了一个解决方案。干涉仪将两个波的相位差转换成为可以测量的值。其核心是用分束器将一束入射束分为两个以上子波，这些子波被镜面、光栅、波导，甚至由重力调控着，子波沿着不同的路径前进，然后被第二个分束器结合在一起。图1所示的Mach—Zehnder光学干涉仪，调整两条光路的程差可以测量到光波长的几分之一。

现代的物质波干涉仪探测的德布罗意波长范围从大分子的10^{-13} m到超冷原子的10^{-6} m。与光子相比，物质波的核心优点是能够与外部微扰相耦合。原子和分子具有质量，并且有丰富的内禀电磁谱。另外，分子和团簇拥有振动、旋转和构型的动力学性质。所以，物质波对于惯性力、电磁力，或者与各种粒子的碰撞力非常敏感。因此，物质波干涉仪可以成为力的转换器，并且作为标尺。

分割不可分割的物体

将原子从物理上分割只是天真的想法。将原子束分割可以理解为将单个原子的波函数进行切分。特别地，需要波前分束器和振幅分束器。

波前分束器调制与位置相关的波函数。在量子物理中，位置与动量通过傅里叶变换相关联。用一个周期为d的普通光栅对波前调制，如图2(a)所示，横向动量的相干叠加导致在光栅后面远场产生衍射峰。这些峰对应分开的子波，其具有固定的相位关系。为了使信号在干涉仪上分布间隔更宽，光栅的周期必须小。许多原子和分子干涉仪的光栅范围为100 nm<d<1 μm。

波前分束器也可以用光学光栅实现(见图2(b))。相位光栅将物质的偏振性质耦合到一个光的驻波场中。当粒子通过由光场构成的波腹时，光构

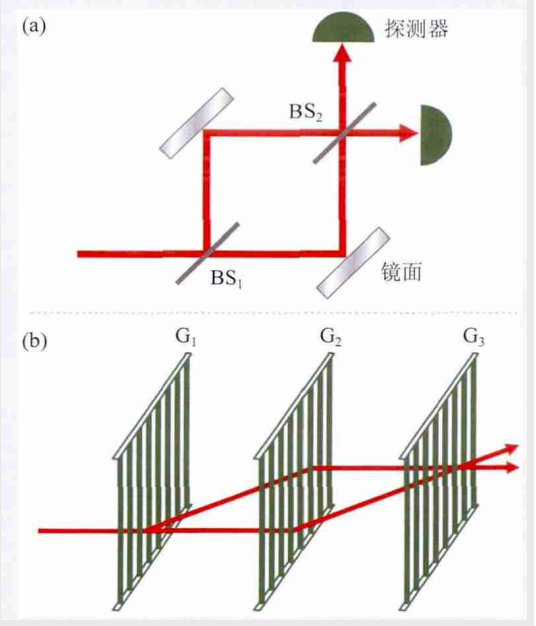


图1 干涉仪的构造 (a)在光学Mach—Zehnder干涉仪中，分束器(BS_1)将入射光束分解为相互叠加的子波；镜面将子波分配到两个不同路径后在第二个分束器合并(BS_2)，一对探测器记录叠加后的子波场；(b)在物质波干涉仪中，两个纳米尺度衍射光栅(G_1和G_3)起到分束器作用。第三个光栅(G_2)起到镜面的作用。这种三光栅配置已经成为许多原子分子干涉仪的基础

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成的掩模会使原子离子化，将分子团簇解理，或者改变粒子的内部态，以使粒子不可探测。这种效应类似于纳米光栅。如果粒子源足够小，或者距离光栅远，则可形成一个相干波场。从相邻狭缝中传出的子波将在远场的屏幕上干涉，甚至不需要附加的分束器和光束控制元件。

将三个等间距的纳米加工光栅构建成一台原子干涉仪，如图1(b)所示。第一个光栅(G_1)将波前分解为不同衍射级数的子波。第二个(G_2)和第三个(G_3)光栅可以将这些子波重新定向并组合在一起，以形成量子干涉。在G_3后面两束组合光束的强度分布与干涉仪两分支之间的相位差有关。经过准直的原子束被分裂为间距达27 μm的不同分支，这个间距足够宽，以使两个子波分别进入不同的电场或者不同气压区。这是一种最精密的测量原子基态偏振的方法，并可以进行原子—原子间散射截面的复杂分析。

非相干束的干涉

干涉仪用于对原子和分子测量时需要高通量和横向相干的束流，对许多原子可以满足这个条件，但是对分子和纳米粒子很难。原子束一般形成在温度超过1000 K时。而很多分子、原子或分子团簇，以及纳米粒子需要在低温下研究。许多技术能制备带电或者电中性的大分子或团簇束流，但是在低温条件生成高强度、定向的并且电中性的束流，同时质量均匀、低速度的方法尚待研发。

物理学家可以在非相干入射条件下产生相干光。这个从光学中得到的结果同样也可以用于物质波。如果每个狭缝足够窄，则每个入射波的动量会按照量子物理原则产生相干扩束。用三个光栅的干涉仪可以实现这个条件。

基于量子纠缠原理的分束器

振幅分束器将粒子的质心波函数分开。图2(c)中重要的部分是基于原子内部和外部态的纠缠：当共振光照射到处于二能级系统的原子时，光将基态$|g\rangle$耦合为激发态$|e\rangle$，因此导致它们之间的布居振荡。一个原子初始态被转换为$|g\rangle$和$|e\rangle$的相干叠加。同时，原子的初始动量态转换为$|p\rangle$和$|p+\hbar k\rangle$的相干叠加，k为光子的波矢。由于这两个过程有严格的相关性——原子吸收光子而受到激发，并且改变动量，因此原子最终处于一种纠缠态。

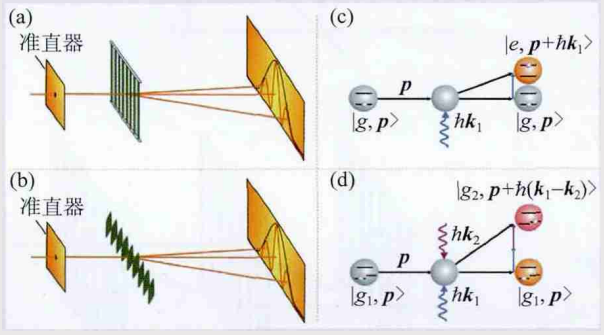


图2　分开物质波的方式　(a)一个纳米衍射掩模将原子束或分子束的物质波波前分成不同衍射级数的线束(此处示0级和±1级衍射束)；(b)类似地，一个束流可以用光的驻波分开，通过离子化或者分裂，或通过偶极交互作用对波前的相位进行调制；(c)振幅式分波器使用激光脉冲产生原子基态$|g\rangle$与共振耦合的激发态$|e\rangle$的相干叠加。激发时，原子成为纠缠态，内部态或者质心态虽然不能探测，但是这两个态是紧密相关的；(d)通过双光子拉曼跃迁，两个超精细基态$|g_1\rangle$和$|g_2\rangle$产生叠加，这种装置称为拉曼分波器

朱棣文等实现了基于原子干涉仪的纠缠，通过双光子拉曼跃迁将两个精细基态耦合(见图2(d))，使精度提高。进一步，使用双光子分束器产生的动量转移比单光子分束器提高一倍。基于纠缠的分束器成为当今最灵敏和最准确的物质波探测器。

用原子作为量子传感器

原子干涉仪对于测量惯性力特别有用，如测量地球的重力或旋转。典型的实验是有效地测量地球的重力加速度，或者测量转动加速度。将两个原子重力仪组合在一起，可以测量重力梯度。

原子重力计应用于环境监测：根据加速度的微弱变化给出地震和火山爆发的预警。与地球圈和卫星相关的惯性传感器可用于大地水准面的精密确定，提供水平面和冰川变化的信息。量子重力计的灵敏度可达一亿分之一，可以用于深层地质资源探测。原子惯性传感器可以用在导航系统中。

将分子作为量子传感器

原则上，分子干涉仪也可以探测惯性力和相对论效应。分子干涉仪可以达到其他方法达不到的精确度和尺度。一方面，用于超大质量极限中量子力学的线性问题，另一方面，研究在确定场中去局域化粒子行为，由此得到这些粒子的内部性质信息。

分子内的性质受到外场作用后会导致其轨迹改变。常规的仪器实现的分子束流宽度为100 μm，而量子干涉仪可以产生分子的纳米图样，其周期可以小到80 nm。因此，束流偏转的位置灵敏度能够提高上千倍。还可以探索分子和团簇的磁学性质，磁偶极矩，甚至团簇中的相变。

大质量干涉仪实验可探测的德布罗意波长能短到200 fm。正在设计用于干涉仪实验的不同分子和纳米粒子，其原子质量单位达到或超过10^7 amu。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net