

控制光场的原子钟

(中国科学院武汉物理与数学研究所 管桦、黄焱、高克林 编译自 Serge Haroche, Michel Brune, Jean-Michel Raimond. *Physics Today*, 2013, (1): 27, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

2013年1月出版的*Physics Today*杂志刊登了法国法兰西学院教授、诺贝尔奖获得者塞尔日·阿罗什(Serge Haroche)等的专题文章. 文章描述了 Ramsey 干涉仪作为一种非破坏性探测的工具, 用于探测单光子的产生和湮灭, 通过伺服回路反馈制备光子的量子态, 以及通过原子和光子的纠缠实现薛定谔猫态.

2011年12月逝世的 Norman Ramsey 于1949年发明了分离场原子干涉仪, 从而引起了时间测量的革命. 该技术最初被用于分子束磁共振谱测量实验, 提高了测量的分辨率. 后来, Ramsey 干涉仪被广泛应用于原子钟, 在很大程度上提高了原子钟的精度. 在基础物理方面, 原子钟被用于检验狭义和广义相对论; 同时, 原子钟也是用于检验量子理论实验的探索工具: 该实验为一连串的原子弹穿腔并与囚禁于腔中的光子“作用”, 其目标不是测定光子的时间, 而是控制它. 随着20世纪80年代量子光学的快速发展, 通过腔量子电动力学(Cavity QED)实验可以制备出不同寻常的、人工剪裁过或者人为设计出来的电磁场, 这些场被用于实现对原子分子量子态的调控, 由此探索量子信息处理过程, 并加深人们对于原子—光子相互作用的基本认识. 从而展现出利用腔量子电动力学可以灵活操控原子、分子和光子的量子态.

将微波频率锁定到 Ramsey 中心条纹, 就实现了一个锁定于原子中电子态间固有跃迁频率的时间标准. 为了提高测量的精度并得到窄的条纹, 需要探测时间长. 因此, 对于喷泉原子钟, 人们探询运动较慢的原子, 其速度通过激光冷却被减小到10 cm/s左右. 探询时间为1s得到的条纹间隔为1Hz左右. 这样



通过1天平均, 条纹间隔的稳定度能优于 10^{-7} , 对应钟的不确定度为 10^{-15} , 相当于3千万年误差为1秒. 微波钟所选取的参考频率较低, 是制约其性能的因素(对铯钟而言, 超精细结构跃迁为9.2GHz). 对于最近研制的光钟, 在宇宙年龄的尺度上误差只有几秒钟, 其不确定度比微波钟小100倍. 光钟是将较高频率的激光(1000THz)锁定到单个囚禁离子只有几赫兹宽度的光学共振峰上. 光钟尽管不依赖于 Ramsey 干涉仪, 但它们依赖于另外一个神奇的

光谱工具——飞秒光梳.

为了保证 Ramsey 钟的原子叠加态不受干扰, 需要消除杂散电场和其他效应的影响. 当然, 我们可以通过精心设计的实验极大地减小外场的影响, 相反, 我们也可以将这些干扰变为优势. 在过去的若干年中, 巴黎高等师范学院的科学家们一直在做这样的工作: 利用对辐射具有超高敏感度的 Ramsey 干涉仪去计量和操纵光子而不去破坏它们. 要完成上述的实验, 需要将囚禁光子的腔放置在干涉仪的两个微波区域之间(图1(a)). 同上所述, 原子会在区域

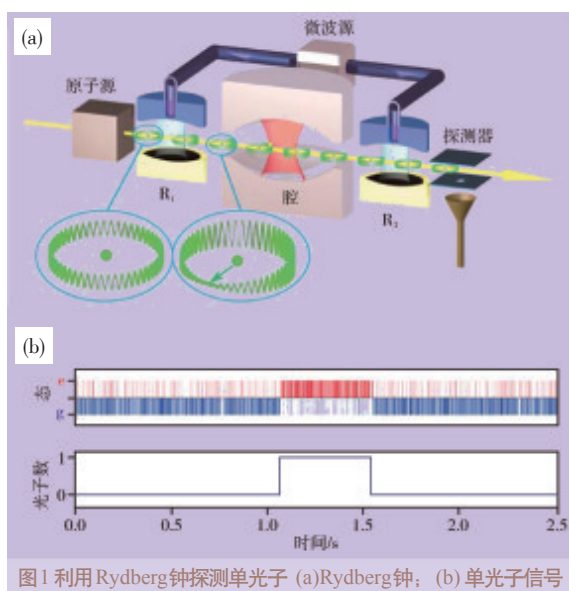


图1 利用 Rydberg 钟探测单光子 (a) Rydberg 钟; (b) 单光子信号

R_1 和 R_2 与微波发生作用,同时它们还通过了光腔。关键是,由于光腔的腔频 ν_c 和原子的跃迁频率 ν_{eg} 相差甚远,因此原子和腔之间不会交换光子。尽管如此,如果光腔中的任何光子和原子发生相互作用,就会造成原子跃迁频率的移动。类似于两个耦合的非共振经典振荡器,这些“光频移”反比于频差 $\delta=\nu_{eg}-\nu_c$,正比于光子数 n 。造成的结果是:在 R_1 和 R_2 区之间产生的原子相干相位差 $\Delta\phi$ 被叠加了 $n\Delta\phi_0$,其中 $\Delta\phi_0$ 为每个光子的相移。

能否利用特定的原子态来提高测量的灵敏程度?环形里德伯(Rydberg)态原子是一个候选的对象。人们通过激发铷原子的价电子到半径为微米量级(比铷原子基态的轨道大3个量级)的环形轨道来制备环形里德伯态。如此大的原子就像一根天线,对近共振场特别敏感。电子波函数形成一个主量子数为整数的圆形的行波。能级 g 和 e 的主量子数分别为50和51。能级 e 具有更大的轨道,实验中将能级 e 的运动轨道调到比能级 g 长1个德布罗意波长。一束原子以250m/s的速度通过干涉仪,第1个微波脉冲制备能级 e 和 g 的叠加态,两个德

噪声。即便如此,1s后仍然能够清楚辨别向上的量子跳跃,表明有1个光子在腔中。光子的寿命为0.5s。如此长的寿命并不值得惊讶,因为在任何自然辐射中,粒子都偶尔能够呆得比自然寿命更长。同样的光子能够被几百个不能吸收它的非共振原子所“观察”到。这种探测叫做量子非破坏性探测(QND)。通常情况下,光探测会使单光子湮灭,而通过量子非破坏性探测能够让单光子保持在腔中,从而可以再次被探测。这种计数方法需要制备一个具有能明确分辨光子数的量子态——Fock态,这种情况下,或者是真空态 $|0\rangle$,或者是单光子态 $|1\rangle$ 。

Ramsey干涉仪的效用远远超出计数。它的量子非破坏性探测的结果可以输入到计算机,从而估计场的能态,并决定如何作出反馈,将场达到所需的状态并保持。该反馈方法通过控制量子场,能制备一个脆弱的Fock态并维持无限长的时间。但是,仅仅观察光子会不可避免地产生不可预知的影响,即所谓的“背后动作”。然而,一旦一个原子已经被探测,对光子数的分布产生改变的背后动作可以利用Bayes定律推断得出。计算机可以利用连续测量的结果来更新场的状态(见图2)。在每一步中,都对当前态和目标态的距离进行估计,进行反馈使之减小。在经典反馈中,该过程被应用在检测校正回路中,直到达到目标。然后,计算机监视量子跳跃,并修正其效果。

由此方法可以制备其他重要的场能态。特别感兴趣

的是薛定谔猫态及多个相干态的叠加态,它们拥有相同的光子数并且相位几乎相反。制备这些态是量子物理中的一个重要方面——能量及相位上的互补。通过Ramsey干涉仪逐步得到了光子数,此时场的能量相位呈随机分布。在量子非破坏性探测光子计数方法中,第一个里德伯原子的相位是很模糊的。对于叠加态中的激发态及基态的成分,场的相移方向相反,分别为 $\pm\Delta\phi_0/2$ 。因此,发生作用后,原子与场产生纠缠,形成总的叠加态。如果 $\Delta\phi_0=\pi$,“原子及场”体系的两种组分与两个相位相反的相干态是相关的。该系统让人联想到薛定谔猫,它与两能级体系纠缠,从而处于生与死之间。通过测量原子离开腔时的能态可知场的相位,并将它投影到叠加态的两个组分之一,从而解除量子模糊。为了保持模糊特性,第二个Ramsey脉冲是必须的。它将激发态和基态进行融合,所以,最终的原子检测对腔内原子的能态不会产生附加信息。因此,原子的最终检测是将场投影到两个相干态的一个叠加态。在相同的 $\langle n \rangle$ 下,薛定谔猫态和Fock态的寿命拥有相同的数量级。能量越大,在它们衰减前制备这些非经典态的难度越大。这就解释了为什么很难制备和观测宏观物体的纯量子叠加态。

Ramsey将他的干涉仪作为研究精密光谱的一种工具。正如其他具有突破性的发明一样,该工具被证明已经远远超越它当初设想的作用。该干涉仪不仅可以对时间进行高精度的测量,而且它提供了一个操控量子态的实验平台。利用原子对光场进行控制实验的背后,一个可能的设想是,构建特定的能态来提供实现信息处理的新方法。在量子计算方面,人们探讨了在两能级量子比特上处理复杂纠缠态信息编码的方法。在许多方案中,量子比特通过与量子振荡器的相互作用进行耦合,这些振荡器可能是由腔中的场或者机械振荡器(如振动的原子或者离子阱中振动的离子)组成。在另一个新进展中,量子比特以超导Josephson结电路的形式,表现为人造原子的形式。和真正的原子相比,介观电路很大,因此可以更强烈地耦合到射频谐振器。在上述领域中,从光子的捕获到振动的离子及电路谐振器,Ramsey干涉法都得到了成功的应用。它们已经被用来建立耦合量子比特的量子逻辑门,演示量子计算算法,并建立非经典振荡器能态,且保证它们不会消相干。接下来将推广到更复杂的系统。

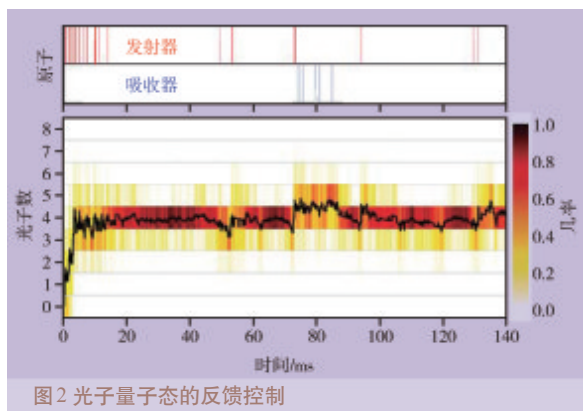


图2 光子量子态的反馈控制

布罗意波仅在轨道的一边发生干涉。由于电子的密度具有新月形,原子获得巨大的电子偶极,就像一台钟的指针,以频率为 $\nu_{eg}=51\text{GHz}$ 的速度旋转。经过第二个脉冲之后,原子进入一个探测器,该探测器构造一个电场来电离原子,并能甄别原子的 e 态和 g 态。初步的原子探测信号见图1(b),由于单光子和单原子态存在不确定性,造成了许多的测量

的是薛定谔猫态及多个相干态的叠加态,它们拥有相同的光子数并且相位几乎相反。制备这些态是量子物理中的一个重要方面——能量及相位上的互补。通过Ramsey干涉仪逐步得到了光子数,此时场的能量相位呈随机分布。在量子非破坏性探测光子计数方法中,第一个里德伯原子的相位是很模糊的。对于叠加态中的激发态及基态的成分,场