

在弯曲时空中检验量子理论

(北京大学 徐仁新 编译自 Djordje Minic. *Physics*, July 21, 2025)

近期提议的一项实验或可揭示量子论和广义相对论之间未知的关联。

虽然诞生于一百年前的量子论如今取得了巨大成功,但仍存在一个明显的疑问:物质的属性是量子化的,而由物质的存在所确定的时空却似乎是连续的;这会导致若干深刻问题。时空是否具有不可分割的量子单元?当然这些单元或许不像物质那样一步一步地可分割。若如此,时空量子是否具有可观测的特征并牵连到其他物理领域?为此,美国伊利诺伊大学的 Covey 及其同事给出一个解决方案,涉及地球周围弯曲时空中量子态属性的测量。

这个方案跟量子引力有关,即如何将量子论和广义相对论逻辑一致地统一起来。不少学者认为这是物理学最重要的疑难之一(当然,也有人认为引力就不该量子化,量子引力概念可能根本上是误导的)。跟蓬勃发展的量子理论和应用领域相比,量子引力仍停留在理论研究阶

段(包括弦理论和圈量子引力等)。因此,量子引力具有推测性,缺乏经验性,只能通过已知的量子论和广义相对论来约束。

物理学家在20世纪50年代就提出量子引力的实验检验,但大多是不切实际的。近几年来,人们开始严肃地对待这些想法,并兼顾了量子光学、引力干涉和多信使天文等技术的快速发展。他们研究了量子引力的若干可能表现,包括引力诱导的量子纠缠、引力干涉时的量子时空涨落,以及引力场三阶以上的内禀量子干涉效应。(注意:在量子引力理论中才会有这类干涉效应。)Covey 等的研究就属于这一新兴领域。

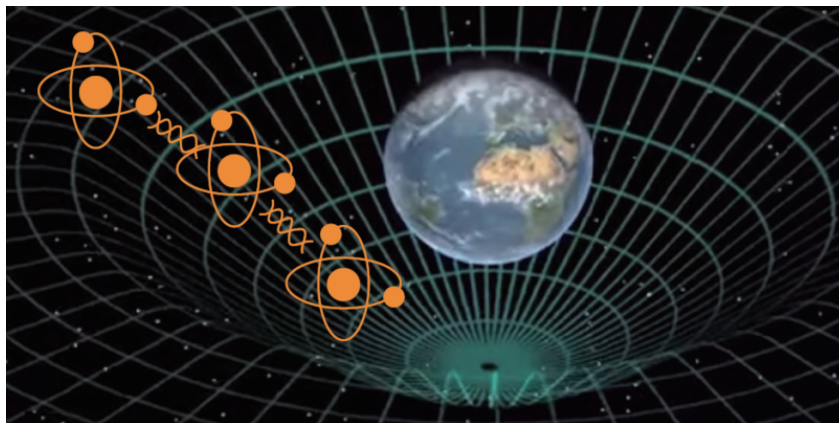
理论上,在超越牛顿力学描述的极限时,可以探索弯曲时空中的量子效应。Covey 等希望设计一个实验,以获取量子论在该特殊情形

下成立的经验,探索后牛顿弯曲时空中的量子行为。团队也意识到一个现实的挑战:量子效应在特定空间尺度范围内的表现极其微弱。

为此,Covey 等提议在地球引力场中构建相距较远的、对后牛顿弯曲时空敏感的量子态。具体而言,他们考虑在相距几公里的不同高度上放置三个光学原子钟系统,如图所示。通过在每个时钟中编码信号来实现离域,但整个系统组成一个纠缠态。整个状态的性质依赖固有时的差异,因而跟三个原子钟所处的时空曲率相关。

Covey 等讨论了如何通过实验探索弯曲时空中的量子理论,包括理论的线性、么正性和概率性(玻恩规则)等方面。这些都是量子态结构、演化和测量的核心。该方法的新颖之处在于:基于过去十来年在中性原子和离子囚禁方面的进展,以实现弯曲时空中的新型量子探针。

该方案的未来实施将逼近现有实验极限,其主要困难来源于整体纠缠态不可避免的脆弱性。其他的量子引力实验也面临类似的挑战。关于量子理论基本原理的实验检验,玻恩规则可能是最薄弱的,特别是处于引力中的情形。从乐观的角度看,这个领域或许正酝酿着关于量子引力的惊喜。尽管结果未知,但这些研究无疑将深化人们对量子理论的理解,从而助力量子技术的发展。



Covey 及其同事认为,可以利用相距较远的三个原子钟来探究弯曲时空中的量子理论

DOI: 10.7693/wl20250909 CSTR: 32040.14.wl20250909