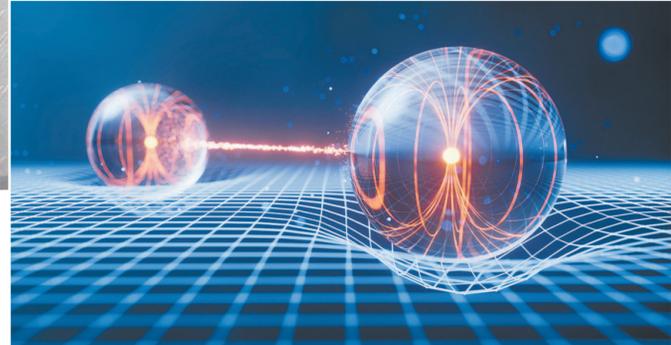
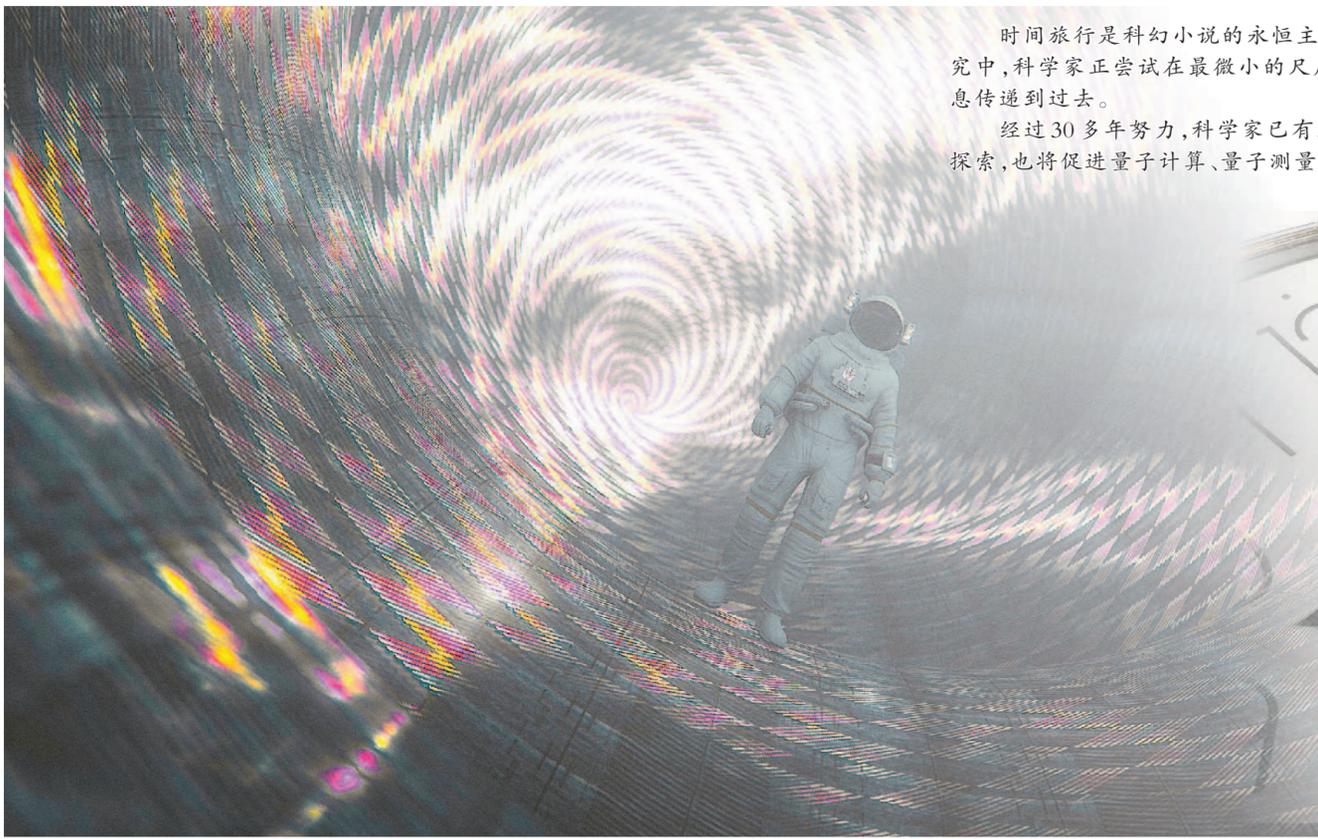


粒子尺度上“回到过去”正在走向现实,或将提升量子处理器效率

量子世界中,时间旅行早已无处不在?

时间旅行是科幻小说的永恒主题之一,也是人类迄今尚未实现的一个梦想。在量子科学研究中,科学家正尝试在最微小的尺度上实现时间循环,通过量子纠缠将粒子或粒子所携带的信息传递到过去。

经过30多年努力,科学家已有所突破。虽然人类穿越到过去几乎没有可能,但哪怕是现有探索,也将促进量子计算、量子测量等领域的技术发展,甚至还将推动量子领域的理论研究。



以上均为概念艺术图,分别表现人类时间旅行(左)、时空扭曲(右)和量子纠缠(右下)。

■本报见习记者 刘琦/编译

当美国麻省理工学院物理学家赛斯·劳埃德首次提出量子时间循环理论时,他没有料到会收到无数自称是“时间旅行者”的人发来的“求助”邮件。他开玩笑说,如果时间可以倒流,他可能就不会这么做了。

遗憾的是,劳埃德无法回到过去。虽然没有人会回到过去,但粒子也许可以。理论上,物理学家们早已假设过通往过去的时间循环。但由于这一设想存在诸多不切实际的难题和悖论,它一直被认为是不可行的。现在,劳埃德和他的同行们已经开始证明,在量子领域,这些通往过去的时间循环不仅在理论层面是可能的,甚至在实验层面也是可行的。换句话说,我们很快可以尝试试把粒子送回过去。

如果实验成功,即使不能让人回到过去,我们也有可能将消息,至少是量子信号送回过去。更重要的是,研究这一现象将带我们深入了解因果关系的本质、量子理论的含义,以及我们怎样才能发展出一个更全面的、抓住现实本质的新理论。

利用量子纠缠 操控时间循环

理论上,创造大尺度通往过去的路,需要黑洞这样的庞

延伸阅读

日常生活中,时间似乎是一个线性的进程,从过去到现在,再到未来。然而,量子物理却展示了一个完全不同的时间形象——在微观世界中,粒子可以同时存在多个状态的叠加,时间也不再是一个指向单一的绝对常量,而呈现出更加复杂和神秘的面貌。

量子纠缠与时间悖论

量子纠缠是量子力学中最奇异的景象之一,爱因斯坦称之为“幽灵般的超距作用”。

两个纠缠的粒子即使相隔千万里,也能瞬间影响彼此的状态。这种现象不仅挑战了人们对空间的理解,也对时间概念提出了新的疑问。它让我们思考时间是否真如我们所感知的那样单向流动。

量子力学中的时间旅行

在量子力学的框架内,时间旅行

然大物让时空弯曲到自我闭合,这显然难以在实验室实现。或许,在实验室中可通过量子纠缠,在粒子尺度上把信息发送回过去。

在物理学中,时间循环更恰当的名称是“封闭类时曲线”(CTC),最早出现在爱因斯坦的广义相对论中,该理论认为时空可以弯曲。

理论上,如果能让时空足够弯曲,它就会自我闭合,从而形成通往过去的路。唯一的问题是,要产生如此大幅度的时空弯曲,需要质量极大的物体以非常快的速度旋转。现实中,可能只有黑洞能满足条件——而这显然不是我们在实验室里能造出来的。

不过,这类情况适用于相对较大的时间循环,即理论上让人类穿越到过去的那种。那么,如果是在最微小的尺度上操作时间循环呢?在量子力学领域,已有突破性的实验表明,我们可以在这个领域中构建数学上等效的时间循环,这就是量子封闭类时曲线(简称量子CTC)。

长期以来,物理学家对“量子领域中的时间循环”这个想法嗤之以鼻,主要是因为这与人们所认为的时间在这一框架中的运行方式不符。

人们认为,与广义相对论相比,时间在量子力学中的运行方式大相径庭。事实上,物理学家试图将相对论和量子力学融合起来,找到一种能在各种尺度上描述现实的理论,而这种不一致正是他

的可能性是有理论基础可循的。

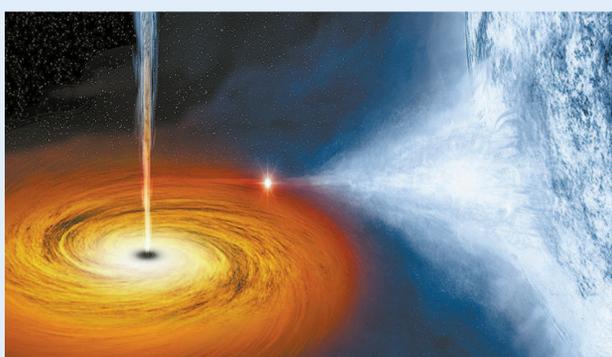
通过量子隧穿效应,粒子能够瞬间穿越看似不可逾越的障碍,仿佛在时间中跳跃。这种现象提示我们,时间可能不是一条单一的直线,而是一种多维度的存在。

理解量子时间

怎样理解量子物理中的时间概念?想象一下,你在观看一部电影。通常情况下,你会从头到尾按顺序观看。但如果你有一台特别的遥控器,可以随意跳转到电影的任意部分,这就是量子时间的一种比喻。

在微观世界中,粒子和事件可以不受我们常规时间观念的限制,随意跳跃。

量子物理揭示了时间的复杂性和多样性,远超出我们的直觉理解。通过深入研究这些现象,我们不仅可以更好地理解宇宙的本质,也可挑战和扩展我们的思维边界。



(本版图均视觉中国)

们面临的一个最大障碍。

在相对论中,时间和空间交织在时空结构中,因此时间可在引力的影响下收缩和拉伸。而在量子力学中,时间通常被视为在背景中不断滴答作响的钟表——因果关系始终是因在前,果在后。

这听起来似乎完全排除了量子时间循环的可能性。但是,一种日益流行的量子力学观点以不同的方式看待时间,这种方式被称为“逆因果性”。它的出现源于对量子力学中“纠缠”这一奇特特性的思考分歧。

当两个粒子发生纠缠时,即使相距数十光年,它们也会表现出同一个量子态。例如,测量其中一个粒子的状态,就能立刻知道另一个粒子的状态。如果这些纠缠的粒子相互通信,那么这种交换必须发生在超光速下,而相对论对此是禁止的。爱因斯坦对纠缠持怀疑态度,他认为结果必须是预先确定的,但这一点在实验中一再被排除。

人们通常认为,量子纠缠挑战了我们的位置概念——即物体之间的空间很重要。换句话说,纠缠证明了量子力学是“非局域”的:它不在乎距离。

与此相反,“逆因果性”将纠缠视为一种跨越时间的连接。在这种解释中,当你测量一个纠缠的粒子时,一个信号被发送回它纠缠的时间,并随着另一个粒子一起前进,从而消除了广阔距离上传递瞬息的需要。局域性得以保留,但标准的因果性被舍弃了。

尽管我们不知道哪种解释是正确的,但长期以来,主流观点一直认为量子力学是非局域的,而逆因果性则主要停留在哲学层面。

1991年,英国牛津大学理论物理学家戴维·多伊奇利用逆因果性提出了量子CTC的概念。多伊奇试图用量子物理学的某些理论来绕过任何涉及因果关系的悖论,例如“祖父悖论”。该悖论假设一名时空旅行者回到过去杀死了自己的祖父,从而也否定了自身的存在。

多伊奇的理论受到量子力学多世界解释的启发:他认为,一个穿越时空的粒子如果回到过去并毁灭了自己,那么它只是进入了多元宇宙的另一个分支。但其他人认为这并不能解决悖论。

根据未来“愿望清单” 改变过去

在一个思想实验中,科学家来自未来的“愿望清单”消息发送回过去,从而调整粒子的初始状态。不过,该实验实际仅有1/4的成功率,科学家丢弃了所有不想要的结果,这让它看上去像是作弊。

2010年,劳埃德和同事们发表了一个更新版的量子CTC,该版本无需调用多元宇宙来解决“祖父悖论”。它使用了量子计算中一种名为“后选择”的技巧。“后选择”的意思是先进行大量计算或测量,然后舍弃那些没能输出想要的结果的那部分。

量子世界中,总是存在不确定性因素——粒子存在于一团可能的状态中,直到有人对其进行测量。因此,劳埃德团队提出了一种方法,即利用后选择和纠缠来回到过去,并改变过去那些从未被测量过的事情。劳埃德指出,必须强调的是,过去具有确定结果的事情是无

法改变的。这对于那些希望尝试时间旅行的人来说无疑是个坏消息。

事实证明,劳埃德版本的量子CTC可以发挥惊人作用。比如在计量学领域,利用量子力学系统,我们对诸如磁场、光,甚至引力波等的测量精度,可以远超经典物理所能达到的水平。

但问题在于如何设计这样的测量实验。通常情况下,你并不掌握将要进行的实验所需的信息,例如磁场的方向。没有这些信息,就不知道该如何准备一个粒子,以便对其进行最佳测量。

美国马里兰大学的尼科尔·哈尔珀恩、英国剑桥大学的戴维·舒库尔以及瑞士苏黎世联邦理工学院的艾丹·麦康奈尔就曾被这一问题所困扰,直到哈尔珀恩看到了劳埃德的量子CTC想法。

2023年,这三位研究人员发表了一个思想实验,概述了如何有效利用粒子来创建劳埃德提出的“量子时间循环”。这个实验涉及到一组粒子在一个特殊顺序中的纠缠和测量。

为了便于理解,研究小组用比喻的方式来描述这个思想实验:某人计划给朋友寄一份礼物,知道需要三天才能送到。他在第一天寄出了礼物,但恼人的是,第二天他收到了朋友的愿望清单。于是,他利用时间循环将信息传回过去,调整了已寄出的礼物,这样朋友就能恰好得到他想要的礼物。

在实际的思想实验中,礼物是粒子A,而“愿望清单”则对应粒子C的一个量子力学特性,即自旋。一旦知道了这一点,实验者就能使用粒子D来链接过去,去影响粒子A的属性,使其与粒子C的特性保持一致。

出于技术原因,这个过程实际上只有1/4的成功几率,其他结果则在后选择过程中被丢弃了,这可能看起来像是在作弊。但研究人员认为,思想实验涉及的测量方法决定了过去的某些事情:在量子力学中,这在数学上等同于将状态传回过去,粒子A的过去状态是由未来实验中设定的条件决定的。

“我喜欢他们的研究。”美国加州查普曼大学的哲学家艾丽·阿德拉姆说。但她表示,这并不是真正的逆因果性——如果是,那它应该每次都能成功。“真实情况是,他们丢弃了所有产生错误结果的实验。”而且,她强调,这只是个思想实验,没有任何东西真的被送回过去。

一项真实实验 将空谈转为行动

将测得的量子最佳状态通过量子纠缠发送回过去,该实验将物理学家的长期探索从空谈转为行动。如果用来解释很多量子现象的逆因果性是正确的话,这意味着时间旅行在量子领域已无处不在。

思想实验发表后,研究小组又与加拿大多伦多大学的物理学家艾弗莱姆·斯坦伯格一起,进一步设计了一个真实实验。这将涉及通过量子CTC向过去发送真实的单个光子。

与此同时,舒库尔和他的同事们也回归“初心”,开始利用量子CTC开展更准确的测量工作,并取得了巨大进展。

在今年3月发表的一项实验中,他们展示了如何利用量子CTC模拟来提高

“薛定谔的猫” 或现幸福大结局

逆因果性理论的一个重要贡献在于,它推动了量子力学和广义相对论中对时间的处理方式的统一,这一步骤对于实现量子引力理论至关重要。

研究人员认为,任何量子引力理论都必须在相对论和量子力学对时间的理解之间建立一致性。因此,如果能够建立一个关于量子力学中封闭类时曲线如何运作的有效模型,这将是创建和验证量子引力理论的一大进展。

如果科学家成功创建了量子时间循环,我们是否有一天可以把人类送回过去?这显然还不可能,因为包括纠缠在内的量子态都极其脆弱。

这就是为什么量子实验通常要在真空中的单个原子上进行,要知道即使是一个“路过”的空气分子也可能破坏其状态。要将我们身体中数以亿计的原子关联起来,并将它们与自己过去身体中的原子纠缠在一起,这是完全不现实的。

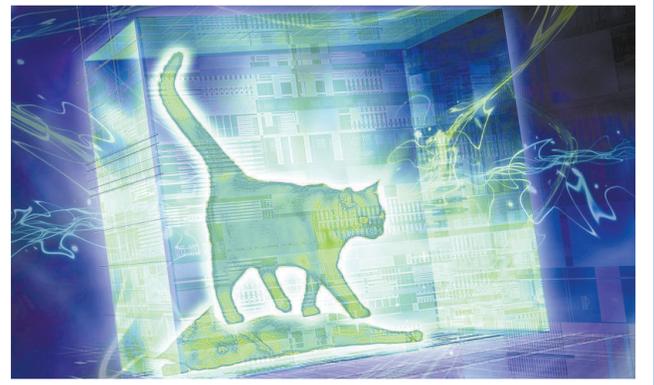
不过,也许我们可以利用量子时

间旅行,来巧妙而有效地调整过去。比如,可以设置一对纠缠粒子,再将它们永久保存,这样就可将之作为一种时间标记。未来物理学家可利用逆因果性来调整粒子的状态,从而影响过去物理学家在测量这些粒子时得到的结果。

当然,这一做法不可能用于直接改变现实世界中的一些悲剧事件,但也许可将量子测量的结果与现实世界联系起来,从而在理论上改变历史的进程。

量子CTC版的“薛定谔的猫”会是一个有趣的思想实验:猫被放在一个箱子里,箱子里有一瓶毒药,毒药的释放由一个处于叠加态的量子粒子控制——这意味着毒药可能释放,也可能不释放。而猫在我们打开箱子之前,既是死的也是活的,直到我们测量了粒子,它才会决定猫是哪个状态。

现在,有了量子CTC,也许我们就可能把最佳状态送回过去,给我们的猫咪朋友一个“幸福大结局”。



量子处理器的效率。这就像你和你朋友一起观星,朋友们都看到了流星,你却观错了方位。但这项实验能帮你带着正确的观星方位回到过去,弥补这一遗憾。且这一次,舒库尔和同事们做到了不丢弃任何结果。

这是怎么实现的?舒库尔的研究小组设计了一个实验,涉及两个被设置为超导量子比特的原子和一个未知场,这个未知场可能是电场、磁场等。他们希望通过监测其中一个量子比特的自旋变化来估算未知场的强度。如果他们不知道场的方向,就无法准备自旋。通常情况下,这类问题的解决方案是准备许多具有不同自旋的量子比特,并利用这些量子比特来推算出场强的情况。但这种方法耗时、消耗大。

更好的方法是利用量子纠缠将该状态发送回过去。在实验中,两个纠缠的量子比特之一被置于场的影响之下。然

后,研究人员准备对纠缠的另一方进行测量,以将最佳状态送回处于场中的量子比特。

劳埃德对此印象深刻。他说,物理学家们长期以来一直在讨论将量子信息传回过去。“这篇论文的伟大之处在于它不是空谈,而是行动。”

劳埃德指出,这将带来各方面的技术优势。不仅是在量子计算领域,在博弈论中也很实用,“有了模拟时间循环,玩家们就无法作弊了”。

长远来看,这项实验可能是为逆因果性理论在学界“正名”的一个契机。美国圣何塞州立大学的量子物理学家肯·沃顿一直是逆因果性理论的倡导者,他表示:“量子信息领域的研究者从这一非主流的观点中得到了启发,并取得了一些成果,这很有说服力。”如果逆因果性是正确的,这意味着时间旅行在量子领域已经无处不在。