

弯曲时空中的量子场与模拟引力系统

刘志龙 王接词

(湖南师范大学物理与电子科学学院 410081)

一、引言

1900年,普朗克提出了“量子”的概念,成功解决了黑体辐射谱的问题,从此物理学界开启了理论物理的新篇章。随后,海森堡的矩阵力学和薛定谔的波动力学等理论框架从不同角度对量子理论进行了深入研究和完善,为现代量子力学奠定了坚实的基础。这些理论不仅帮助我们更好地理解黑体辐射和氢原子模型等经典问题,还通过电子衍射实验验证了微观粒子的波动性,并揭示了光电效应、量子隧穿等一系列令人惊叹的量子现象。

与量子理论几乎同时发展的,是近代物理学的另一基石——相对论。为了应对伽利略协变性中隐含的绝对时间和空间观念与麦克斯韦方程组所预言的光速恒定(独立于参考系)之间的冲突,1905年,爱因斯坦基于光速不变原理(真空中的光速不依赖于观测者的运动状态)和狭义相对性原理(物理规律在所有惯性系中具有相同形式)提出了狭义相对论。在这一理论中,洛伦兹协变性取代了伽利略协变性,成为物理规律的基本对称性。这一成果不仅成为高速运动和高能物理研究的理论基础,还彻底改变了人类对时间和空间的理解。随后,爱因斯坦以等效原理(局域的引力场和惯性效应是等效的)和广义相对性原理(物理定律在任意微分坐标转换下保持不变)为基础,于1915年构建了广义相对论,用弯曲时空的概念成功解释了牛顿时代的“鬼魅般的远程”引力问题。广义相对论不仅解释了水星轨道进动、引力红移、光线偏折和雷达回波延迟等现象,还预言了黑洞这种极端的天体结构。2016年引力波的直接探测,以及2019年事件视界

望远镜拍摄的首张黑洞照片,进一步验证了广义相对论的正确性,并为2020年彭罗斯获得诺贝尔奖提供了支持^[1,2]。

尽管量子力学和相对论理论在各自领域取得了显著进展,但它们之间的兼容性问题仍未解决。非相对论性量子力学仅在低速、低能条件下适用。广义相对论作为经典理论,仍需与量子理论相结合以发展统一的量子引力理论。尽管将相对论与量子理论结合的过程充满挑战,它也揭示了一系列引人注目的现象:连光也无法逃逸的黑洞居然在不断向外辐射能量(霍金辐射);加速运动的观测者会感受到热浴(安鲁效应);宇宙的膨胀由于量子涨落导致粒子的产生;在两块平行板之间,由于量子真空能量的变化,会出现负压现象^[3-5]。这些现象单独地从广义相对论或量子力学的视角看似不可思议,但同时也展示了物质世界鲜为人知的一面。然而,验证这些新奇效应的实验要求极为苛刻,目前的实验技术和精度限制大多难以满足这些要求。1981年,安鲁(William Unruh)首次提出利用“哑洞”模拟黑洞的方法来验证这种特殊现象^[6]。此后,各种不同量子平台相继出现,使得原本难以完成的实验在引力模拟系统中找到了一些对应,各种理论预测的特殊效应逐渐在不同平台上得到验证。

本文主要介绍引力模拟系统的相关原理及一些引力模拟平台的实验发展。由于引力模拟系统如今已经发展为一个相对庞大的领域,因而本文将尽可能介绍一些基本的模拟平台的原理以及一些对应的模拟方案。

二、二次量子化与量子场论

在介绍弯曲时空量子场论之前,一个很自然的问题是:为什么我们需要弯曲时空量子场论?尽管量子力学和广义相对论在各自领域取得了巨大成功,但它们在描述物理世界时的适用范围和理论框架存在显著差异。量子力学擅长处理微观粒子和弱引力环境,而广义相对论则擅长描述宇宙的宏观结构和强引力现象。然而,这两大理论尚未纳入一个统一的理论框架中。为更全面地理解自然规律,我们需要发展一种能够结合两者的理论。此外,兰姆位移和电子的反常磁矩等现象推动了相对论性量子场论的发展,一些问题在平直时空中的量子电动力学框架下得到了成功解决,但当时空背景不再是平直的,量子场论需要进一步扩展到弯曲时空中。如图1所示,实验上引力波的直接探测和黑洞图像的公布表明我们所处的宇宙并不是平坦的时空,而是由广义相对论所描述的弯曲时空。这种时空弯曲对物理规律的影响是不可忽略的,广义相对论所研究的领域也需要考虑量子效应带来的影响。因此,一个完整自洽的理论必须考虑这些因素,这两个有趣的理论的结合是理论物理发展的必经之路。

量子理论和相对论的结合过程并不像想象般的顺畅。在非相对论量子力学中一个自由粒子的能量为: $E=p^2/2m$,根据量子力学基本原理,该自由



图1 2019年国际组织事件视界望远镜(EHT)发布的人类史上第一张直接对黑洞观测的天文影像,取自文献[2]

粒子的演化情况将由薛定谔方程描述,其解将给出该量子系统中粒子位置的测量概率分布。而在狭义相对论中一个能量、动量关系满足: $E^2=m^2+p^2$ (本文公式采用自然单位制度,即 $c=\hbar=1$),如果不假思索地直接将量子理论中的薛定谔方程修改为满足相对论形式,即得到K-G方程:

$$(\square + m^2)\phi(x) = 0,$$

其中 $\square$ 为达朗贝尔算子。这种量子化的方法将引入诸多问题。首先便是相对论能量公式中的平方项会导致存在负能解的问题,其次可以通过计算发现该方程存在负概率的情况,这种负概率的存在将使概率幅失去其物理意义。此外,在高速、高能物理中通常会出现粒子的产生和湮灭行为(例如正负电子对湮灭为光子),按照量子力学基本原理,求解该方程将得到随粒子位置和时间相关的波函数,而在产生及湮灭过程中,粒子数通常是不守恒的,那么这种随粒子位置和时间相关的波函数也就失去了意义。为了解决这些问题,狄拉克发现,这种负概率的计算结果来源于方程中对时间的二次求导项。为了解决这种负概率的问题,狄拉克引入矩阵系数将二阶K-G方程修改为一阶矩阵微分方程,即狄拉克方程^[7]:

$$i\gamma^\mu \nabla_\mu \psi(x) = 0,$$

其中 γ^μ 为狄拉克矩阵,满足 $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$,其中 $g^{\mu\nu}$ 为描述对应的时空信息的张量。而对于负能量的问题,狄拉克引入了“空穴”的概念,并预言了这种具有和电子相同质量但带正电荷的空穴(正电子)的存在^[8]。尽管通过这种方式狄拉克方程能够解决由K-G方程带来的部分麻烦。但仅通过对薛定谔方程的修改,二者都无法在一个自洽的框架下对高速、高能物理中出现的粒子产生、湮灭给出有效合理的描述。

量子场论通过从场的角度重新理解粒子,舍弃了传统波函数的概念,将波函数推广为一个场算符,并引入场算符和其共轲动量的对易关系来完成量子化。这种方法不仅避免了负概率问题,还自然地将粒子的产生与湮灭过程纳入理论框架。例如,

K-G 方程所对应的经典标量场,如果我们选取一组完备的平面波解,那么量子化后的场算符为:

$$\hat{\phi}(\mathbf{x}) = \int \frac{a^3 \mathbf{p}}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2\omega_p}} (\hat{a}_p e^{i\mathbf{p}\mathbf{x}} + \hat{a}_p^\dagger e^{-i\mathbf{p}\mathbf{x}}),$$

其中 $\hat{a}_p$ 和 $\hat{a}_p^\dagger$ 分别是粒子的产生和湮灭算符,共轭动量算符 $\hat{\pi}(\mathbf{x})$ 也可以通过类似的方式展开。通过引入对易关系 $[\hat{\phi}(\mathbf{x}), \hat{\pi}(\mathbf{y})] = i\delta^{(3)}(\mathbf{x} - \mathbf{y})$ 。这一过程类似于谐振子的量子化,但其物理意义扩展至了一般场的量子化。通过这种方法,所引入的产生湮灭算符正好可以用来描述粒子的产生和湮灭,并在粒子数表象下通过产生、湮灭算符来定义粒子和真空态等信息。在这种量子场论的框架下,标量场的量子化自然对应玻色子的统计行为。类似的场量子化方式也可以施加于描述费米子的狄拉克方程。但与标量场不同的是,狄拉克方程所对应的旋量场的对易关系量子化会导致真空能高于部分激发态的能量,只有引入反对易关系才能合理自洽,这也保证了费米子遵循泡利不相容原理。

这种量子化的场兼具量子和场论两种特性。与经典物理和早期量子力学不同的是,量子场论中对粒子的定义是场的不同激发模式,而量子场论的研究也是这些各种激发模式之间的相互作用与转换,为粒子产生、湮灭及其相互作用提供了全新的理论框架。

三、弯曲时空量子场与量子效应

在量子场论的基础上考虑弯曲时空带来的影响,需要将量子场与广义相对论结合起来。弯曲时空的性质由该时空下的线元或度规张量表示。而其核心爱因斯坦场方程则是求解线元形式的方程:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

其中 κ 为常数, $R_{\mu\nu}$ 和 R 分别为里奇曲率张量和标量曲率。从方程展示了物质的能量、动量分布如何决定时空的结构。正如“物质教时空如何弯曲,弯曲的时空教物质如何运动。”得益于张量理论中方程的协变性,这意味原来的满足协变形式的量子场方

程或者拉氏量可以很好地推广到弯曲时空。

令人兴奋的是,弯曲时空量子场论不仅仅是数学上的延伸,它预测了许多超越经典物理直觉的奇异效应。它预测了许多颠覆经典理解的效应。在平直时空的量子场论中,我们总是在惯性系下讨论问题,这时可以将一个标量场用平面波完备基的形式展开,从而用引入的产生、湮灭算符来定义粒子和真空。可以证明,在不同惯性系中所定义的粒子和真空是一致的。而在弯曲时空下,完备的展开基矢选取可能是不唯一的,这意味着可能用不等价的多个产生、湮灭算符来定义粒子和真空。粒子和真空依赖于时空结构、观测者的选取。这种不同完备基之间的变换方法被称为 Bogoliubov 变换。

霍金在 1974 年利用 Bogoliubov 变换预测了黑洞并不是绝对的“黑”^[3],而是在不断地向外辐射粒子直至蒸发,并且这种辐射谱严格地满足黑体谱(被称为霍金辐射),这种机制导致黑洞逐渐失去质量并最终蒸发。这是令人难以置信的,因为在经典广义相对论的框架下,黑洞只会不断吸收物质并且黑洞内部的任何粒子无法从中逃逸,这使得其成为一个绝对的“黑”洞。这一特殊的辐射效应与 1973 年贝肯斯坦从黑洞热力学角度用卡诺热机的方式计算得到黑洞等效温度一致^[9],两者的方案都反映出这是一种量子效应。随后安鲁于 1976 年也通过该 Bogoliubov 变换方法证明了在平直时空中做加速运动的观测者会感受到“粒子浴”(被称为安鲁效应)^[4]。

然而,这种不同理论结合所预测的种种奇异效应,仿佛在一次次掀开物质世界的神秘面纱。这些理论所预测的效应究竟是真实的物理现象还是错误的结合产物,这不仅仅刺激着科研工作者的求知欲,也更意味着理论结合的正确性和未来研究的方向,而最终的真相必须通过实验的检验来揭示。

四、模拟引力系统

弯曲时空量子场论所预测的这些特殊效应,为理论物理学提供了深刻的洞见。然而,这些效应在

激发学术界热烈讨论的同时,也伴随着一个极大的挑战:如何在实验上验证?例如对于黑洞的霍金辐射问题,理论上计算一颗太阳质量的黑洞由于霍金辐射效应带来的等效温度(我们称之为霍金温度)约为 10^{-8} K,这种霍金温度的大小与黑洞质量成反比,且天文上由引力塌缩形成的黑洞引力质量通常大于3倍太阳质量,也就是说天文上可能存在的大质量黑洞的霍金温度将比 10^{-8} K 更小。并且实验表明我们的宇宙并不是完全“空旷”的,而是充斥着一种几乎各向同性的微波辐射,即宇宙微波背景辐射(CMB),这种微波背景辐射的温度约为 2.7 K。这意味着即便我们忽略地球上各种电磁信号的干扰,单纯地想在天文观测上从宇宙微波背景辐射的巨大噪声中提取微乎其微的霍金辐射信号无异于大海捞针。同理,我们可以计算与之相似的安鲁效应,想要通过检验这种由加速运动带来的温度为 1 K 的热浴效果,需要至少实现 10^{21} m/s² 的加速度才有希望提取有用的信号,而这在当前技术条件下几乎不可能实现。这些巨大的数量级之差将理论的密钥藏匿于幽森的黑屋之中,尽管知道它在其中,却看不见它的方位,无法碰触。

1981年,安鲁在其题为《Experimental Black-Hole Evaporation?》的论文中首次构建了一个振奋人心的方案^[6]:既然无法在天文实验中直接观测黑洞的霍金辐射,那为什么不创造一个与真实黑洞拥有相似性质的模拟黑洞。黑洞由于量子效应会发出霍金辐射,那么创造的模拟黑洞按照理论的推测

应该也能通过量子效应展示出霍金辐射的信号。安鲁的模拟方案基于声波在流体中流动与光在弯曲时空中传播的相似性,创造了一个声学黑洞模型——“哑洞”。通过控制不同位置处流体的流动情况来模拟时空弯曲的信息,例如创造一个超音速流动的流体区域来模拟光子无法逃逸的黑洞事件视界内部区域,以及低音速流动的区域模拟对应的黑洞外部区域。随后,安鲁通过数学计算,将描述流体扰动的欧拉方程与描述黑洞几何性质的度规联系起来,成功展现了声学黑洞的理论可能性。由于初始的浅水波实验方案是用在经典理想流体模型上构建的,实际的实验上存在极大的经典噪音和粘度等问题,从而影响探测霍金辐射等信号。Garay等人于2000年提出用玻色爱因斯坦凝聚体(BEC)作为量子流体实验平台^[10]。他们从BEC系统哈密顿量出发,推导出该系统中量子态的演化方程,并相似地与黑洞时空度规联系,从而在量子系统中实现黑洞的模拟,这一方案克服了经典流体实验中的许多问题,为实验研究提供了更加理想的平台。随后2001年Schützhold等人提出可以利用电磁诱导透明技术提出了介质黑洞^[11],通过将光在原子蒸汽中的速度调控下降至米每秒量级,使得实验室中介质的移动速度大于介质中光速来完成事件视界的构建。2002年安鲁等人提出了利用浅水表面波来模拟黑洞^[12],这使得实验中能通过控制水面高度来调控表面波波速,从而提升实验参数的可控性,极大地增强了实验的可操控性质,方案示意图见图2(a)。

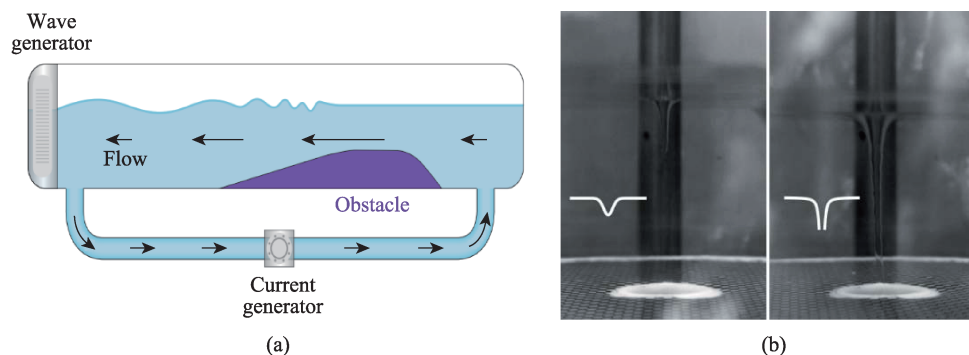


图2 (a) 浅水波的哑洞模拟方案示意图,利用表面波波速和水面高度的关系,通过设置特殊的底部障碍物来调整表面波波速,取自文献[14];(b) 利用超流氦-4创造的巨型涡旋,取自文献[20]

利用这种装置,Rousseaux 等人发现了负频模转换的信号^[13],这一转换现象与霍金辐射存在一定联系。但是这种受激辐射的信号是否能正确表征黑洞霍金辐射对应的自发辐射过程依然受到不少争论。为了在实验上得到更清晰有效的霍金辐射信号。2010 年,Steinhauer 等人利用 10^5 个铷-87 原子形成的 BEC 制造了声学视界模拟物,随后在 2016 年利用关联函数的方法报道了霍金粒子的产生^[15,16]。除此之外,2017 年 Torres 等人利用浅水波制造了涡旋流^[17],并通过分析入射波被中心涡旋散射后的行为,在实验上第一次观测到了另一种被称为超辐射的量子信号。

在经典流体和 BEC 量子模拟平台取得一系列成果的同时,各种具有不同优势的量子平台也不断涌现出来:离子阱、超流体、光学超材料、超导量子平台等等。如图 3(a)所示,基于电磁波在引力场和非均匀介质中运动的类似性,Sheng 等人在实验上制备了光子黑洞,模拟了爱因斯坦环等效应^[18,19]。超流体在继承 BEC 超低温的实验环境基础上解决了流体粘度带来的问题,使得可以进一步在实验上实现旋转等更为复杂的时空结构,如 2024 年 Švančara 等人利用超流氦-4 在实验上创造了稳定的巨型量子涡旋^[20],这为旋转黑洞时空的量子模拟打开了道路。离子阱和超导量子电路是极有希望发展成为未来量子计算机的两个量子平台。离子阱具有长相干时间和高保真度的优势,但是扩展性和

量子门的操作速度上略显不足。而超导量子电路与其相反,在目前阶段存在相干时间以及保真度的问题,但量子门的快速操作和适合集成电路的制造工艺的优势使其更有希望发展成为大规模系统。对于超导电路量子模拟平台的模拟方案目前主要分为两类:将哈密顿量的含时演化问题转化为由量子逻辑门构成的超导量子电路问题和将弯曲时空量子场的哈密顿量与由耦合在一起超导量子比特链模型的哈密顿量联系起来。前者的困难主要由两个方面构成:如何把对应系统的哈密顿量拆解为对应的量子逻辑门;较短的相干时间难以保证大量量子逻辑门的保真度。因而目前引力系统的模拟平台在实验上可实行的方案主要为后者,即通过将弯曲时空中的量子场的行为信息编码在量子比特及比特之间的耦合强度之中,使得量子比特链构成的整体系统哈密顿量与弯曲时空量子场的哈密顿量对应。2013 年 Lähteenmäki 等人基于超导量子干涉器件(SQUID)的模拟得到了卡西米尔效应的特征:双峰雀尾结构的功率谱^[21]。2016 年 Sabin 等人提出了基于直流超导量子干涉仪阵列的 1+1 维虫洞时空模拟方案^[22]。2020 年, Yang 等人提出任意二维静态时空中的无质量标量场与一个与位置相关的 bosonic hopping 模型等价^[23],而无质量狄拉克场则与位置相关的 Hubbard 模型或者各向同性 XY 模型等价。如图 3(b)所示,2022 年 Shi 等人基于该方案在超导量子比特链中实现了弯曲时空量子模

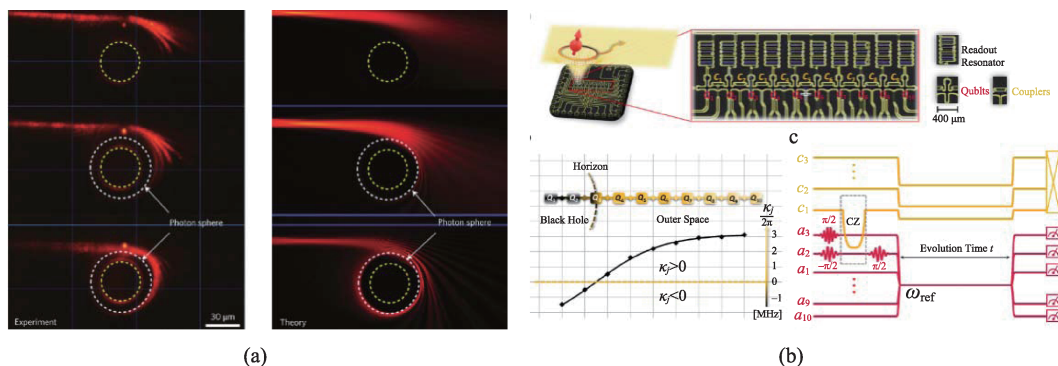


图3 (a) 光波导模拟引力透镜方案,通过调控介质的折射率实现弯曲时空的模拟,取自文献[18];(b) 利用超导量子比特链构成的量子芯片模拟黑洞的示意图,通过调控比特之间的耦合强度来由负到正模拟黑洞事件视界附近的时空弯曲效应,取自文献[24]

拟^[24],通过研究黑洞内部粒子的隧穿谱,得到了支持霍金辐射的有力证据,并在纠缠熵的分析结果中发现了类似于page曲线的信号。由于霍金辐射严格的满足黑体谱,而黑体辐射属于热辐射是不携带任何信息的,因而进入黑洞事件视界的任何物质不可能再将信息发出来,而随着黑洞的蒸发,信息将完全丢失从而导致信息不守恒的问题。对这个问题物理学者有着不同的争议,其中比较受关注的一种解释便是page曲线的猜想:该猜想表明,如果黑洞的演化过程是么正的(即信息守恒),那么信息可能被夹藏在霍金粒子对的纠缠之中,随着出射粒子数大于一半的时候将快速流出,因而纠缠熵的曲线将会先增加然后降低至零。2023年Deger等人用类似的方法构造二维BTZ黑洞来验证反德西特(AdS)黑洞的纠缠熵与低维共形场理论(CFTs)之间的对偶性^[25]。这些研究表明,引力系统的模拟不仅可以帮助我们对弯曲时空量子场论提供实验支撑依据,同样可以帮助对其他理论研究的理解和深入。

相对论与量子力学的结合之路充满挑战,但也取得了显著成果。量子场论不仅解决了诸多实验偏差和理论融合不自洽的问题,还在推展至弯曲时空的过程中预测了一系列引人注目的新效应。然而,这些量子效应极为微弱,以当前的实验精度和技术水平,直接验证这些效应仍然面临巨大困难。引力系统的模拟平台在这条探索之路上发挥了重要作用,为相关理论提供了宝贵的间接证据。尽管引力模拟系统无法完全再现真实引力系统的所有特性,但它通过具体的量子系统验证了模型的自洽性和可靠性,并展示了原有引力系统的某些独特性质。

五、总结和展望

本文简要介绍了量子场论的基本概念以及将其应用在弯曲时空下所预测的特殊效应,并通过介绍一些引力模拟系统的基本原理及发展,展示了该领域如何在实验上给弯曲时空量子场论一些独特的理解和间接性支撑。这些模拟平台不仅为研究弯曲时空量子场论提供了新的实验手段,也为其他

前沿理论的理解和探索开辟了新途径。引力模拟系统已经在多个方面取得了显著进展。随着技术的不断进步,引力模拟系统将变得更加复杂和精确,从而为人们理解宇宙基本理论提供更清晰的视角。未来的模拟平台可能会结合更多先进的技术,如量子人工智能和高精度测量设备,进一步提高实验的准确性和可靠性。这不仅有助于解决当前理论中存在的诸多难题,还有望揭示新的物理现象,推动科学向前迈进一大步。总之,引力模拟系统不仅是研究弯曲时空量子场论的重要工具,也是目前连接理论与实验的重要桥梁。

参考文献

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical review letters, 2016, 116(6): 061102.
- [2] Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole[J]. arXiv preprint arXiv:1906.11238, 2019.
- [3] Hawking S W. Black hole explosions?[J]. Nature, 1974, 248(5443): 30-31.
- [4] Unruh W G. Notes on black-hole evaporation[J]. Physical Review D, 1976, 14(4): 870-892.
- [5] Casimir H B G. On the attraction between two perfectly conducting plates[C]//Proc. Kon. Ned. Akad. Wet. 1948, 51: 793.
- [6] Unruh W G. Experimental black-hole evaporation?[J]. Physical Review Letters, 1981, 46(21): 1351.
- [7] Dirac P A M. The quantum theory of the electron[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1928, 117(778): 610-624.
- [8] Dirac P A M. Quantised singularities in the electromagnetic field [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1931, 133(821): 60-72.
- [9] Bekenstein J D. Black holes and entropy[J]. Physical Review D, 1973, 7(8): 2333.
- [10] Garay L J, Anglin J R, Cirac J I, et al. Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(22): 4643.
- [11] Schützhold R, Plunien G, Soff G. Dielectric black hole analogs [J]. Physical review letters, 2002, 88(6): 061101.

- [12] Schützhold R, Unruh W G. Gravity wave analogues of black holes [J]. Physical Review D, 2002, 66(4): 044019.
- [13] Rousseaux G, Mathis C, Maïssa P, et al. Observation of negative-frequency waves in a water tank: a classical analogue to the Hawking effect?[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(5): 053015.
- [14] Barceló C. Analogue black-hole horizons[J]. Nature Physics, 2019, 15(3): 210-213.
- [15] Steinhauer J. Observation of self-amplifying Hawking radiation in an analogue black-hole laser[J]. Nature Physics, 2014, 10(11): 864-869.
- [16] Steinhauer J. Observation of quantum Hawking radiation and its entanglement in an analogue black hole[J]. Nature Physics, 2016, 12(10): 959-965.
- [17] Torres T, Patrick S, Coutant A, et al. Rotational superradiant scattering in a vortex flow[J]. Nature Physics, 2017, 13(9): 833-836.
- [18] Sheng C, Liu H, Wang Y, et al. Trapping light by mimicking gravitational lensing[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 902-906.
- [19] Sheng C, Liu H, Chen H, et al. Definite photon deflections of topological defects in metasurfaces and symmetry-breaking phase transitions with material loss[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4271.
- [20] Švančara P, Smaniotto P, Solidoro L, et al. Rotating curved spacetime signatures from a giant quantum vortex[J]. Nature, 2024, 628(8006): 66-70.
- [21] Lähteenmäki P, Paraoanu G S, Hassel J, et al. Dynamical Casimir effect in a Josephson metamaterial[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(11): 4234-4238.
- [22] Sabin C. Quantum simulation of traversable wormhole spacetimes in a dc-SQUID array[J]. Physical Review D, 2016, 94(8): 081501.
- [23] Yang R Q, Liu H, Zhu S, et al. Simulating quantum field theory in curved spacetime with quantum many-body systems[J]. Physical Review Research, 2020, 2(2): 023107.
- [24] Shi Y H, Yang R Q, Xiang Z, et al. Quantum simulation of Hawking radiation and curved spacetime with a superconducting on-chip black hole[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 3263.
- [25] Deger A, Horner M D, Pachos J K. AdS/CFT correspondence with a three-dimensional black hole simulator[J]. Physical Review B, 2023, 108(15): 155124.

科苑快讯

科学家首次拍摄到催化作用

催化剂被用于制造从燃料、肥料到塑料、药品等一切东西,然而我们至今无法了解催化剂在原子水平上是如何起作用的。美国西北大学(Northwestern University)的一个研究组在这方面取得了重大突破,首次观察到原子水平上发生的催化作用。

化学反应就像一段从起始物料到最终产物的旅程。在此过程中,会有一些意想不到的分子短暂生成,然后突然转变成其他分子。这些“中间”分子不可预测、转瞬即逝,所以很难观察到。

传统的透射电子显微镜(transmission electron microscopy, TEM),其高能电子很容易破坏碳基结构,因此无法在反应过程中直接观察敏感催化剂或有机物质。西北大学的研究组将目光转向 SMART-EM,这是一种捕捉精细有机分子图像的新技术,它使用更低的电子剂量,最大限度地减少转移到样品上的能量和损伤。通过快速拍摄系列图像,可以生成动态过程的视频,因此被戏称为“电影化学”(cinematic chemistry)。

为了利用 SMART-EM 首次观察催化反应,研究组

选择了一个简单的化学反应:从酒精分子中去除氢原子。他们设计了一种具有单一位点的多相催化剂,假设酒精直接进入催化剂,在那里变成氢气和醛(一种酒精分子氧化是形成的分子)。

使用 SMART-EM 时,研究人员发现反应过程完全出人意料。醛没有飘走,而是粘在催化剂上,而且醛还连接在一起形成短链聚合物,这个以前未知的步骤似乎驱动了整个反应。此外,乙醛还与酒精反应生成半缩醛(hemiacetal),这种中间分子随后转化为其他产物。为了证实这些发现,研究组使用了各种显微镜技术、X 射线分析、理论模型和计算机模拟,均与 SMART-EM 数据匹配。

研究人员说,SMART-EM 改变了他们看待化学的方式。他们希望能够分离这些中间产物,控制输入系统的能量,并研究有机催化转化的动力学。

(高凌云编译自 2025 年 4 月 11 日 SciTechDaily 网站)