

类比引力有关问题研究进展

余洪伟*, 胡佳伟

宁波大学理学院非线性科学中心, 宁波 315211

* 联系人, E-mail: yuhongwei2@nbu.edu.cn

2015-01-28 收稿, 2015-02-09 接受, 2015-08-19 网络版发表

国家自然科学基金(11435006)资助

摘要 尽管引力是人类最先认识的自然界基本相互作用力, 但人们对引力本质的认识还相当不够. 至今我们仍然没有一个完全自洽的量子引力理论. 近年来研究表明, 类比引力为我们深入理解引力的性质提供了一个新的窗口. 类比引力的研究一方面为Hawking辐射等弯曲时空量子效应的理论研究和实验验证提供了平台, 另一方面也加深了人们对类比系统本身的认识. 本文简要介绍类比引力的基本思想以及近年来理论和实验方面的进展, 并对未来的研究进行展望.

关键词

量子引力
黑洞物理
量子效应
类比引力
弯曲时空
量子场论

19世纪末20世纪初, 正当人们认为经典物理学大厦已经建成, 剩下的只是零碎的修补以使大厦变得更加完美时, 著名物理学家开尔文勋爵却敏锐地注意到晴朗的天空飘来了两朵乌云——以太是否存在的疑问和黑体辐射的紫外灾难. 意想不到的, 驱散这两朵乌云的努力直接催生了构成今天物理学大厦两大支柱的革命性理论——相对论和量子论. 尽管这两大理论取得了巨大的成功, 但它们同时也给我们留下了一个至今仍然悬而未决的难题, 即如何将二者相容地结合起来, 或者说引力能否量子化? 如何量子化? 这一问题已经成为物理学一个世纪以来最大的挑战.

尽管时至今日人们依然没有能够建立一个完全自洽的量子引力理论, 但庆幸的是, 人们在探索时空(引力)本质和引力量子化的征途上已经取得了许多重要的成果, 特别是预言了许多新奇独特的量子效应, 如加速探测器的Unruh效应^[1], 黑洞的Hawking辐射^[2,3]和变化引力场中粒子的产生^[4]等. 其中, 黑洞的Hawking辐射作为关联着量子理论、引力理论和热力学的“罗塞塔石碑(Rosetta Stone)”受到了最为广泛

的关注, 被认为是揭开量子引力之谜的关键. 然而, 黑洞本身又留给了我们许多有待解开的谜团, 如黑洞熵的微观起源, Hawking黑洞辐射推导中存在的“跨普朗克问题 (Trans-Planckian problem)”^[5~8]等. 另外, 实验上如何观测如黑洞Hawking辐射这些相对论和量子论结合所预言的独特量子效应也是物理学面临的一大挑战. 我们知道, 一个太阳质量大小的引力黑洞的Hawking温度约为 10^{-7} K, 比宇宙微波背景辐射温度2.73 K低了7个数量级, 因此直接利用天文观测手段探测引力黑洞的Hawking辐射是几乎不可能的. 表面上, 以现有的理论基础和实验技术, 解决这些问题似乎毫无指望. 然而, 近年来的研究表明, 类比引力体系无论是从理论上还是实验上都为解决这些问题提供了崭新的途径^[9].

类比思想是物理学研究中一种重要的思想方法. 本文介绍利用类比引力模型开展有关时空本质以及相关效应方面研究的最新进展. 首先, 介绍光线在引力场中的弯曲这一经典广义相对论效应在超材料中的模拟, 然后介绍黑洞的Hawking辐射等弯曲时空量子效应的类比引力模型以及相关理论问题的研究,

引用格式: 余洪伟, 胡佳伟. 类比引力有关问题研究进展. 科学通报, 2015, 60: 2697–2706

Yu H W, Hu J W. Recent progress on analog gravity and related issues (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2697–2706, doi: 10.1360/N972015-00105

最后是对未来研究的展望.

1 变换光学与光在引力场中的弯曲

爱因斯坦创立广义相对论之后提出了3个经典验证实验,其中之一就是预言了光线在引力场中传播时会发生弯曲.众所周知,光在折射率不均匀的介质中传播时也会发生弯曲.因此,从光线传播发生弯曲的角度来说,空间弯曲可以等效于介质折射率的变化.人们早在20世纪20年代就对这种等效现象进行了研究.1923年, Gordon^[10]指出运动的各向同性介质可以等效于某种时空几何,这是关于类比引力模型最早的研究. Gordon度规可以用

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + (1 - n^2)V_\mu V_\nu,$$

来表示,其中 $\eta_{\mu\nu}$ 为平直Minkowski时空度规, n 是电介质的折射率(与位置有关), V_μ 是电介质的四速度.后来, Tamm^[11]和Rytov^[12]推广了Gordon的研究.值得一提的是,在著名的Landau与Lifshitz^[13]合著的《经典场论》第十章中,有一道习题讨论“引力场中的Maxwell方程组”,在解答过程中特别指出了引力场与非均匀介质2种情形Maxwell方程组的类似性,体现了用电介质类比引力场的思想.事实上,任意引力场都可以用一个满足磁导率与介电常数成正比的电介质来模拟^[14].

Gordon等人的先驱性工作都是从纯理论的角度出发,而没有讨论其可能的应用.他们的工作经过人们进一步的发展形成了现在的变换光学(transformation optics)理论.2006年6月, *Science*杂志同时发表了Pendry等人^[15]以及Leonhardt^[16]关于控制电磁波传播并实现隐身的工作.变换光学的基本思想是利用假想的弯曲时空来等效平直时空的介质,具体可参见图1.对于图1中场线的弯曲可以有2种不同的解释:从拓扑角度可以认为场线的弯曲是由弯曲时空造成,而从材料角度则可以认为是由平直时空中非均匀介质材料造成.因此,利用弯曲时空和材料性质之间的等效性,就可以设计坐标变换求解得到材料的性质,使光的传播路线与预设的传播路线相同.

变换光学的理论提出之后,很快被用来设计具有各种新颖性质的超材料及器件,展现出广阔的应用前景.所谓超材料是指一类具有特殊性质的人工材料,其独特的性质并非源自特殊的组分,而是通过将材料制成远大于原子尺度的单元,将单元之间排

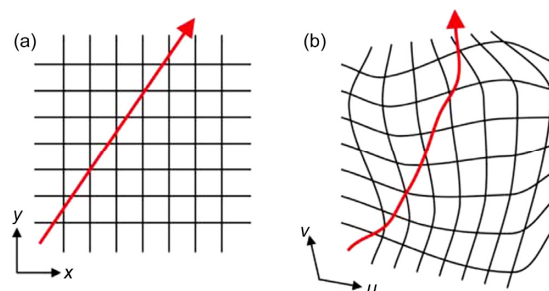


图1 (网络版彩色)变换光学原理示意图. (a) 自由空间直角坐标系的场线; (b) 扭曲背景坐标中扭曲的场线 (图片引自文献[15])

Figure 1 (Color online) An illustration of the theory of transformation optics. (a) A field line in free space with the background Cartesian coordinate; (b) the distorted field line with the background coordinates distorted in the same fashion (The figure is cited from ref. [15])

成特殊的结构来得到介电常数、磁导率、折射率等性质与原材料明显不同的新材料.因此,超材料的新特性来自于宏观结构,而不是微观单元的内在属性.早期对于超材料的研究主要是关于负折射率材料^[17].这种材料的一个最重要特征就是可以在一些波段实现其折射率为负^[17,18].对于负折射率材料,当光入射到其表面发生反射和折射时,入射光和折射光分布在表面垂线的同一边,而不是像正常材料那样分布在两边.这种特殊的性质使得我们能设计一些很有意思的器件,比如:隐形电磁斗篷^[15]、理想透镜^[18]等.由于负折射率材料的出现,人们可以操控光使其在材料中沿任意路线行走.

利用变换光学理论,人们可以随意地根据预设的光线传播路径来设计材料的性质.将弯曲时空背景下的电磁场理论等价于介质中的电磁理论,就可以得到与引力场对应的介质的介电常数和磁导率在空间的分布,从而可以实现在实验室模拟许多引力现象. Genov等人^[19]模拟了天体在引力场中的运动,如:轨道运动、奇异吸引子和混沌运动等. Narimanova和Kildishev^[20]模拟了光学黑洞.然而,文献[19,20]提出的光学黑洞模型只是具有某种吸收汇聚光的作用,而其等效度规并非爱因斯坦场方程的解. Chen等人^[21]模拟了Schwarzschild黑洞外部的光子运动. Grennleaf等人^[22]设计了一个电磁虫洞.以上工作^[19~22]都是基于数值计算模拟.2009年10月,崔铁军课题组^[23]利用超材料在实验室制成了微波频段的光学黑洞,实现了文献[20]的理论方案.他们的“微波黑洞”能够捕获来自各个方向的电磁波,在微波频段对电磁波的吸收率可达到99%以上.之后,文

献[24,25]也报道了类似装置在实验室中的实现. 2013年, 祝世宁课题组^[26]在光子芯片上实现了折射率具有类似中心引力场分布的光学微腔, 实现了对可见光的操控. Naify等人^[27]利用超材料制成了在水中汇集声波的装置, 实现了柱形二维“声学黑洞”.

2 Unruh的声学黑洞模型与Hawking辐射

光线在引力场中的弯曲是一个经典的广义相对论效应, 其物理图像清晰, 而且早在1919年就已由爱丁顿率领的观测小组在天文观测中证实. 因此, 对于利用超材料构建光学黑洞模拟光线在引力场中弯曲方面的研究, 人们的兴趣更主要集中于利用广义相对论的方法来设计新型材料和器件并研究其性质. 真正为了从理论和实验方面研究弯曲时空量子效应而提出的类比引力模型是1981年Unruh^[28]提出的声学黑洞模型. 声学黑洞是引力黑洞的一个声学类比, 其基本物理思想是用流体中的声波来类比弯曲时空中的光波. 由于流体对声波的拖曳, 当流体的流速超过声速时, 声波将被困在超声区域, 从而形成一个“哑洞”. 在声学黑洞的“听界”上存在声子的Hawking辐射.

这里分别从几何声学和物理声学2个角度来介绍声学黑洞, 更加详细的论证可以参考文献[14,28]. 从几何声学的角度得到等效度规是非常容易的. 设 c 为声波相对流体的速度, $\vec{v}$ 为流体相对实验室坐标系

的流速, 则有

$$\|d\vec{x} - \vec{v} dt\| = c dt,$$

上式整理可得

$$-(c^2 - v^2)dt^2 - 2\vec{v} \cdot d\vec{x} dt + d\vec{x} \cdot d\vec{x} = 0.$$

求解 $d\vec{x}$ 关于 dt 的方程可以得到声锥的方程, 与之对应的一类Lorentz度规为

$$g_{\mu\nu} = \Omega^2 \begin{pmatrix} -(c^2 - v^2) & -v_j \\ -v_i & \delta_{ij} \end{pmatrix},$$

其中, Ω 为共形因子. 由几何声学我们不能确定 Ω 的具体形式.

接下来介绍从物理声学的角度推导等效度规. 考虑正压(流体内部任一点的密度只是压强的函数)无旋的理想流体. 对于理想流体, 有Euler方程(假设无外力)

$$\rho[\partial_t \vec{v} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}] = -\nabla p,$$

和连续性方程

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0.$$

为了计算的方便, 引入新的变量

$$h(\xi) = \int_0^{\xi} \frac{dp'}{\rho(p')}, \quad \xi = \ln \rho, \quad \vec{v} = \nabla \phi,$$

可以将Euler方程和连续性方程写成

$$\begin{aligned} \partial_i \phi + \frac{1}{2} \vec{v} \cdot \vec{v} + h(\xi) &= 0, \\ \partial_i \xi + \vec{v} \cdot \nabla \xi + \nabla \cdot \vec{v} &= 0. \end{aligned}$$

利用微扰法保留到一阶项, 经过整理, 发现速度势的扰动 ϕ_1 满足方程

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_\mu (\sqrt{-g} g^{\mu\nu} \partial_\nu \phi_1) = 0,$$

其中

$$g^{\mu\nu} = \frac{1}{\rho_0 c} \begin{pmatrix} -1 & -v_0^j \\ -v_0^i & (c^2 \delta^{ij} - v_0^i v_0^j) \end{pmatrix}.$$

这里下标0和1分别代表微扰展开的零阶项和一阶项. 这个波动方程描述了速度势一阶微扰项 ϕ_1 的传播. 该方程与3+1维Lorentz时空中传播的无质量最小耦合标量场的波动方程在形式上是一致的, 这就意味着弯曲时空中的标量场可以用理想流体中的声波来模拟. 这里的等效度规取决于流体的密度、流速和声速. 有了等效度规, 利用广义相对论的标准方法可以得到声学黑洞“听界”处的表面引力

$$g_H = \left. \frac{1}{2} \frac{\partial(c^2 - v^2)}{\partial n} \right|_H,$$

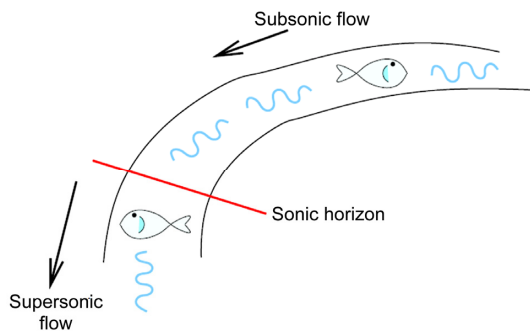


图2 (网络版彩色)Unruh 的声学黑洞示意图. 对于上游亚声速区域的鱼来说, 流速等于声速的位置构成一条“听界”, 它们无法听到“听界”下游超声速区域同伴发出的声音, 因此声学黑洞也称“哑洞”(图片引自文献[29])

Figure 2 (Color online) Unruh's proposal of a sonic black hole. The fish in the subsonic flow region cannot hear the screams of those in the supersonic region because the sound travels too slowly to propagate upstream. There is a sonic horizon at the position where the fluid velocity becomes supersonic. Therefore, a sonic black hole is also referred to as a “dumb hole” (The figure is cited from ref. [29])

进而得到声子Hawking辐射的温度

$$T_H = \frac{\hbar g_H}{2\pi k_B c_H},$$

其中, c_H 为黑洞“视界”处的声速.

Unruh的声学黑洞模型为我们在实验室中观测黑洞Hawking辐射等弯曲时空量子效应提供了一个类比引力系统的范例^[14,28-32]. 人们提出了利用Bose-Einstein凝聚体(BEC)^[33,34], ^3He 超流体^[35], 简并Fermi气体^[36], 离子环^[37]等不同的实验体系来实现Unruh声学黑洞模型的方案. 但是由于技术的限制, 在实验中制备稳定的超声速流体并不容易, 声学黑洞在很长一段时间并没有被实现. 2009年, 以色列理工学院的Steinhauer及其合作者^[38]首次得到了稳定的超声速BEC流体, 利用实验数据计算了声学黑洞的等效表面引力, 间接地得到了一个数量级为 ~ 0.1 nK的Hawking温度. 这是类比引力实验技术上的一项重要进展. 最近, 他们在这一工作的基础上, 直接观测到了由BEC构建的类比黑洞的声子Hawking辐射, 探测了其密度-密度关联, 并观测到了内外视界之间驻波的指数增长^[39], 证实了Corley和Jacobson^[7]在1999年的理论工作. 事实上, 利用BEC体系来构建类比引力系统有很多优势, 比如: BEC中的声速很低, 约为cm/s的数量级; 具有极低的温度, 能最大限度地抑制环境噪音的干扰; 在实验室中相对容易构建和操控等. 因此, BEC体系一直是类比引力研究中的一个热点. 除了用来实现Unruh的声学黑洞模型, 人们还利用BEC体系构建类比引力模型进行关于de Sitter时空^[40]、FRW宇宙^[41]、宇宙学常数^[42]、暴胀宇宙^[43]、量子涨落对经典时空背景的反作用^[44]以及Unruh效应^[45]等问题的研究.

上面提到的工作都是基于量子流体的模拟. Schützhold和Unruh^[46]指出, 诸如水槽中的浅水波这样的经典表面波也能够展现Hawking辐射的某些特征. 用浅水波来进行类比引力实验的主要优点在于其传播速度由水深决定故便于调节, 水的流速可以很容易地由机械泵控制, 而且其物理机制清楚, 实验技术成熟^[47]. 2008年, Rousseaux等人^[48]在水槽中观测到了类比视界处正频波模向负频波模的转变. 2010年, Weinfurter等人^[49]证实了逆流而上的长波(浅水波)在等效视界处会转变为一对短波(深水波), 从而类比为白洞的受激辐射.

上述实验方案都是基于在实验室中实现稳定流

体. 然而, 由于电磁波在不同折射率介质中的传播速度不同, 可以通过调节介质的介电性质使得电磁信号在传播过程中发生从亚速到超速的转变来构建等效视界面, 而不需要让介质在空间流动. 2008年, Philbin等人^[50]用光纤模拟了白洞视界, 观测到了视界附近光的蓝移. 他们首先向光纤中发射背景光脉冲. 由于Kerr效应, 光纤的折射率会随着光强而改变. 因此, 这束背景光脉冲能够改变光在光纤中的传播速度. 随后, 一束波长更长, 群速度更快的探测光脉冲被打入光纤. 当第2束光赶上第1束的时候, 它的速度会逐渐变慢直至与初始背景脉冲相同. 也就是说, 第2束探测光永远不能超越第1束背景光, 这就是所谓的类比白洞. 利用超短激光脉冲, Belgiorno等人^[51]报道称在实验中观测到了Hawking辐射. 尽管非常吸引人, 但是这个实验并没有测量光子对之间的关联, 因此这些检测到的光子的产生机制是否为Hawking辐射引发了物理学界的一些争论^[52-55]. 相关的理论工作也一直在进行. 最早的理论工作是从类比引力的角度出发^[54-57]. 最近, Finazzi和Carusotto^[58-60]提出从光在非线性介质传播的微观量子光学模型出发, Belgiorno等人^[61,62]提出从Hopfield电介质模型和量子隧穿模型出发来研究类比介质黑洞的Hawking辐射, 以期对其物理机制有更清晰的认识.

类比引力实验方面进展也吸引了很多理论工作者将引力黑洞性质方面的研究工作推广到类比黑洞的研究当中. 类比黑洞存在Hawking辐射表明黑洞的Hawking辐射现象是一个运动学效应, 而不是一个动力学效应^[63,64]. 引力黑洞除了具有Hawking辐射外, 还具有一个正比于其视界面积的熵. 另一方面, 黑洞的熵也可以解释为纠缠熵, 即量子场在黑洞视界内外的关联. 文献[65~68]等计算了一些类比黑洞的纠缠熵. 黑洞的稳定性也是黑洞物理中人们感兴趣的一个问题. 也就是说, 如果给黑洞外加一个微小的扰动, 看其是否还能回到平衡态保持稳定. 黑洞的微扰理论表明微扰场在时空中的演化大致可以分为3个阶段^[69], 即初始的爆发阶段、似正规阶段以及最后的幂率拖尾阶段. Berti等人^[70]详细讨论了旋转2+1维声学黑洞以及非旋转3+1维正则声学黑洞的似正规阶段和幂率拖尾. 他们的工作得到了一些推广^[71-75]. 最近, Daghighi和Green^[76]提出通过对声学黑洞似正规阶段的研究来探测构建声学黑洞流体的微观结构. 时空曲率对场模的作用类似于一个有效势, 由此可以定义

灰度因子来描述时空曲率对场模的反散射。最近, Anderson等人^[77]研究了一维BEC声学黑洞的灰度因子, 发现灰度因子在低频极限下并不趋于零, 这说明在类比Hawking辐射中占主导地位的是低能声子, 这与Schwarzschild黑洞的情形截然不同。

3 超导量子电路与真空涨落的探测

近年来, 由于固态量子计算发展的迫切需求, 利用超导量子电路实现人工原子的研究在理论和实验上均取得了突破性的进展^[78-82]。与自然原子不同, 这种人工原子的性质可以在一定范围内人为设计和操控, 并且呈现出某些自然原子所不具备的新的特性。超导量子电路不仅能应用于固态量子计算器件的制备, 它对于研究基本量子理论, 探测量子场的真空涨落也具有十分重要的意义^[83]。目前已经有实验开始研究人工原子的基本量子性质, 比如Fragner等人^[84]最近报道的关于测量人工原子的Lamb移动的工作。

最早提出利用线路模型来模拟黑洞的Hawking辐射的是Schützhold和Unruh^[85]。他们采用的具体模型是利用外加激光束来改变一维电磁波导的电容, 从而改变波导中的光速, 形成等效视界面。取实验可行的参数取值, 估算出这个类比体系的Hawking温度为10~100 mK。这一方案有一个明显的缺陷, 即除非波导采用超导材料制成, 否则由耗散造成的热效应会对Hawking辐射的探测带来干扰。Nation等人^[86]基于和文献[85]同样的思想, 提出了利用超导量子电路的实现方案。这个方案能得到约为120 mK的Hawking温度, 并且可以通过同时符合测量(coincidence measurement)来检测光子之间的关联, 从而确认其产生机制是否为Hawking辐射。

尽管文献[85,86]的模型能够得到较高的Hawking温度, 而且操控相对容易, 但是至今依然没有在实验室实现。其中一个重要的原因就是在这个方案需要用外加电磁波来调制电磁波导或超导量子电路的性质, 因此会产生大量的噪声, 而将Hawking辐射产生的光子与这些噪声区分开来在实验上是一个很大的挑战。值得指出的是, 与黑洞Hawking效应紧密相关的一个量子效应——动态Casimir效应^[87], 已经在超导量子电路中得到验证^[88,89]。从量子的观点看, 真空中充满了不断产生湮灭的虚光子对。一个理想的全反射平面上没有平行电场和垂直磁场, 但它周围却充满了涨落的电磁场。当这个平面快速运动

时, 空间中涨落的电磁场就会发生变化, 从而产生光子, 也就是说, 加速运动的镜面会发出辐射。研究表明, 这种运动镜面发出的辐射本质上和黑洞的Hawking辐射是一致的^[90,91]。由于空间镜面的存在改变了真空涨落, 从而导致Casimir效应, 因此, 运动镜面就会产生所谓的动态Casimir效应。很显然, 研究动态Casimir效应对我们理解黑洞的Hawking辐射将会很有帮助。动态Casimir效应理论上被预测之后很长一段时间都没能被实验验证, 其中最重要的原因就是实验中人们很难快速地改变反射边界的运动状态。1989年, Yablonovitch^[92]提出利用折射率随时间快速变化的非线性光学介质作为反射边界, 通过改变等效电距离来达到移动边界的效果, 从而实现动态Casimir效应的观测。超导量子电路的验证实验^[88,89]正是利用这一思想。有趣的是, Jaskula等人^[93]利用BEC体系也观测到了类比动态Casimir效应。

以往利用类比引力系统研究时空(引力)本质的工作大多是构建与引力的某些经典性质相同的类比体系, 例如变换光学中的光线传播, 声学黑洞中的声“听界”等。最近, 我们提出了利用类比系统来实现引力场中量子效应的思路, 即利用由超材料构成的稳态非热平衡环境中的人工原子来模拟Schwarzschild黑洞外部基本量子系统(两能级原子)的动力学演化^[94]。我们发现, 一个辐射Schwarzschild黑洞外部固定位置处基本量子系统的动力学演化行为与一个稳态非热平衡电磁介质环境中的量子系统的行为类似^[95]。这就提示我们, 如果能够设计一种合适的人工超材料, 这种材料对电磁场模的散射行为刚好与黑洞对场模的散射行为一致, 那么与Schwarzschild黑洞外部涨落的电磁场耦合的基本量子系统的动力学演化行为, 就可以由实验室构建的电磁系统中的一个人工原子的行为来模拟。对于两能级原子, 得到了一个与其能级差有关的热化温度^[94]。由于人工原子的参数可以通过器件参数来方便地调节, 因此原则上可以利用由超导Josephson结量子电路实现的人工两能级原子来验证这一结论。把这种用来模拟基本量子系统在弯曲时空背景(引力场中)演化的类比体系称之为“量子类比引力系统”。

4 超材料与宇宙演化

提起超材料, 人们可能首先想到的是隐身斗篷。前文也已经介绍了利用超材料类比光线在引力场中

的传播.事实上,超材料的应用远远不仅局限于此.近年来,人们在利用超材料类比研究宇宙演化的方面也取得了令人瞩目的进展.

2010年, Li等人^[96,97]计算了de Sitter时空中电磁场的Casimir能量,发现其正比于视界的尺度,与全息暗能量具有相同的形式,并提出了在实验室中利用超材料模拟de Sitter时空的方案.根据某些宇宙学理论,宇宙的早期可能并不具有像现在这样三维空间一维时间的结构. Smolyaninov和Narimanov^[98]提出利用超材料可以模拟时空结构的改变.他们研究发现,和晶体中的双折射现象一样,在各向异性的超材料中,电磁场可以分解成正常部分和奇特部分之和^[99].正常部分电磁场的 E 矢量垂直于光轴,而奇特部分 E 矢量平行于波矢与光轴组成的平面.如果超材料在某个方向上的介电常数为负,则电磁场方程中奇特波函数对该方向的二阶导数项的系数为负,而在其他方向上保持系数为正的性质不变.这样,介电常数为负的方向可以看作是一个等效的时间方向.因此,奇特电磁波可以看作是一个无质量标量场在一个2维时间和2维空间中的传播,也可看作是一个有质量场(质量来自原场方程中对时间的导数项)在一个(1+2)维时空中的传播.这种特性导致许多有趣的现象,例如:如果在实验中设计一种材料在某个表面介电常数发生正负的突变,相变自然发生.实验发现在相变点出现大量的光子辐射.若介电常数是从小于零到大于零的突变,可以利用超材料来模拟所谓时间的“终结”^[100];若是从大于零到小于零突变,则可以模拟时间的起点^[101].研究还表明如介电常数不是在传播方向而是在垂直方向发生突变,则突变表面类似于Rindler视界,并可估计Rindler视界Unruh温度的大小^[99].此外,利用超材料还可以模拟宇宙大爆炸的产生^[100]、宇宙暴涨^[101]、宇宙大尺度结构的形成^[102]以及验证引力的AdS/CFT全息对偶性^[103]等.

5 展望

从1981年Unruh^[28]的论文“Experimental black hole evaporation”发表算起,类比引力的研究至今已有30多年的历史.近年来,随着量子光学,凝聚态物理等实验手段的不断发展,类比引力的研究已经逐步从理论模型走向实验实现,尽管目前已经取得了一些重要成果,但是仍然有很多问题值得深入研究.

自从Pendry等人^[15]和Leonhardt^[16]的工作发表以

来,变换光学与超材料领域的发展可谓日新月异.人们已经把变换光学的研究对象从早期的光波和声波,推广到了物质波^[104]、地震波^[105]、以及热流^[106-108]等方面的研究.最近,马云贵课题组^[109]在实验室中实现了能够同时操控热流和电流的多功能超材料.前文提到目前实验上已经成功实现了人造光学黑洞对微波和可见光频段电磁波的捕获^[23-26],而这只是模拟了黑洞一个方面的性质.如果能够利用多功能超材料同时模拟黑洞几个方面的性质,比如光学和热力学性质,将是一件非常有趣的工作.此外,我们也期待在实验中能够利用超材料、BEC、以及超导量子电路等体系模拟更多弯曲时空的经典与量子效应,比如宇宙早期的暴胀,变化引力场中的粒子产生, de Sitter时空中的Gibbons-Hawking效应等.在类比引力实验中,为了证实所探测到的声子或光子辐射的产生机制为类比引力场中的量子效应而非其他噪声,需要探测辐射的密度-密度关联.因此,在理论上就目前已提出的一些类比引力模型详细地计算辐射的密度-密度关联函数,找出其共有特性,可以为实验检验弯曲时空量子效应提供理论指导.

我们最近的初步研究指出了对于Schwarzschild黑洞外部基本量子系统存在量子类比引力系统的可能性^[94],但还未能像变换光学理论那样给出倒推设计此类系统的具体程式.我们期望能够得到一套设计此类系统的完整的方法,从而具体给出系统几何形状和介电性质,为实验验证提供具体的实现方案.此外,最近的研究表明^[110]:非热平衡环境下原子与边界之间的Casimir-Polder力会呈现出全新的热平衡环境下所没有的性质,即远区的Casimir-Polder力与温度的平方成正比,与离边界的距离3次方成反比,而不是平衡时的1次方和4次方,这就使得热Casimir-Polder力的实验检验成为可能^[111].最近我们将Dalibard, Dupont-Roc和Cohen-Tannoudji发展的处理热平衡环境中不同原子量子态动力学演化的方法^[112,113]推广到非热平衡的情况,研究了处于不同量子态原子的Casimir-Polder力^[114].另一方面,向外辐射的黑洞和环境即是一个非热平衡系统,因此研究黑洞外部原子的Casimir-Polder力会展现何种特性(初步研究见文献[115,116]),以及是否可以用由超材料构成的类比电磁介质系统来模拟这种特性也是一个有趣的问题.

对于流体而言,在大尺度可以将其看作连续介

质,而在小尺度则必须将其看作一个个离散的原子分子等结构单元.如果研究声波在流体中的传播,只需要考虑连续介质的集体振动模式;而如果研究对象是光,则需要考虑流体的结构单元如原子对光子的吸收与辐射.同样,广义相对论也可以看作是某种更基本理论在低能下的近似理论.有理由相信,类比引力的研究并不仅仅局限于为目前已有的理论提供实验检验,它也将为最终解决引力的量子化问题提

供重要的启示.

总之,类比引力系统为我们提供了一个有趣的平台.期待利用类比系统提出检验如黑洞Hawking辐射等引力论与量子论结合所导致的独特物理效应的可能方案,通过对类比系统的研究来探讨与时空本质相关的量子效应,揭示时空的本质,为深入理解广义相对论与量子论,乃至为引力的量子化提供具有重要参考价值的结果.

参考文献

- Unruh W G. Notes on black hole evaporation. *Phys Rev D*, 1976, 14: 870–892
- Hawking S W. Black hole explosions? *Nature*, 1974, 248: 30–31
- Hawking S W. Particle creation by black holes. *Commun Math Phys*, 1975, 43: 199–220
- Parker L. Particle creation in expanding universes. *Phys Rev Lett*, 1968, 21: 562–564
- Unruh W G. Sonic analogue of black holes and the effects of high frequencies on black hole evaporation. *Phys Rev D*, 1995, 51: 2827–2838
- Jacobson T. On the origin of the outgoing black hole modes. *Phys Rev D*, 1996, 53: 7082–7088
- Corley S, Jacobson T. Black hole lasers. *Phys Rev D*, 1999, 59: 124011
- Visser M. Essential and inessential features of Hawking radiation. *Int J Mod Phys D*, 2003, 12: 649–661
- Unruh W G. Has Hawking radiation been measured? *Found Phys*, 2014, 44: 532–545
- Gordon W. Zur Lichtfortpflanzung nach der relativitätstheorie. *Ann Phys (Leipzig)*, 1923, 72: 421–456
- Tamm Y. The electrodynamics of anisotropic media in the special theory of relativity. *J Russ Phys-Chem Soc*, 1924, 56: 248
- Rytov S M. On transition from wave to geometrical optics. *Compt Rend (Doklady) Acad Sci URSS*, 1938, 18: 263
- Landau L D, Lifshitz E M. *The Classical Theory of Fields*. Oxford: Pergamon Press, 1971
- Barcelo C, Liberati S, Visser M. Analogue gravity. *Living Rev Relativ*, 2011, 14: 3
- Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 2006, 312: 1780–1782
- Leonhardt U. Optical conformal mapping. *Science*, 2006, 312: 1777–1780
- Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, 292: 77–79
- Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3966–3969
- Genov D A, Zhang S, Zhang X. Mimicking celestial mechanics in metamaterials. *Nat Phys*, 2009, 5: 687–692
- Narimanov E E, Kildishev A V. Optical black hole: Broadband omnidirectional light absorber. *App Phys Lett*, 2009, 95: 041106
- Chen H, Miao R X, Li M. Transformation optics that mimics the system outside a Schwarzschild black hole. *Opt Express*, 2010, 18: 15183–15188
- Grennleaf A, Kurylev Y, Lassas M, et al. Electromagnetic wormholes and virtual magnetic monopoles from metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 183901
- Cheng Q, Cui T J, Jiang W X, et al. An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials. *New J Phys*, 2010, 12: 063006
- Zhou J, Cai X B, Chang Z, et al. Experimental study on a broadband omnidirectional electromagnetic absorber. *J Opt*, 2011, 13: 085103
- Yang Y R, Leng L Y, Wang N, et al. Electromagnetic field attractor made of gradient index metamaterials. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29: 473–475
- Sheng C, Liu H, Wang Y, et al. Trapping light by mimicking gravitational lensing. *Nat Photon*, 2013, 7: 902–906
- Naify C J, Martin T P, Layman C N, et al. Underwater acoustic omnidirectional absorber. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 073505
- Unruh W G. Experimental black-hole evaporation. *Phys Rev Lett*, 1981, 46: 1351–1353
- Vachaspati T. Cosmic problems for condensed matter experiment. *J Low Temp Phys*, 2004, 136: 361–377
- Novello M, Visser M, Volovik G. *Artificial Black Holes*. Singapore: World Scientific, 2002
- Schutzhold R, Unruh W G. *Quantum Analogues: From Phase Transitions to Black Holes and Cosmology*. Berlin: Springer, 2007
- Robertson S J. The theory of Hawking radiation in laboratory analogues. *J Phys B*, 2012, 45: 163001
- Garay L J, Anglin J R, Cirac J I, et al. Sonic analog of gravitational black holes in bose-einstein condensates. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 4643–4647

- 34 Garay L J, Anglin J R, Cirac J I, et al. Sonic black holes in dilute Bose-Einstein condensates. *Phys Rev A*, 2011, 63: 023611
- 35 Jacobson T A, Volovik G E. Event horizons and ergoregions in ^3He . *Phys Rev D*, 1998, 58: 064021
- 36 Giovanazzi S. Hawking radiation in sonic black holes. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 061302
- 37 Horstmann B, Reznik B, Fagnocchi S, et al. Hawking radiation from an acoustic black hole on an ion ring. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 250403
- 38 Lahav O, Itah A, Blumkin A, et al. Realization of a sonic black hole analog in a bose-einstein condensate. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 240401
- 39 Steinhauer J. Observation of self-amplifying Hawking radiation in an analogue black-hole laser. *Nature Phys*, 2014, 10: 864–869
- 40 Fedichev P O, Fischer U R. Gibbons-hawking effect in the sonic de sitter space-time of an expanding bose-einstein-condensed gas. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 240407 (Erratum: *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 049901)
- 41 Jain P, Weinfurter S, Visser M, et al. Analog model of a Friedmann-Robertson-Walker universe in Bose-Einstein condensates: Application of the classical field method. *Phys Rev A*, 2007, 76: 033616
- 42 Finazzi S, Liberati S, Sindoni L. Cosmological constant: a lesson from bose-einstein condensates. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 071101
- 43 Fischer U R, Schützhold R. Quantum simulation of cosmic inflation in two-component Bose-Einstein condensates. *Phys Rev A*, 2004, 70: 063615
- 44 Schützhold R, Uhlmann M, Xu Y, et al. Quantum backreaction in dilute Bose-Einstein condensates. *Phys Rev D*, 2005, 72: 105005
- 45 Retzker A, Cirac J I, Plenio M B, et al. Methods for detecting acceleration radiation in a bose-einstein condensate. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 110402
- 46 Schützhold R, Unruh W G. Gravity wave analogues of black holes. *Phys Rev D*, 2002, 66: 044019
- 47 Visser M. Survey of analogue spacetimes. *Lecture Notes Phys*, 2013, 870: 31–50
- 48 Rousseaux G, Mathis C, Maissa P, et al. Observation of negative-frequency waves in a water tank: A classical analogue to the Hawking effect? *New J Phys*, 2008, 10: 053015
- 49 Weinfurter S, Tedford E W, Penrice M C J, et al. Measurement of stimulated hawking emission in an analogue system. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 021302
- 50 Philbin T G, Kuklewicz C, Robertson S, et al. Fiber-optical analogue of the event horizon. *Science*, 2008, 319: 1367–1370
- 51 Belgiorno F, Cacciatori S L, Clerici M, et al. Hawking radiation from ultrashort laser pulse filaments. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 203901
- 52 Schützhold R, Unruh W G. Comment on “Hawking Radiation from Ultrashort Laser Pulse Filaments”. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 149401
- 53 Belgiorno F, Cacciatori S L, Clerici M, et al. Belgiorno et al. reply. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 149402
- 54 Liberati S, Prain A, Visser M. Quantum vacuum radiation in optical glass. *Phys Rev D*, 2012, 85: 084014
- 55 Unruh W G, Schützhold R. Hawking radiation from “phase horizons” in laser filaments? *Phys Rev D*, 2012, 86: 064006
- 56 Belgiorno F, Cacciatori S L, Ortenzi G, et al. Dielectric black holes induced by a refractive index perturbation and the Hawking effect. *Phys Rev D*, 2011, 83: 024015
- 57 Cacciatori S L, Belgiorno F, Gorini V, et al. Spacetime geometries and light trapping in travelling refractive index perturbations. *New J Phys*, 2010, 12: 095021
- 58 Finazzi S, Carusotto I. Kinematic study of the effect of dispersion in quantum vacuum emission from strong laser pulses. *Eur Phys J Plus*, 2012, 127: 78
- 59 Finazzi S, Carusotto I. Quantum vacuum emission in a nonlinear optical medium illuminated by a strong laser pulse. *Phys Rev A*, 2013, 87: 023803
- 60 Finazzi S, Carusotto I. Spontaneous quantum emission from analog white holes in a nonlinear optical medium. *Phys Rev A*, 2014, 89: 053807
- 61 Belgiorno F, Cacciatori S L, Piazza F D. The Hawking effect in dielectric media and the Hopfield model. *arXiv*: 1411.7870
- 62 Belgiorno F, Cacciatori S L, Piazza F D. Tunneling approach and thermality in dispersive models of analogue gravity. *arXiv*: 1411.7871
- 63 Visser M. Hawking radiation without black hole entropy. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 3436–3439
- 64 Barceló C, Liberati S, Sonogo S, et al. Hawking-like radiation does not require a trapped region. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 171301
- 65 Giovanazzi S. Entanglement entropy and mutual information production rates in acoustic black holes. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 011302
- 66 Rinaldi M. Entropy of an acoustic black hole in Bose-Einstein condensates. *Phys Rev D*, 2011, 84: 124009
- 67 Zhang L C, Li H F, Zhao R, et al. Entanglement entropy of acoustic black hole in Bose-Einstein Condensate. *Astrophys Space Sci*, 2013, 344: 451–454
- 68 Zhang L C, Li H F, Zhao R, et al. The entropy of a dielectric black hole. *Mod Phys Lett*, 2013, 28: 1350009
- 69 Konoplya R A, Zhidenko A. Quasinormal modes of black holes: From astrophysics to string theory. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 793–836
- 70 Berti E, Cardoso V, Lemos J P S. Quasinormal modes and classical wave propagation in analogue black holes. *Phys Rev D*, 2004, 70: 124006

- 71 Vitor Cardoso V, Lemos J P S, Yoshida S. Quasinormal modes and stability of the rotating acoustic black hole: Numerical analysis. *Phys Rev D*, 2004, 70: 124032
- 72 Nakano H, Kurita Y, Ogawa K, et al. Quasinormal ringing for acoustic black holes at low temperature. *Phys Rev D*, 2004, 71: 084006
- 73 Abdalla E, Konoplya R A, Zhidenko A. Perturbations of Schwarzschild black holes in laboratories. *Class Quantum Grav*, 2007, 24: 5901–5910
- 74 Barcelo C, Cano A, Garay L J, et al. Stability analysis of sonic horizons in Bose-Einstein condensates. *Phys Rev D*, 2006, 74: 024008
- 75 Barcelo C, Cano A, Garay L J, et al. Quasi-normal mode analysis in BEC acoustic black holes. *Phys Rev D*, 2007, 75: 084024
- 76 Daghigh R G, Green M. High overtone quasinormal modes of analog black holes and the small scale structure of the background fluid. *arXiv*: 1411.7066
- 77 Anderson P R, Balbinot R, Fabbri A, et al. Gray-body factor and infrared divergences in 1D BEC acoustic black holes. *Phys Rev D*, 2014, 90: 104044
- 78 Makhlin Y, Schön G, Shnirman A. Quantum-state engineering with Josephson-junction devices. *Rev Mod Phys*, 2001, 73: 357–400
- 79 You J Q, Nori F. Superconducting circuits and quantum information. *Phys Today*, 2005, 58: 42–47
- 80 Clarke J, Wilhelm F K. Superconducting quantum bits. *Nature*, 2008, 453: 1031–1042
- 81 Schoelkopf R J, Girvin S M. Wiring up quantum systems. *Nature*, 2008, 451: 664–669
- 82 You J Q, Nori F. Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits. *Nature*, 2011, 474: 589–597
- 83 Nation P D, Johansson J R, Blencowe M P, et al. Stimulating uncertainty: Amplifying the quantum vacuum with superconducting circuits. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 1–24
- 84 Fragner A, Goppl M, Fink J M, et al. Resolving vacuum fluctuations in an electrical circuit by measuring the lamb shift. *Science*, 2008, 322: 1357–1360
- 85 Schützhold R, Unruh W G. Hawking radiation in an electromagnetic waveguide? *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 031301
- 86 Nation P D, Blencowe M P, Rimberg A J, et al. Analogue hawking radiation in a dc-SQUID array transmission line. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 087004
- 87 Moore G. Quantum theory of the electromagnetic field in a variable-length one-dimensional cavity. *J Math Phys*, 1970, 11: 2679–2691
- 88 Wilson C M, Johansson G, Pourkabirian A, et al. Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit. *Nature*, 2011, 479: 376–379
- 89 Lahteenmaki P, Paraoanu G S, Hassel J, et al. Dynamical Casimir effect in a Josephson metamaterial. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 4234–4238
- 90 Fulling S A, Davies P C W. Radiation from a moving mirror in two dimensional space-time: conformal anomaly. *Proc R Soc London A*, 1976, 348: 393–414
- 91 Davies P C W, Fulling S A. Radiation from moving mirrors and from black holes. *Proc R Soc London A*, 1977, 356: 237–257
- 92 Yablonovitch E. Accelerating reference frame for electromagnetic waves in a rapidly growing plasma: Unruh-Davies-Fulling-DeWitt radiation and the nonadiabatic Casimir effect. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 1742–1745
- 93 Jaskula J C, Partridge G B, Bonneau M, et al. Acoustic analog to the dynamical casimir effect in a bose-einstein condensate. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 220401
- 94 Hu J, Zhou W, Yu H. Dynamics of an elementary quantum system outside a radiating Schwarzschild black hole. *Phys Rev D*, 2013, 88: 085035
- 95 Bellomo B, Messina R, Felbacq D, et al. Quantum systems in a stationary environment out of thermal equilibrium. *Phys Rev A*, 2013, 87: 012101
- 96 Li M, Miao R X, Pang Y. More studies on metamaterials mimicking de Sitter space. *Opt Express*, 2010, 18: 9026–9033
- 97 Li M, Miao R X, Pang Y. Casimir energy, holographic dark energy and electromagnetic metamaterial mimicking de Sitter. *Phys Lett B*, 2010, 689: 55–59
- 98 Smolyaninov I I, Narimanov E. Metric signature transitions in optical metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 067402
- 99 Smolyaninov I I, Hwang E, Narimanov E. Hyperbolic metamaterial interfaces: Hawking radiation from Rindler horizons and spacetime signature transitions. *Phys Rev B*, 2012, 85: 235122
- 100 Smolyaninov I I, Hung Y J. Modeling of time with metamaterials. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28: 1591–1595
- 101 Smolyaninov I I, Hung Y J, Hwang E. Experimental modeling of cosmological inflation with metamaterials. *Phys Lett A*, 2012, 376: 2575–2579
- 102 Smolyaninov I I, Kildishev A V. Light propagation through random hyperbolic media. *Opt Lett*, 2013, 38: 971–973
- 103 Smolyaninov I I. Holographic duality in nonlinear hyperbolic metamaterials. *J Opt*, 2014, 16: 075101
- 104 Zhang S, Genov D A, Sun C, et al. Cloaking of matter waves. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 123002

- 105 Brûlé S, Javelaud E H, Enoch S, et al. Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 133901
- 106 Guenneau S, Amra C, Veynante D. Transformation thermodynamics: Cloaking and concentrating heat flux. *Opt Expr*, 2012, 20: 8207–8218
- 107 Narayana S, Sato Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 214303
- 108 Schittny R, Kadic M, Guenneau S, et al. Experiments on transformation thermodynamics: Molding the flow of heat. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 195901
- 109 Ma Y, Liu Y, Raza M, et al. Experimental demonstration of a multiphysics cloak: Manipulating heat flux and electric current simultaneously. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 205501
- 110 Antezza M, Pitaevskii L P, Stringari S, et al. New asymptotic behavior of the surface-atom force out of thermal equilibrium. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 113202
- 111 Obrecht J M, Wild R J, Antezza M, et al. Measurement of the temperature dependence of the casimir-polder force. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 063201
- 112 Dalibard J, Dupont-Roc J, Cohen-Tannoudji C. Vacuum fluctuation and radiation reaction: Identification of their respective contributions. *J Phys*, 1982, 43: 1617–1638
- 113 Dalibard J, Dupont-Roc J, Cohen-Tannoudji C. Dynamics of a small system coupled to a reservoir: Reservoir fluctuations and self-reaction. *J Phys*, 1984, 45: 637–656
- 114 Zhou W, Yu H. Energy shift and Casimir-Polder force for an atom out of thermal equilibrium near a dielectric substrate. *Phys Rev A*, 2014, 90: 032501
- 115 Zhang J, Yu H. Casimir-Polder-like force on an atom outside a Schwarzschild black hole. *Phys Rev A*, 2011, 84: 042103
- 116 Zhang J, Yu H. Far-zone interatomic Casimir-Polder potential between two ground-state atoms outside a Schwarzschild black hole. *Phys Rev A*, 2013, 88: 064501

Recent progress on analog gravity and related issues

YU HongWei & HU JiaWei

Center for Nonlinear Science and Department of Physics, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Of the four kinds of fundamental interactions in nature, gravity is the first known to humankind, but at the same time, it seems to be the least understood. A self-consistent theory of quantum gravity is still elusive. Even though, the efforts to unify quantum theory and general relativity continue, and recent researches show that analog gravitational systems open up new possibilities for our understanding of the nature of gravity. The analog gravity provides us concrete non-gravitational physical systems to study the quantum effects in curved spacetime such as the Hawking radiation both theoretically and experimentally on the one hand, while on the other hand, the techniques dealing with issues in curved spacetime can also be applied to the analog systems themselves and shed light on them in return. In this paper, we review various analog models that capture different aspects of the behaviors of gravitational systems. First, we introduce the analog of the bending of light in curved spacetime with artificial metamaterials based on transformation optics, which is an analog of a classical general relativistic effect. We then review Unruh's sonic black hole model. When the speed of the background fluid is faster than the speed of sound in the fluid, one creates a sonic analog of a gravitational black hole. If the flow of an ideal fluid is irrotational, then the equation of motion describing the acoustic disturbance is identical to the d'Alembertian equation of a minimally coupled massless scalar field in a curved spacetime, which forms the foundation of the phonon Hawking radiation in analog systems. Unruh's sonic black hole model has become a paradigm for experimental verification of quantum effects in curved spacetime, and there have been, in recent years, many attempts to realize it in analogue systems such as the Bose-Einstein condensate, ion traps, optical fibers, and etc. Other related issues, such as the detection of modified vacuum fluctuations, which are intrinsically related to quantum effects in curved space, by means of superconducting circuit devices, and the metamaterial models of cosmological evolutions are also reviewed. Finally, we give an outlook for the future research.

quantum gravity, black hole physics, quantum effects, analog gravity, quantum field theory in curved spacetime

doi: 10.1360/N972015-00105