

# 中山大学本科生期末考试

课程：2019 级《天文学与空间科学前沿》

所选择的授课教师名字：孙佳睿

学生姓名：惠中懿

学号：17341065

班别：物天一班

邮箱：huizhy@mail2.sysu.edu.cn

## 从黑洞到类比引力

### 摘 要

类比引力的研究动机是探测霍金辐射。具体方法是通过类比引力创造出声学黑洞，再通过研究声学黑洞来探测霍金辐射。因此本文将先介绍黑洞及其性质，引出黑洞的霍金辐射。通过霍金辐射引出类比引力，最后简单地介绍一下衍生引力。

**关键词：**黑洞，霍金辐射，类比引力，衍生引力

## 1 黑洞

在第一章节中，我们将首先介绍黑洞的形成，以及黑洞的性质。再通过黑洞的熵来引出黑洞的辐射。

### 1.1 黑洞是如何形成的

我们先来简单地介绍一下黑洞是如何形成的。

首先，宇宙中大量的气体相互吸引，坍缩成恒星。当气体收缩时，其中的氢原子相互碰撞发生核聚变反应，发出大量光和热，这些热使得恒星停止收缩。当恒星耗尽了燃料，它开始变冷并收缩。此时恒星中有着引力的吸引和泡利不相容原理引起的排斥，如果排斥大于吸引，恒星就会继续收缩。最后，当恒星收缩到某一临界半径时，根据广义相对论，它表面上的引力场变得如此之强，以至于光线再也逃逸不出去，所有东西都会被引力场拉回去。

这样就存在一个时空区域，光任何东西都不可能从该区域逃逸而达到远处的观察者。这个区域称为黑洞，黑洞边界称为事件视界。根据事件视界的定义可知：事件视界和刚好不能从黑洞中逃逸的光线的路径重合。

## 1.2 黑洞无毛定理

在引力坍缩之后，一个黑洞必须最终演变成一种能够旋转，但是不能搏动的态。此外，黑洞的大小和形状只取决于他的质量和旋转速度，而与坍缩形成黑洞的原来物体的性质无关。这也被称为黑洞无毛定理。

黑洞无毛定理也意味着，有关坍缩物体的大量信息，在黑洞形成时损失了。

## 1.3 黑洞的熵

以下几个事实让我们将黑洞与熵联系起来。

1. 单个黑洞的事件视界的面积永远不会减小。

事件视界和刚好不能从黑洞中逃逸的光线的路径重合，因此这些光线的路径就永远不可能相互靠近。因为一旦光线相互靠近，它们就会相撞，也就不是“刚好不能逃逸的路径”，即不是事件视界了。因此事件视界的面积永远不会减小。

2. 只要将一些具有熵的物体抛进黑洞中，黑洞之外的物体的总熵就会减少。

这一点在1.2 黑洞无毛定理中已经说明。

3. 黑洞面积定理：只要物体落入黑洞，或两个黑洞合并，事件视界面积就会增加。

考虑到熵的不减性，熵和事件视界的面积非常相似。如果我们将事件视界的面积看成是黑洞熵的量度。由上两条事实可以知道：当物质落入黑洞中时，熵永远不会降低，即黑洞外物质的熵与事件视界的面积之和永远不会降低。这和热力学中的熵完全吻合。

另外，事件视界面积的重要性也暗示着全息理论的可能性。

## 1.4 黑洞的辐射

有熵的物体都会有温度，而有温度的物体一定会发出辐射。因此，如果我们承认黑洞有熵，那么黑洞也一定会发出辐射。可是黑洞的定义是不发出任何物体的东西，这就产生了矛盾。

黑洞到底是否会发出辐射？如果会发出辐射，辐射的机制又如何？如果不解决这些问题，那么黑洞的理论就不能自恰，不够完善。最终，霍金给了我们答案。

## 2 霍金辐射

想要完善黑洞的理论，就必须说明黑洞是否会辐射，以及为什么会辐射。这便是这一章节我们要做的事情。在介绍完霍金辐射之后，我们会用霍金辐射引出类比引力。

## 2.1 为什么会产生霍金辐射

霍金证明了，黑洞的确会发出辐射，只不过这辐射发生在紧靠着黑洞的事件视界的外面的“空虚的”空间上的。下面我们就来介绍一下。

根据不确定性原理，真空中场的值必须有一些起伏，人们可以将这些起伏理解为光或引力的粒子对，它们在某一时刻同时出现，相互离开，然后又相互靠近，并且相互湮灭。这种起伏称为量子涨落。如果量子涨落发生在黑洞的事件视界附近，在事件视界附近产生的粒子对会有以下四种可能的结果。

1. 正反粒子像通常一样直接湮灭。
2. 正反粒子一起落入黑洞。
3. 正粒子落入黑洞，反粒子跑出来。
4. 反粒子落入黑洞，正粒子跑出来。

根据霍金的计算，发生第 4 种结果的概率最大。正粒子从事件视界附近跑出来，被无穷远处的观测者接收到时，就变成了正能的实粒子；黑洞俘获了负能的反粒子，也就减少了它的能量（质量）。因此量子涨落的总结果是：黑洞向外发射正能粒子，黑洞本身的质量随之减少。

当我第一次学习霍金辐射时，我不禁感叹，这种想法实在是太美妙了。霍金辐射巧妙地将量子力学与黑洞理论结合，虽然黑洞的确幅射出来了粒子，但是它也的确没有违背黑洞的定义。

## 2.2 霍金辐射的意义

物理学家们一直在追求着万有理论，经过几个世纪的不懈努力，已经发展出了两种理论框架：广义相对论和量子场论。它们的总合，量子引力就是最接近想象中的万有理论。

黑洞是广义相对论的预言，而霍金辐射是考虑量子力学的结果。因此，霍金辐射在一定程度上将广义相对论和量子场论统一了起来，这是现代物理学通向万有理论的第一个里程碑。此外，由于霍金辐射是真空的量子涨落的直接后果，观测到霍金辐射就等于直接证明了真空涨落的存在，人类对自然的理解就前进了一大步。也正因此，物理学家们一直渴望探测到霍金辐射。

## 2.3 探测霍金辐射

霍金辐射具有如此重要的价值。可是，就好像上帝想要提醒我们“好事多磨”一样，探测霍金辐射却又如此困难。

霍金辐射的强弱与黑洞质量负相关，黑洞越大霍金辐射越低。一个太阳质量黑洞的霍金辐射强度远小于宇宙背景辐射的强度，而更大质量黑洞的霍金辐射更小。因此，想要在宇宙背景辐射中识别出来自黑洞的霍金辐射几乎不可能。

不过物理学家们从来不会因为困难停下脚步。既然真正的霍金辐射无法探测到，我们就只能在实验室来模拟霍金辐射了。来自以色列的 Jeff Steinhauer 的团队，巧妙地运用了类比的思想，在该

领域中取得了重大突破。

### 3 类比引力

为了探测到霍金辐射，物理学家们独辟蹊径，采用类比引力的方法。这一章节我们首先说明，霍金辐射是否只能在真正的黑洞发生。然后我们会简要地介绍一下类比引力在前沿科研中的进展。

#### 3.1 霍金辐射只能在黑洞附近产生吗

要回答这个问题，我们就必须明确为什么会发生霍金辐射，黑洞是霍金辐射的必要条件吗？在2.1中，我们已经有了答案。

只要在真空中发生量子涨落，产生粒子对，并且正反粒子可能会落入一片区域。当反粒子落入黑洞、正粒子跑出来的概率大，就会产生霍金辐射。而使粒子落入一片区域的方式不只有引力，还可以是流体中的流速等等。因此黑洞不是霍金辐射的必要条件。如果我们能构建出一个类似于漩涡的区域，让粒子一旦进去就无法逃脱，那么我们就观测到霍金辐射。

#### 3.2 声学黑洞

根据这个思想，物理学家们做出了一系列努力，也取得了很重要的突破。

1981 年，加拿大英属哥伦比亚大学物理教授 Unruh 发表论文，提出运动流体中的声波可以类比弯曲时空中的光子。这个“声音视界”在很多方面都类似黑洞对光的视界，而且描述这两种现象的数学几乎是一样的，只不过描述对象一个是声一个是光（或者其他量子场）。

2009 年，以色列物理学家 Jeff Steinhauer 和同事首次用玻色-爱因斯坦凝聚在实验室中创造出声学黑洞。玻色-爱因斯坦凝聚是玻色子原子在冷却到接近绝对零度所呈现出的一种气态的、超流性的物质状态。由于温度极低，玻色-爱因斯坦凝聚不会产生除了霍金辐射的其他声波。而且声音在超流体中的运动速度本身就很慢，这也是系统的一个优势。

2016 年，Jeff Steinhauer 在 Nature 中发表一篇论文，声称他从实验室一个由玻色-爱因斯坦凝聚态创造的声学黑洞中观察到了霍金辐射。他还看到了黑洞内部和外部、观测到粒子的纠缠。虽然以色列以色列威兹曼科学院教授 Ulf Leonhardt 在 arXiv 上发表论文质疑 Steinhauer 的结果，但是 Steinhauer 也逐一回应了质疑。

因此我们有理由相信，类比引力已经在霍金辐射中取得了重要的成果。

#### 3.3 类比引力的其他意义

研究霍金辐射只是类比引力领域研究的一部分，类比引力更大的目标是量子引力。由于引力非常微弱，直接探测到量子引力几乎不可能，而模拟引力就提供了探测量子引力的另一种途径。

除了探测量子引力之外，相关的理论研究也能从类比引力中得到启发，一个重要且有趣的例子是衍生引力。我们都知道，水可以用流体力学描述，但到了分子的层面，水分子会遵循完全不同的

物理。如果将时空与水进行类比，时空可以用广义相对论描述，假如时空有更微观的结构，那么时空微观结构也应该会遵循完全不同的物理。

### 3.4 衍生引力简介

衍生引力认为，时空是一个衍生的客体。时空只在大于普朗克尺度、低于普朗克能阶或普朗克温度的领域才呈现；只有在这个条件下广义相对论才适用。如果不满足这个条件，即小于普朗克尺度，用更高的能量、更高的分辨率取观察，时空的微观结构才开始显现。探寻时空微观结构的理论是量子引力研究的任务。如果时空是一个衍生的客体，那么它的大尺度结构应当能够由其底层的微观构成及其相互作用推知，而衍生引力的目的就是从小尺度的微观理论推演宏观的现象。

## 4 总结

本文首先介绍了黑洞是如何形成的，进而引出黑洞的熵。通过黑洞的熵引出霍金辐射。

然后介绍了霍金辐射，我们又说明了霍金辐射并非只能在黑洞附近产生，进而引出探测霍金辐射的方法——类比引力。

最后简单介绍了衍生引力这一收到类比引力启发的理论物理前沿方向。

以下是自己的一些感想。

很感谢前沿课给了我这次写论文的机会。由于写了这篇小论文，我对黑洞、霍金辐射、量子引力、类比引力、衍生引力等领域都产生了从无到有的了解。虽然这些是我一直梦寐以求想要了解的知识，但是之前却一直没有机会接触也不知道从何入手。如今终于了解了一点皮毛，我感到十分满足，这些理论的美妙远超出了我的想象。

我想要成为一名理论物理学家，但是目前我还在寻找感兴趣的研究方向。毫无疑问，我最想探索的领域是所谓的万有理论，也就是量子引力。而类比引力和量子引力是密切相关的。衍生引力也是一个深刻奇妙的领域，它触及了时空的本质。我想用一生来探索宇宙的奥秘，因此我很想钻研这些理论。

## 参考文献

- [1] 胡悲乐. 衍生引力/量子引力：宏观/微观时空理论 [J]. 现代物理知识, 2015
- [2] 霍金. 时间简史. 长沙：湖南科学技术出版社, 2007
- [3] 韩冬. 模拟引力：实验室中的终极理论之梦, 2016
- [4] 向守平. 天体物理概论. 合肥：中国科学技术大学出版社, 2008
- [5] 庄. 第一个声学黑洞：霍金的希望之声. 科学松鼠会, 2009