

引力波学习论文

****

论文题目：引力波学习论文

学生姓名：廖汉箫、李宗泽、张恺欣、胡俊熙

指导老师：李瑾、张学锋

重庆大学物理学院

2024年4月

**引力波学习论文**

**摘 要**

本文综述了引力波的理论基础、探测方法及其科学意义。首先，文章详细解释了引力波的产生机制及其在广义相对论中的预测，强调了引力波的基本特性如频率和振幅，并引入了相关的数学描述。接着，论述了当前主要的引力波探测方法，包括激光干涉仪（如LIGO和VIRGO）、脉冲星时间阵列（PTA）以及在建的空间基干涉仪（如LISA、天琴计划和太极计划）。此外，文章探讨了引力波探测的科学意义，尤其是在开启新的天文学时代、测试广义相对论的预言、以及探索早期宇宙方面的应用。最后，展望了引力波探测技术的未来发展，以及其在多信使天文学中的作用。

**关键词：**引力波；激光干涉仪；LIGO；太极计划；多信使天文学

# 1 引力波的理论基础

引力波是时空的波动，由于质量的加速运动而产生。爱因斯坦的广义相对论预言了引力波的存在，但直到2015年才由LIGO科学合作组织首次直接探测到。引力波可以由多种天体过程产生，例如双黑洞系统的合并、双中子星的合并、超新星爆炸等。

## 1.1引力波的产生

引力波的产生通常涉及到极端质量加速运动的天体事件。最常见的事件包括双星系统（尤其是黑洞或中子星）的轨道运动和合并。当这些天体沿着它们的轨道运行时，由于它们的加速运动，会在时空中产生涟漪，这些涟漪以光速传播开来。

## 1.2引力波的特性

引力波具有几个关键的物理特性，包括其频率和振幅。频率依赖于源的特性，例如，双星系统合并时发出的引力波频率与系统中两个物体的轨道频率相关。引力波的振幅则与源的质量、系统的对称性以及源距离观测点的远近有关。

## 1.3广义相对论与引力波的预言

## 1.3.1广义相对论的基本原理

爱因斯坦的广义相对论是现代物理学的基石之一，它将引力视为时空的几何性质而非牛顿力学中的力。在广义相对论中，重要的概念是时空的曲率，这种曲率由存在其中的物质和能量决定。广义相对论的场方程式（Einstein Field Equations）描述了物质如何影响时空的结构，从而产生引力效应。

## 1.3.2引力波的理论预言

1916年，爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波的存在。引力波是由时空的扰动造成的波动，这种扰动是由物质的加速运动（特别是对称性较低的系统，如旋转的双星系统）产生的。当这些扰动沿着时空传播时，它们以波的形式移动，速度等于光速。

## 1.4广义相对论的数学描述

以下公式和概念构成了理解和分析引力波的理论框架，是我们探索引力波源和引力波本身属性的基础。

## 1.4.1广义相对论的场方程

广义相对论的核心是爱因斯坦场方程，该方程描述了物质和能量如何影响时空结构，并因此产生引力效应。场方程可以写为：

其中，是爱因斯坦张量，代表了时空的曲率，是宇宙常数，用于描述宇宙的大尺度结构，是时空的度规张量，是能量-动量张量，代表了物质的能量和动量分布，G是牛顿的引力常数，𝑐 是光速。

## 1.4.2引力波的线性化方程

在许多情况下，引力波可以通过爱因斯坦场方程的线性化近似来处理。这种近似假设时空的扰动相对于平坦时空背景（Minkowski空间）是小的。在这个近似中，场方程可以简化为波动方程，引力波的解可以表示为时空中的小扰动。在弱场近似下，时空的扰动很小，我们可以将度规张量分解为

其中，是Minkowski（平坦）时空的度规，而是小的扰动。

将这种扰动代入爱因斯坦的场方程，并忽略高阶小量，我们得到线性化的引力波方程：

其中，是达朗贝尔算子（用于描述波动方程），是调整过的度规扰动。

## 1.4.3引力波的传播和极化

引力波的两种主要极化模式是“加”模式和“交叉”模式，分别用“+”和“×”表示。这些模式描述了由引力波引起的时空变形的不同方向。

# 2 引力波探测方法

引力波探测是一个高度精密的过程，涉及多种复杂的技术和仪器。目前主要的探测方法包括激光干涉法、脉冲星时间阵列（Pulsar Timing Arrays, PTA）和未来可能的空间基干涉仪。每种方法针对不同频率的引力波，适用于探测不同的宇宙事件。

## 2.1激光干涉仪

激光干涉仪是目前最成功的引力波探测技术，代表性的设施有LIGO、VIRGO和KAGRA，他们都是当前世界上主要的地面引力波探测器。

## 2.1.1工作原理

激光干涉仪基于激光干涉测量原理，通过测量两个或多个长臂的长度变化来探测引力波。这些探测器的每个臂长度通常达数公里。在无引力波通过时，两条臂的长度相等，激光束在两臂内往返反射后在干涉仪中重合产生干涉条纹。当引力波通过时，它会扭曲时空，导致两条臂的长度产生微小的变化，这种变化通过干涉条纹的移动被检测到。

## 2.1.2优势与限制

激光干涉仪能够非常精确地测量长度变化（精度达到10^-19米级别），使其能探测到来自数十亿光年之外的引力波事件。然而，这种方法对环境噪声非常敏感，需要复杂的隔离技术来减少非引力波源的干扰。

## 2.2脉冲星时间阵列（Pulsar Timing Arrays, PTA）

脉冲星时间阵列（Pulsar Timing Arrays, PTA）是一种利用一组精确观测的脉冲星，通过检测它们发出的脉冲信号之间的微小时间变化来探测引力波的方法。这些脉冲星，通常是毫秒脉冲星（非常稳定的旋转中子星），作为天然的宇宙钟使用。

## 2.2.1工作原理

脉冲星是高度规则的宇宙钟，通过精确测量来自脉冲星的无线电脉冲到达地球的时间，可以探测这些脉冲传播路径上时空结构的微小变化。当低频引力波（如由超大质量黑洞合并产生的）穿过地球和脉冲星之间的空间时，它们会引起时空扭曲，从而改变脉冲的到达时间。

## 2.2.2优势与限制

PTA能够探测到其他方法难以检测的低频引力波，但是它需要长时间的数据积累才能提高信号的可靠性。此外，这种方法需要极端精确的时间测量和对脉冲星系统深入的理解。

## 2.3空间基干涉仪

未来的空间基干涉仪，中国正在积极发展的两个引力波探测计划——天琴计划（TianQin）和太极计划（Taiji）都属于空间基干涉仪类型的引力波探测方式。这两个项目旨在通过太空中的激光干涉测量技术来探测引力波，类似于欧洲航天局（ESA）的LISA（Laser Interferometer Space Antenna）项目。

## 2.3.1工作原理

LISA将由几个飞行器组成，它们在太空中形成一个巨大的等边三角形，每边的长度约为250万公里。通过测量飞行器之间的相对距离变化来探测引力波，其原理类似于地面的激光干涉仪，但是在太空中进行，可以避免地球环境的干扰。

## 2.3.2优势与限制

空间基干涉仪如LISA能探测到一系列其他技术难以观测到的引力波信号，特别是来自超大质量黑洞合并或一些极端质量比双星系统的信号。这些信号的频率非常低，地面探测器由于技术限制和地球自身噪音的影响而难以探测。

## 2.4其他潜在技术

除了上述成熟或在研发中的引力波探测技术外，科学家们还在探索其他可能的方法，例如使用原子干涉仪和基于量子技术的探测方案。

## 2.4.1原子干涉仪

原子干涉仪是一种基于量子干涉效应的测量技术，可以极为精确地测量原子的运动状态。将这种技术应用于引力波探测的概念方案正在研究中，它利用超冷原子的自由下落状态来感应引力波导致的微小变化。

## 2.4.2量子引力波探测器

量子技术的进步也为引力波探测提供了新的可能性。例如，利用量子纠缠的粒子可能增强测量的精度，克服经典物理限制。这种技术的研究还处于非常初步的阶段，但展示了对未来引力波探测技术的宽广想象空间。

# 3 人类现有的地面引力波探测器

## 3.1 LIGO（激光干涉引力波天文台）

LIGO是世界上最著名的引力波探测项目之一，其全名为Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory。它是首个直接探测到引力波的实验设施。由加州理工学院和麻省理工学院负责运行，是美国国家科学基金会资助的最大科研项目之一。LIGO在两个站点建造有三台探测器，在华盛顿州的汉福德（Hanford）建有双臂长度分别为4千米和2千米的两台探测器（LIGO Hanford Observatory，简称LHO），而在路易斯安那州的利文斯顿建有一台双臂长度为4千米的探测器（LIGO Livingston Observatory，简称LLO），相距汉福德3002千米。LIGO的防震系统能够压抑各种震动噪声，真空系统是全世界最大与最纯的系统之一，光学器件具备前所未有的精确度，能够测量比质子尺寸还小一千倍的位移，电算设施的高超功能足以处理庞大实验数据。最佳灵敏度已经达到10−19的数量级。2015年，aLIGO正式投入使用，激光功率从初始版LIGO的10瓦特提升至200瓦特左右，探测频带下限从40Hz延伸到10Hz，灵敏度比初始版LIGO高出10倍，这意味着aLIGO能够探测引力波的距离比先前高出10倍，探测范围也扩大1000倍以上，能够探测到的可能引力波波源比先前多出1000倍。

## 3.1.1工作原理

LIGO使用激光干涉仪技术，通过监测两个臂内激光束的相位差来探测引力波。引力波通过时，会轻微扭曲时空，导致臂的长度发生变化，从而改变激光的干涉模式。。

## 3.1.2科学成就

2015年，LIGO首次直接探测到引力波，源自于两个黑洞的合并。这一发现是物理学史上的重大突破，为LIGO团队赢得了2017年的诺贝尔物理学奖。

## 3.2 VIRGO（维尔戈干涉仪）

VIRGO是位于意大利的一个大型引力波观测项目，由欧洲多国合作建造和运营。它是一架双臂长度为3千米的地面激光干涉仪，所属单位称为欧洲引力天文台（European Gravitational Observatory）。Virgo自2007年起开始进行科学观测，并且参与了S5的最后部分探测工作，VIRGO具有和LIGO相媲美的灵敏度。在进行了大约五年，2千4百万欧元的升级之后的处女座干涉仪，称为“先进Virgo”，于2017年8月1日正式加入LIGO两个探测器搜索引力波，这三个探测器共同运作应该能够较为精确地给出引力波波源的位置。

## 3.2.1工作原理

VIRGO的工作原理与LIGO类似，利用激光干涉仪测量两个臂的相对长度变化，从而探测引力波。

## 3.2.2科学成就

VIRGO与LIGO的合作增强了引力波事件的探测能力和源的定位精度。两者协同作业，可以更精确地确定引力波的来源。

## 3.3 GEO600

GEO600 是一个较小但技术上具有创新性的引力波探测器，位于德国汉诺威附近。它由德国马普引力物理研究所（Max Planck Institute for Gravitational Physics）和英国伯明翰大学主导，其设计和运营涉及多国合作。尽管GEO600 的臂长（每个臂600米）远短于LIGO或VIRGO的臂长，它却在引力波探测技术的开发和测试中发挥了重要的试验场和先驱者的作用。

## 3.3.1工作原理

GEO600 使用激光干涉仪来探测引力波，这与LIGO和VIRGO相似。引力波通过时，预期会引起探测器臂长的微小变化，这些变化通过激光干涉被测量。GEO600 采用了许多高级技术，如信号再循环（signal recycling）和功率再循环（power recycling），这些技术有助于增强设备的响应性和灵敏度。

## 3.3.2科学成就

GEO600 在引力波探测技术的发展中扮演了重要角色。它是最早采用信号再循环技术的探测器之一，该技术后来也被应用于LIGO和VIRGO。此外，GEO600 还测试了许多其他先进技术，包括量子纠缠光源和高灵敏度光学元件。此外，GEO600 也继续参与国际引力波观测活动，与LIGO、VIRGO和KAGRA等设施协作，提高事件探测的几率和精度。

## 3.4 KAGRA（加速器重力波望远镜）

KAGRA位于日本岐阜县的神岡矿山内，是日本正在建造中的引力波探测项目，采用了一些与LIGO和VIRGO不同的技术特点，如地下探测和低温运行。它的600米长的干涉臂被深埋在200米的岩石下，它的测试质量也会被降温至20K。物理学者认为，这两个手段将能减低燥声，因此提高灵敏度。

## 3.4.1工作原理

与LIGO和VIRGO相同，KAGRA使用激光干涉仪来探测引力波。不同的是，KAGRA的设备运行在低温环境中，旨在减少热噪声，提高探测灵敏度。

## 3.4.2科学成就

它的设计包含多个创新技术，如低温运行和地下安装，这些都旨在提高系统的灵敏度和稳定性，降低地面震动和热噪声对探测器的影响。

## 3.5 全球引力波探测网络

LIGO、VIRGO、GEO600和KAGRA四者的合作不仅增强了单一探测器的探测能力，也大幅提升了引力波源定位的精度。多个探测站的数据可以通过交叉验证来确认引力波事件，并且可以通过测量引力波到达各站的时间差来精确计算出波源的位置。这对于天文学家来说极其宝贵，因为它允许他们用其他类型的望远镜（如光学、射电和X射线）进一步观测这些引力波事件的天体来源。

# 4 人类正在建造的空间基干涉仪

## 4.1 天琴计划（TianQin）

天琴计划是由中山大学发起和领导的一个空间引力波探测项目。它计划利用三颗卫星形成一个近似等边三角形的太空干涉仪阵列，每边长约10万公里。这三颗卫星将围绕地球飞行，并通过高精度的激光来测量卫星之间的相对距离变化，从而探测引力波。

## 4.1.1频率覆盖

天琴计划主要目标是探测频率在0.1毫赫兹到1赫兹之间的引力波，这种频率范围内的引力波可能源自双白矮星、双中子星或黑洞-中子星系统的合并等。

## 4.1.2科学目标

除了通过引力波探测和研究银河系内外的双星系统外，天琴还旨在通过引力波观测验证广义相对论的预言，研究极端强引力场下物理定律的行为，以及提供对早期宇宙和暗物质等基本物理问题的洞见，探索早期宇宙的秘密。

## 4.1.3技术创新

天琴计划特别关注提高激光干涉测量的精确性和稳定性，以适应太空环境中的挑战。

## 4.2 太极计划（Taiji）

太极计划是中国的另一个空间引力波探测项目，由中国科学院发起。它与天琴计划类似，也是利用太空中的激光干涉技术。太极计划的卫星将形成一个大约3百万公里边长的等边三角形阵列，这将使其能够探测频率更低的引力波。

## 4.2.1频率覆盖

太极计划旨在探测从0.1毫赫兹到1赫兹的引力波，专注于来自超大质量黑洞合并等极端宇宙事件的信号。

## 4.2.2科学目标

太极计划通过探测和研究这些低频引力波，希望能够对宇宙中包括超大质量黑洞在内的宇宙中最极端的天体的形成和演化机制提供独到见解，以及探索宇宙早期的引力波背景。。

## 4.2.3技术难题

由于探测器的尺度更大，太极计划在技术上面临更多挑战，特别是在维持激光链接的稳定性和精确性方面。

## 4.3 LISA（Laser Interferometer Space Antenna）

LISA（Laser Interferometer Space Antenna）是一个由欧洲航天局（ESA）领导的空间引力波探测计划。LISA 项目将包括三颗卫星，每颗卫星都装备有两套激光干涉仪，这三颗卫星将形成一个近似等边三角形的配置，每边约250万公里，同时三颗卫星将以地球为中心，与地球一起绕太阳公转，形成一个跟随地球轨道的太空阵列。这种配置减少了地球和太阳的引力扰动，有助于提高测量的准确性和稳定性。并且这也使得LISA可以覆盖广泛的频率范围，并具有较高的灵敏度，尤其是在低频段（0.1毫赫兹到100毫赫兹）。它预计将在2030年代初期发射。

## 4.3.1科学目标

超大质量黑洞探测：监测和研究宇宙中最大的黑洞，包括它们的形成和演化，以及通过黑洞合并释放的巨大能量。

中等质量黑洞：探测可能存在于星系中心或星团中的中等质量黑洞。

紧凑双星系统：研究双白矮星、双中子星或其他紧凑星体双星系统的演化，这些系统是引力波天文学的重要源。

理论物理测试：使用引力波作为工具测试广义相对论在极端条件下的有效性，探索宇宙的基本物理定律。

宇宙学研究：通过研究引力波背景，揭示大爆炸之后早期宇宙的秘密。

## 4.3.2未来前景

LISA 的成功将开启对宇宙中引力波现象的深入研究，提供前所未有的视角来观测宇宙中最极端和最神秘的现象。这不仅将深化我们对宇宙的理解，也可能带来关于宇宙基本物理定律的新发现。

# 5 引力波探测的科学意义与应用

引力波探测不仅是物理学的一个重要突破，也为宇宙学、天体物理学和相对论测试提供了新的工具。通过引力波观测，科学家能够探索到以往电磁波望远镜无法达到的宇宙角落。

## 5.1 开启新的天文学时代

引力波天文学使我们能够观察到宇宙中最极端、最神秘的事件。这些观测有助于我们理解黑洞、中子星等极端状态的物质，以及它们如何影响周围的宇宙环境。同时，引力波提供了测试广义相对论预言的新方法。通过观测和分析引力波，科学家们能够检验广义相对论在强引力场条件下的有效性。

此外，引力波还可以帮助我们探索宇宙的早期阶段。大爆炸后不久的宇宙可能产生了背景引力波，通过研究这些早期的波动，我们可以更好地了解宇宙的起源和演化过程。

## 5.2 新一代引力波探测器

目前，科学家们正在计划和建设下一代引力波探测器，如LIGO的升级版本和空间引力波探测项目（如LISA）。这些新设备将具有更高的灵敏度和更广的检测频率范围，能够探测到更远距离、更微弱的引力波信号。

## 5.3 多信使天文学

引力波探测与电磁波、中微子和宇宙射线的联合观测，即多信使天文学，是当前天文研究的一个热门方向。通过多种信使的综合数据分析，科学家可以获得关于天体和宇宙事件更全面的物理图像。

## 5.4 开启新的天文学时代

引力波探测的成功使我们能够观察到宇宙中最极端、最神秘的事件。这些观测有助于我们理解黑洞、中子星等极端状态的物质，以及它们如何影响周围的宇宙环境。这使得“多信使天文学”（即同时使用引力波及电磁波等不同信号进行天体观测）成为可能。例如，2017年两颗中子星合并引起的引力波事件GW170817，不仅被LIGO和VIRGO探测到，还触发了全球范围内使用不同类型望远镜的广泛观测，这些观测提供了宝贵的物理信息，帮助科学家更好地理解这类天体事件的物理过程。

6 参考文献

[1] 曹梦迪,陈奕康,李俊朗等.地面激光干涉仪引力波探测器悬挂和隔振系统[J].中国科学：物理学、力学、天文学,2022,52(8):84-99.

[2] 郭越凡,CAPOCASA,Eleonora等.KAGRA引力波探测器中频率相关压缩态实验进展[J].天文学进展,2019,37(1):73-85.

[3] 李永贵,张晓莉,李英民.激光干涉仪引力波探测器中的光学技术进展[J].中国科学：物理学、力学、天文学,2017,47(1):18-32.

[4] 王运永,朱兴江,刘见等.激光干涉仪引力波探测器[J].天文学进展,2014,32(3):348-382.

[5] He,Gao.GW170817: The key to the door of multi-messenger astronomy including gravitational waves[J].Science China(Physics,Mechanics & Astronomy),2018,61(5):81-84.

[6] 王颖.空间探测激光干涉仪在太空中寻找黑洞[J].激光与光电子学进展,2001,38(2):23-25.

[7] 罗子人,张敏,靳刚等.中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J].深空探测学报,2020,7(1):3-10.

[8]罗俊,艾凌皓,艾艳丽等.天琴计划简介[J].中山大学学报（自然科学版）,2021,60(1):1-19.

[9]赵峥.爱因斯坦与广义相对论[J].物理,2015,44(10):646-656.