空间仪器设计作业

引力波空间探测是当前国际前沿研究热点领域之一，也是我校点研究方向。目前国内外有LISA、天琴、太极、Grace follow-on等引力波探测计划。请你谈谈这些引力波空间探测计划的理论意义、探测方法的理解？还有没有其它不同的空间引力波探测方法，谈谈你的想法。

80多年前，爱因斯坦曾预言，加速的物质会发出引力波，造成时空结构的扭曲。引力波频谱的已知和预期来源涵盖了几十年的频率。在1Hz以上声频范围内的声源可以被地面探测器探测到，而在低频范围内的声源由于牛顿引力噪声的不可屏蔽背景，只能在太空中观测到。LISA是一种空间激光干涉引力波探测器，用于观测来自银河系和宇宙源的引力波信号，频率范围从0.1 mHz到1Hz。LISA由三个航天器组成，在5百万公里宽的等边三角形的拐角处。该星系团位于一个类似地球的日心轨道上，与地球的距离为20度。每个航天器携带激光和自由飞行的测试质量，并保持在一个纯粹的惯性轨道上的技术使用场发射电力推进。

根据狭义相对论，两个物体之间的引力相互作用不可能是瞬时的，因为光速代表了所有相互作用的极限速度。早在1805年，拉普拉斯就在他著名的著作《论引力》中指出，如果万有引力以有限的速度传播，那么双星系统中的力就不应该指向连接两颗恒星的直线，而且系统的角动量必须随着时间的推移而逐渐减小。用现代语言来表达，双星通过发射引力波而失去能量和角动量。1993年，赫尔斯和泰勒利用对双星PSR 1913+16的观测间接证明了引力波的存在，从而获得了诺贝尔物理学奖。

爱因斯坦关于引力波的论文发表于1916年。在20世纪50年代，一些相对论理论家，特别是H.邦迪，严格地证明了引力辐射实际上是一种物理上可以观察到的现象，引力波携带能量。因此，一个发出引力波的系统应该失去能量。大质量物体在时空结构中产生“凹痕”，其他物体在这个弯曲的时空中以最短的路径运动，很像一个弹性表面上的球系统。事实上，爱因斯坦场方程把质量(能量)和曲率联系起来，就像胡克定律把力和弹簧变形联系起来一样，或者说:时空是弹性介质。

如果我们愿意接受这样一个事实，即空间和时间不是独立存在的，而是与物理世界有强烈的相互作用，那么广义相对论就会用一种非常直观的几何图形来取代牛顿引力理论。如果一个质量分布以一种不对称的方式运动，那么时空的缩进就会以时空涟漪的形式向外运动，这就是所谓的引力波。引力波与我们熟悉的电磁波有根本的不同。而由电荷的加速度产生的电磁波，在时空框架中传播，而由质量的加速度产生的引力波是时空本身。

与存在于两个极性中的电荷不同，质量都是正质量。这就是为什么产生电磁辐射的最低阶不对称是电荷分布的偶极矩，而对于引力波，则是质量分布的四极矩的变化。因此，球对称的引力效应不会产生引力辐射。一个完全对称的超新星坍缩不会产生波，一个非球面的超新星会发出引力辐射。双星系统总是呈辐射状。

引力波扭曲了时空，换句话说，它们改变了宏观物体之间的距离。穿过太阳系的引力波在空间中产生时变应变，周期性地改变太阳系中所有物体之间的距离，使之垂直于波的传播方向。这些可能是航天器和地球之间的距离,如ULYSSES太空任务的情况下或CASSINI(尝试并将定做这些距离的波动)或航天器内部测试质量之间的距离,由一个大的距离,在LISA的情况下。主要的问题是，由于引力波通过而引起的相对长度变化非常小。这并不意味着引力波是弱的，因为它们携带的能量很少。相反，在不太遥远的星系里的超新星会以几千瓦的引力辐射强度把地球上的每一平方米都淹没。然而，产生的长度变化是非常小的，因为时空是一种非常坚硬的弹性介质，所以它需要非常大的能量才能产生微小的扭曲。

20世纪90年代，欧洲空间局( European Space Agency， ESA)和美国国家航空航天局( National Aeronautic and Space Administration， NASA)合作，开始发展空间激光干涉引力波探测项目—Laser Interferometer Space Antenna ( LISA) 计划。LISA 是为了测量由时空引力波引起的时变应力而设计的，预计可探测到超致密双星、超大质量黑洞并合等引力波源。LISA 的工作频段为 10-3～1Hz，是地基干涉系统的直接补充。

空间引力波探测的基本原理是利用空间自由悬浮测试质量的间距作为传感器， 将引力波信号转化为测试质量间距变化的信号。然后利用迈克尔逊形式的高精度激光干涉仪对这个距离变化进行读出。要达到引力波探测所需要的灵敏度， 依靠 3 个主要因素:

(1) 干涉仪臂长;

(2) 精确测量两测试质量间距变化的能力;

(3) 测量和抑制除引力波外的其他非保守力的能力， 保证激光干涉测距系统对引力波信号进行有效检测。

LISA 的设计主要集中在这 3 个方面。首要考虑的是，尽管引力波探测灵敏度要求给定的是天体引力波源位置和偏振的平均，显而易见，给定干涉仪臂长 L 为 5 × 106 km， LISA 单臂的干涉测距系统精度必须达到几十个 pm Hz－1 /2。

LISA Pathfinder是一项验证LISA关键技术的项目。由于LISA所需的技术非常需要挑战性，而且因为地球的噪声影响，许多技术无法在地面上验证。所以需要把技术设备放置在太空中进行测试，这是LISA Pathfinder的初衷。它并不需要探测引力波，而是把所有的技术放在卫星上，把LISA所需的数百万公里的臂长缩小到数十厘米的距离，使用激光干涉测量测试质量的距离。其科学目标可以表述为进行一次空间飞行中低频引力波探测计量测试。

更具体地说，LISA Pathfinder的目标包括三部分：内部传感器的性能、激光干涉仪的性能和成功完成LISA任务的关键的飞行准备技术。

二、从国际国内引力波空间探测技术的发展可以看出，引力波空间探测技术指标高、系统复杂、实现难度大。请你谈一谈对空间引力波探测航天器的技术特征、实现难度的认识？如果你是负责人，如何组织推进空间引力波探测航天器的任务分析、方案设计、技术攻关，