

中国物理学会引力与相对论天体物理分会 青年学者优秀论文奖 获奖论文介绍

为进一步推动和提高中国引力和相对论天体物理的研究水平,中国物理学会引力与相对论天体物理分会从2012年开始设立青年学者优秀论文奖,并在每年的学术年会上颁发当年的优秀论文奖。参选学者必须是分会会员,且年龄不超过35周岁。2017年的获奖者为华中科技大学的谈玉杰,其获奖论文为:*Combined Search for Lorentz Violation in Short-Range Gravity*(*Physical Review Letters* 117: 071102);武汉理工大学的廖恺,其获奖论文为:*The distance duality relation from strong gravitational lensing*(*The Astrophysical Journal Letters* 822: 74);湖南师范大学的王接词,其获奖论文为:*Influence of relativistic effects on satellite-based clock synchronization*(*Physical Review D* 93: 065008)。

获奖论文

用近距离引力实验检验粒子的洛伦兹对称性

谈玉杰 陈亚芬 邵成刚

(基本物理量测量教育部重点实验室,华中科技大学物理学院 430074)

自然界存在着四种基本相互作用力:引力、强相互作用力、弱相互作用力和电磁相互作用力。目前,人们对自然界的描述基于两个成功的理论,即广义相对论和描述电磁、强、弱相互作用的统一理论。前者是一种经典理论,描述了一切宏观引力现象;后者是一种量子理论,描述了其他三种相互作用力。尽管这两种理论并未完全融合,但是人们相信一定存在着一个更基本的量子引力理论,用它可以统一地描述引力与量子物理。在过去的二十年里,Kostelecky等人基于时空的洛伦兹对称性而提

出了所谓的粒子洛伦兹对称性破缺(particle Lorentz violation),并且发展了标准模型扩展(SME)理论,用以分析超越标准模型和广义相对论的新物理现象。

粒子洛伦兹对称性描述的是当粒子运动状态发生改变时,粒子或局域场按照洛伦兹变换进行变换,但背景场(如电磁场及引力场等)的期望值在这种变换下保持不变。对于自由运动的粒子,由于没有背景场,这种粒子洛伦兹变换和时空的洛伦兹变换相同。

目前,对于可到达的低能级上的物理研究,有效场理论是非常有效的工具之一。采用有效场理论描述粒子洛伦兹对称性破缺,其基本的出发点是在拉氏量中除了考虑标准模型描述的物质项、广义相对论描述的引力项之外,引入一系列的粒子洛伦兹对称性破缺项,这即是标准模型扩展(SME)理论框架。这些扩展的破缺修正项通常由粒子洛伦兹对称性破缺算符与标准模型中的场及引力场耦合构成,并用破缺系数量化粒子洛伦兹对称性破缺程度。由于粒子洛伦兹对称性破缺算符只依赖于背景场,这些算符是粒子洛伦兹变换下的标量算符,时空洛伦兹变换下的张量算符。一般来说,对物理系统的粒子洛伦兹对称性破缺的研究分为纯物质部分、纯引力部分,以及物质-引力耦合部分的三种不同形式,人们也已经开展了大量的实验和观测工作,运用各种观测手段间接地对这三个破缺部分的破缺系数加以限制,如引力辐射、超导重力仪、近距离引力实验、引力波干涉仪、地月测距、双脉冲星观测、行星星历表、重力探测B、原子干涉仪、等效原理扭秤、太阳自旋进动等等。在纯物质部分及物质-引力耦合中的粒子洛伦兹对称性破缺已经得到了极大的限制,然而在纯引力部分中的粒子洛伦兹对称性破缺还需要进行深入的探究。按照质量量纲的幂次 d 进行划分,纯引力部分中的粒子洛伦兹对称性破缺分为最小耦合项($d=4$)和非最小耦合项($d \geq 6$)。近距离的引力实验为探究纯引力部分中的粒子洛伦兹对称性破缺的非最小耦合项提供了极大的方便。在此我们主要研究利用地面的近距离引力实验探索纯引力部分的非最小耦合 $d=6$ 项。

根据有效场理论,如果出现粒子洛伦兹对称性破缺,便会存在一种由14个粒子洛伦兹对称性破缺系数描述的破缺背景场。如图1所示,在近似惯性系(如太阳系)中,这些破缺系数是常数。而对于地面上的近距离引力实验,由于实验装置随地球自转 ω (忽略了相对较小的地球公转 Ω 效应),相当于对粒子洛伦兹对称性破缺信号进行了频率调制,因此

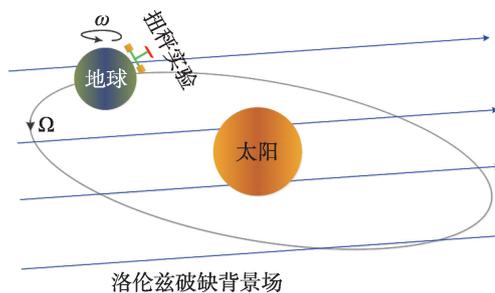


图1 近距离扭秤引力实验中粒子洛伦兹对称性破缺背景场

在实验室坐标系中观测,粒子洛伦兹对称性破缺系数不再是常数,破缺力矩随地球自转进行周期性的振荡,最高可达到地球自转频率的四次谐波,给出9个实验观测的破缺力矩傅里叶幅度。最终,可以由破缺力矩傅里叶幅度对粒子洛伦兹对称性破缺系数加以限制。然而,任何一个近距离的引力实验均只能测量9个信号分量,不能同时限制14个破缺系数。因此,对多个近距离引力实验进行联合分析,有助于独立地给出14个破缺系数限制。

目前,国际上共有3个近距离的地面引力实验用来分析纯引力部分 $d=6$ 的粒子洛伦兹对称性破缺效应:华中科技大学的HUST-2011,印第安纳大学的IU-2002和IU-2012。基于两个近距离引力实验(IU-2002和IU-2012)的数据,印第安纳大学分析了可能的粒子洛伦兹对称性破缺效应,由于其实验采用自由振动频率较大的微型振子,较大的热噪声限制了实验的灵敏度,最终给出了较低的破缺系数限制 10^{-7}m^2 。我们利用本实验室(引力中心)开展的毫米区间上牛顿引力定律的检验(HUST-2011)数据对粒子洛伦兹对称性破缺效应进行探究。由于我们采用的检验质量为宏观扭秤,热噪声相对较低,因此对破缺系数给出了较高的限制 10^{-8}m^2 。2015年,本实验团队研制了一套新装置,旨在实现亚毫米区间上牛顿引力定律的高精度检验(HUST-2015)。相比HUST-2011,HUST-2015实验装置的密度调制设计使驱动噪声与粒子洛伦兹对称性破缺信号不在同一频率,提高了破缺信号的测量灵敏度。在以上工作的基础上,我们结合4个近距离引力实验 HUST-2011、HUST-2015、IU-2002 和 IU-

2012 的实验结果,进行了一个联合的数据分析,首次实现了对 14 个破缺系数的独立测量,在 10^{-9} m^2 的水平下仍然没有观测到粒子洛伦兹对称性破缺效应,这是目前国际上给出的最好的粒子洛伦兹对称

性破缺系数限制。鉴于在现有的实验精度下所有的实验均显示粒子洛伦兹对称性没有破缺,这将推动人们开展更高精度的“粒子洛伦兹对称性”实验检验,从而探究超越广义相对论的新物理。



利用强引力透镜检验 宇宙距离对偶关系

廖 恺¹ 朱宗宏^{2,3}

(1. 武汉理工大学 430070; 2. 武汉大学 430072; 3. 北京师范大学 100875)

宇宙学近年来发展迅速,人们对宇宙的物质组份、宇宙的形成与演化等都有了更加精准而深刻的认识。这些很大程度上都得益于对宇宙学距离的测量。不同于日常生活中测量距离的直观性,在宇宙大尺度上考虑到时空效应,距离的概念变得不同,具体地,要想测量宇宙学距离必须给定一个方案,这就好比日常生活上要想测量距离就需要得到尺子两段的刻度差。宇宙学上通常有两种测量距离的方案:光度距离和角直径距离。

首先,对于光度距离,打个比方,如果我们知道了一根蜡烛的绝对亮度,要想知道它离我们的距离,只需要看它有多亮,越亮则离我们越近,反之越暗则离我们越远。注意,这里的核心是同一个蜡烛并且知道了它的绝对亮度,如果蜡烛本身绝对亮度不知道,我们是无法通过观测亮暗来判断绝对距离的。天体物理中存在一种特殊的天体现象:Ia 型超新星,简单来说,它是由于白矮星吸积伴星质量达到强德拉塞卡极限后引发的爆炸,在物理上,这种爆炸机制决定了每一颗超新星的亮度总是一样的。因此我们可以认为 Ia 型超新星是一类标准烛光。通过对它的亮暗进行观测,就可以知道它们离我们的相对远近,即可以测量光度距离。

其次,对于角直径距离,打个比方,如果我们知道了一根垂直于视向摆放的尺子的绝对长度,要想知道它离我们的距离,只需要看它的两端相对于我们形成的张角即可,角度越大则离我们越近,反之则越远。同理,这里的核心是我们已知了尺子的绝对长度。天文上一个常用的做法是通过其他办法知道了一类星系团的绝对大小,通过测量它张角的大小来确定它的远近,即通常所说的角直径距离。其他常见的办法还有测量重子声学振荡,即声波在早期宇宙中传播而在一定尺度上形成的重子密度变化团。

由于在宇宙学大尺度下必须考虑时空效应,上述测量的两种距离通常是不相等的,这与日常的直觉矛盾,我们日常的直觉只是宇宙学的极限近似。宇宙学研究通常有三个非常基本的假设:1. 宇宙学原理成立,时空由度规理论描述(例如广义相对论就是度规理论的一种);2. 光子沿着零测地线运动(类比于地球的大圆弧);3. 光子数守恒。一般而言,前两个假设是非常基本的,有着很强的物理动机。第三个假设涉及宇宙是否透明的概念:宇宙中间介质可能会吸收,散射光子,使得 Ia 型超新星看起来更暗弱,即光度距离增大。同时,光子也可能在宇