

相对密度丰度,由于中微子质量(0.05 eV)带来的质量排序的改变。其中 y 轴表示的是halo的质量排序受到中微子相对质量丰度的影响。显然,在“中微子贫”区域,halo会流失更多的质量,从而其质量序号更大。若一个halo在中微子更“富”的区域(即对中微子相对密度丰度求偏导),它将会有更小的质量排序。因此我们所见的蓝色误差棒均小于零。对于这个现象,我们解读为:当halo处于中微子“富”的区域,大量中微子被halo的引力势阱俘获(我们称为凝聚),产生更深的引力势,从而更多的聚集

物质,形成质量更大的halo。

图2中的 x 轴表示,以上所述的这种效应对于质量更大的halo更为明显。因为,更小的halo的引力势不足以凝聚周围快速运动的中微子。于是,即使在中微子“富”的区域,中微子并没有凝聚,使得halo的质量增加,从而改变其质量排序。

这种凝聚效应导致暗物质晕的质量函数的扭曲,最终导致星系的特性发生变化。因此这种凝聚效应在当今和将来的宇宙学观测中开辟了一条独立测量中微子质量的道路。



获奖论文

软光子定理与电磁学记忆效应

毛普健¹ 吴俊宝^{2,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 天津大学 300072;
3. 北京大学高能物理中心 100871)

在广义相对论体系中,引力波指的是时空弯曲的涟漪以波的形式由辐射源向外传播。1916年爱因斯坦基于广义相对论预言了其存在性。引力波不存在于牛顿的经典引力理论中,因为牛顿引力理论假设物质之间的引力相互作用是一种超距作用,即传播的速度是无穷大的。所以引力波也是验证广义相对论的重要现象之一。自从爱因斯坦预言了引力波之后,物理学家和天文学家在实验探测中做出了无数的努力。由于直接探测引力波对实验精度的要求极高,在爱因斯坦预言整整100年之后,LIGO探测器才首次直接探测到了引力波信号。该结果也是2016年最重大科学成果之一。

在引力波的探测中,我们关注的是两个“自由”运动物体之间的固有距离的变化。当引力波通过时,其固有距离会发生周期性的震荡。有一类非常有趣的引力波会引起附近观察者之间固有距离的永久变化。这种效应被称之为引力波的记忆效应。Zel'dovich和Polnarev在线性引力理论中,研

究恒星散射过程时首先注意到这一现象。对其可能的实验观测,学者也有过详细的讨论。最近,引力波的记忆效应在纯理论的角度重新引起了人们的关注。2014年狄拉克奖得主、哈佛大学Strominger教授与合作者Zhiboedov博士发现了引力波的记忆效应与温伯格的软引力子定理之间的深层联系。与此同时,一个三角等值关系被揭示出来。互为等价的三者为渐近对称群中的超平移变换、温伯格的软引力子定理以及引力波的记忆效应。这三者之间的等价关系具体体现为:引力波的记忆效应公式是软引力子定理中软因子的傅里叶变换;渐近对称群中的超平移变换作为一个自发破缺的对称性,由其Ward恒等式可得到软引力子定理,而其产生的Goldstone玻色子即为软引力子;经典引力理论中从一个稳态时空到另一个稳态时空的变化所辐射出的引力波会产生记忆效应,此记忆效应由渐近对称群中的超平移所刻画。

软引力子定理可以理解为有引力子参与的散

射振幅在低能展开时展开系数所表现出的普适性。近期的研究表明,软引力子定理不只存在于低能展开的领头阶(即温伯格的软引力子定理),还可存在于次领头阶、甚至第三阶。如果我们承认上述三角等价关系是普适的,那么可以期待超越领头阶的软引力子定理会对应着新的引力波的记忆效应。以此为研究动机,Strominger教授与合作者发现了一种新的引力波的记忆效应,其体现为固有观测者的一种旋转记忆效应,它对应到次领头阶的软引力子定理,会使不同偏振光线之间产生固有时的差别。该旋转记忆效应也在近期的引力波研究中通过后牛顿近似的方法得到证实。

作为一种规范不变的理论,电磁理论通常为我们提供了一个更简单、却与引力理论有相当类似性的模型。这也体现在记忆效应的研究中。Bieri和Garfinkle通过详细的渐近分析发现电磁辐射所产生的记忆效应体现为带电探测粒子速度的变化,就像是“踢”了带电粒子一下。引力理论中的三角等价关系也在电磁理论中逐渐被建立起来。在电磁理论中,互为等价的三者为领头阶的软光子定理、电磁辐射的记忆效应及电磁理论中的渐近对称性。很久以前,学者就发现软光子定理是存在于次领头阶的。这也预示着一个新的、与次领头阶软光

子定理所对应的电磁理论中的记忆效应的存在。基于此,作者与欧阳昊博士、吴小宁研究员一起仔细研究了电磁理论的渐近行为,发现了一种新的电磁辐射的记忆效应。引起带电粒子速度变化的记忆效应为电场的作用,而我们发现的新的记忆效应为磁场的作用,其体现为带电运动粒子的位置变化。有趣的是,新的记忆效应具有与Aharonov-Bohm效应相同的表达式。我们进一步验证了新的记忆效应与次领头阶软光子定理的等价性,即新的记忆效应公式是次领头阶软光子定理中软因子的傅里叶变换。

无论是引力理论还是电磁理论,次领头阶软定理所对应的对称性尚存争论。一种观点认为次领头阶软定理对应着新对称性,但是如何设定理论中符合物理要求的边界条件以得到对应次领头阶软定理的渐近对称性尚不明确;另一种观点认为次领头阶软定理与领头阶软定理源自同一渐近对称性,软定理中的能量展开对应于渐近守恒荷的径向倒数展开。尽管还有这样的争论,本文中所讨论的三角等价关系使我们对相关领域的研究有了更深刻的认识。它连接了三个完全不同却又十分基础的研究领域,为我们研究引力波、散射振幅与对称性等内容提供了一个全新的视角。



获奖论文

利用子域全息复杂度探测约化保真率性质

甘文聪 舒富文

(南昌大学理学院物理系,南昌大学相对论天体物理与高能物理中心 330031)

20世纪70年代,贝肯斯坦与霍金发现黑洞熵正比于黑洞视界面积,这促使Susskind和'tHooft提出了量子引力的一个一般性原理:一个引力系统的全部信息储存在其更低一维的表面,即全息原理。1997年,Maldacena从弦理论出发提出的反德西特

时空/共形场论(AdS/CFT)对偶是全息原理的一个具体实现。AdS/CFT对偶说的是 $d+1$ 维的AdS时空中的量子引力理论等价于 d 维平坦时空中的共形场论。这意味着量子引力理论的性质可以从非引力的共形场论理解。从这个角度讲,引力被认为是