

# 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

编者按: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年度论文评奖工作于2018年2月开始,共收到来自12个不同单位的参赛论文12篇,经过5位评审专家的评审,于5月中旬评选出3篇获奖论文。获奖者分别为北京师范大学的于浩然,其获奖论文为:Differential neutrino condensation onto cosmic structure(*Nature Astronomy*, 1: 0143),他们发现一种中微子凝聚效应,并提出利用这个效应在星系巡天测量中微子质量;中国科学院高能所的毛普健,其获奖论文为:New electromagnetic memories and soft photon theorems(*Physical Review D*, 95: 125011),他们发现一种引起带电粒子位置变化的新电磁辐射记忆效应,并证明了该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;南昌大学的甘文聪,其获奖论文为:Holographic complexity: A tool to probe the property of reduced fidelity susceptibility(*Physical Review D*, 96: 026008),他们利用全息和场论计算定量证明了约化保真率与子域全息复杂度之间的对偶关系。



## 中微子对宇宙大尺度结构的非线性效应

于浩然 张同杰

(北京师范大学天文系 100875)

中微子的特性是现代物理学的重大问题之一。在粒子物理标准模型中有三类中微子,中微子振荡实验测量出不同中微子的质量平方差,表明中微子的质量总和不为零,并给出了中微子质量和的下限:0.05 eV。中微子质量对宇宙演化有着复杂的影响。在宇宙早期,中微子为相对论性粒子,作为辐射能量密度,从而改变了物质辐射的能量密度比。基于此效应,宇宙微波背景辐射(CMB)的观测给出了中微子质量总和的上限:0.2 eV。中微子在宇宙膨胀过程中逐渐变为非相对论性粒子,由辐射

能量密度转为物质能量密度。由于在宇宙晚期(现在时刻),中微子的速度弥散(热运动速度)仍明显高于冷暗物质和重子物质,其这种特有的热运动速度使其显著地不易受引力影响而坍缩成团,从而压低小尺度的总物质功率谱。基于此效应,当今和未来的星系巡天计划(如Euclid、LSST、DESI、PFS等)都计划给出更好的中微子质量总和的上限。论文“Differential neutrino condensation onto cosmic structure”利用计算机数值模拟方法发现了中微子对宇宙大尺度结构的新效应,使得我们有望在未来

的星系巡天中利用中微子和暗物质的密度差来限制中微子的质量。

中微子在宇宙演化呈现非高斯性,需要 $N$ 体数值模拟才能精确模拟其演化。宇宙大尺度结构和中微子共同的数值模拟在中微子总质量为 $0.05\sim 0.2$  eV的范围,由于中微子的速度弥散大、成团性低,我们需要极大数量的中微子 $N$ 体粒子才能克服模拟中泊松噪声的影响。“天河二号”超算以其5.49亿亿次/秒的峰值浮点运算速度、1.4P内存的高性能,连续6次登上最新全球超算500强榜首,其超快的计算速度和巨大内存能够克服上述数值模拟计算上的困难。我们利用宇宙大尺度结构 $N$ 体数值模拟程序CUBEP3M,在“天河二号”超算上开展了中微子数值模拟研究,旨在为在宇宙学观测上限制中微子质量顺序及其绝对质量提供理论依据。2015年我们启用了“天河二号”的13824个节点(占全系统16000节点的86%),累计CPU计算时间96小时,成功地运行了中微子质量总和为 $0.05$  eV和 $0$ 的两组数值模拟,称为TianNu和TianZero。其中TianNu含约3万亿 $N$ 体粒子,创造了 $N$ 体数值模拟的新世界纪录。

CUBEP3M采用粒子格点法(particle-mesh, PM)+粒子粒子(particle-particle, PM)组合计算粒子引力相互作用的方法,称为P3M算法。对于宇宙学尺度的分析,物质在计算节点上分布相对均匀,PM和P3M的算法保证了最好的精度,并且计算速度由泊松方程在傅里叶空间快速傅里叶变换(FFT)的求解得到保证。CUBEP3M采用双层格点PM算法,降低了全局通信,在上万MPI进程的情况下保证了极高的可扩展性,同时节省了内存开支。

TianNu和TianZero数值模拟生成共计约2PB的数据量。经过一年多对数据的处理和分析,团队首次发现了以往任何宇宙学数值模拟测量不到的宇宙结构的Differential Neutrino Condensation效应。图1中,我们展示了数值模拟最终结果的一个切片中,中微子和暗物质的分布。蓝白色代表暗物

质分布,橙色代表中微子分布。中微子在大尺度服从暗物质的“cosmic web”状大尺度结构,而在小尺度中微子因热运动尺度没有明显结构。不仅如此,两幅特写小图表明:在相似的暗物质分布的两个区域中,中微子与暗物质密度之比却不同。这两个区域表征了在特定尺度暗物质和中微子的平均密度差。我们发现,暗物质和中微子的密度差会影响暗物质晕的性质。我们将这个密度差(或密度比值)称为中微子(相对于暗物质)的相对密度丰度。

在两组数值模拟TianNu和TianZero中,由于使用了相同的初始条件,我们能在两组数值模拟中找到起源相同的暗物质晕(halo),从而比较他们的性质(质量排序)。图2中我们展示了halo在不同的

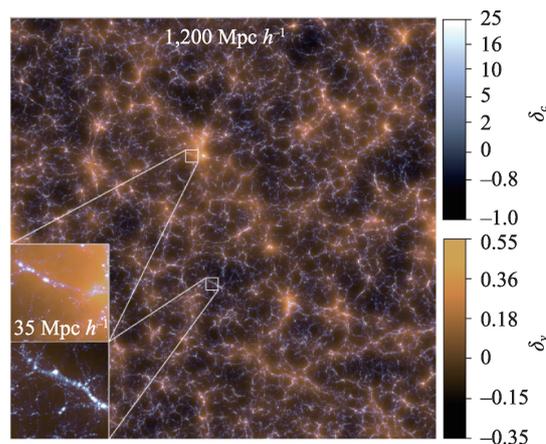


图1 TianNu数值模拟结果示意图。图中蓝白色、橙色分别代表宇宙暗物质和中微子的密度。其中两个特写小图展示了相似的暗物质分布但不同的中微子相对丰度

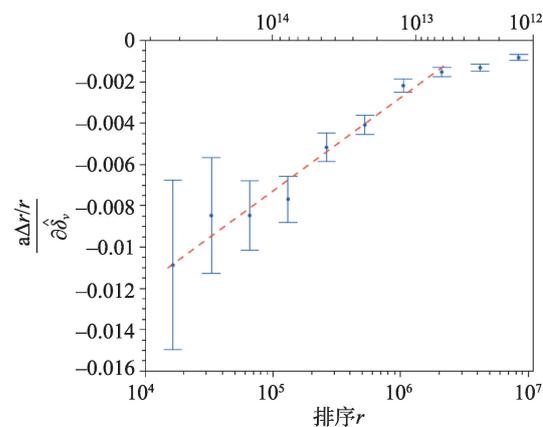


图2 Differential neutrino condensation效应。在中微子“富”区域的halo会凝聚中微子,从而更深的引力势会聚集更多的暗物质形成质量更大的halo。这种中微子凝聚效应在质量更大的halo上更明显

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<sup>1</sup> 吴俊宝<sup>2,3</sup>

(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