宇宙学扰动理论研究获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/33806.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

宇宙学扰动理论研究获进展

。在宇宙学中，原初扰动如何从量子涨落演化为今日宏观宇宙结构，是连接理论与观测的核心问题。特别是在暴胀理论框架中，曲率扰动ζ起源于暴胀场的量子涨落，它被拉出哈勃视界尺度后趋于常数，之后在热宇宙阶段重入视界并决定宇宙中的光子温度和物质密度分布。某些曲率扰动较大的区域甚至会因自身引力而坍缩至奇点，形成密度高到连光也无法逃逸的时空结构，这就是原初黑洞。由于这类天体可能是构成宇宙中暗物质的主要成分，因此是当前宇宙学和天体物理学的研究热点。

长期以来，形式作为处理曲率扰动非线性演化的工具，应用于多种暴胀模型中。该方法基于分离宇宙假设——在超出哈勃视界的尺度上，梯度相关项迅速衰减，因此每个观测者所在的哈勃片区即“小宇宙”可认为是独立演化的、空间平坦的弗里德曼宇宙。形式告诉我们，这样一个“小宇宙”的曲率扰动正好等于局域膨胀指数相对于背景值的偏差，即。而是出视界时刻暴胀场初值的函数，因此在所有“小宇宙”上呈现随机分布。这种方法由Sasaki等提出，已成为早期宇宙学的理论支柱之一。

然而，近年来的研究表明，在某些暴胀模型中，传统的形式可能失效。原因在于，在这些非吸引子阶段，扰动在出视界后仍持续演化，空间梯度项在长时间内无法忽略，导致分离宇宙假设失效，形式也无法立即适用。如果等待梯度项完全衰减再使用形式，则需要数值求解超视界尺度的暴胀场的非线性演化，形式的便捷性完全丧失。

为突破这一限制，中国科学院理论物理研究所研究员皮石与日本京都大学研究人员合作，提出了“拓展的形式”。该方法突破“小宇宙”的空间平坦性，在框架中引入每个“小宇宙”的空间曲率项K作为扰动演化的初始条件之一。研究显示，通过选取初始等时超曲面的规范，可将暴胀场扰动的梯度信息吸收到空间曲率的初始条件中，进而保留其对扰动超视界演化的影响。研究发现，通过这一方式，新的形式可以直接从扰动出视界的时刻起，持续精确地描述曲率扰动的演化过程，而无需等待梯度项的缓慢衰减。

该研究以Starobinsky线性势模型为例开展研究。解析计算和数值结果对比表明，新方法在精度和效率上优于传统方法。同时，该方法还可用于计算扰动的非高斯性。结果显示，在超慢滚阶段，非线性参数，符合皮石与Sasaki于2023年提出的“对数对偶”的结果。这表明，该方法可直接用于计算曲率扰动的概率分布和原初黑洞的形成率，并有望为相关研究提供更可靠的理论工具。

此次拓展形式的提出，标志着这一基础宇宙学工具的重要升级，拓展了其理论适用范围，也为原初黑洞形成、诱导引力波产生等前沿唯象问题的研究开辟了新路径。

相关研究成果发表在《物理评论快报》（*Physical Review Letters*）上。研究工作得到国家重点研发计划和国家自然科学基金等的支持。

研究团队单位：理论物理研究所

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发