

研究揭示宇宙学一阶相变新方法

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/21906.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！

研究揭示宇宙学一阶相变新方法

许多粒子物理和天体物理宇宙学的观测均预示着目前描述物质微观结构的粒子物理标准模型是不完备的。搜寻超出粒子物理标准模型的新物理的信号是当前粒子物理和宇宙学观测的重要科学问题之一。较多超出粒子物理标准模型的新物理模型都预言了宇宙演化过程中会发生一阶相变。随着宇宙膨胀和温度降低，高能标下的对称性发生自发破缺，相关的量子场从假真空通过量子隧穿到真真空，导致真空泡泡不断涌现并长大，假真空中的能量不断转移到泡壁和背景流体中，类似生活中的过冷水结冰现象。随后，膨胀的真空泡泡会相互碰撞，造成能量密度的大幅度扰动。作为早期宇宙中发生的剧烈过程，一阶相变会产生一系列可观测效应，包括随机引力波背景、原初磁场、重子不对称性等。这使科学家有望通过天文和宇宙学的观测来探测或限制新物理。探测宇宙一阶相变相伴产生的引力波也是较多引力波探测计划的主要科学目标之一。

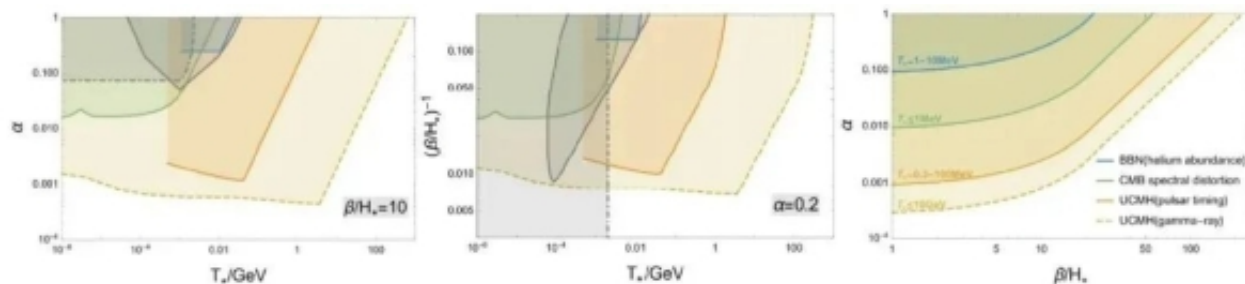
近日，中国科学院大学国际理论物理中心（亚太地区）博士后刘京、重庆大学边立功副研究员，以及中科院理论物理研究所研究员蔡荣根、郭宗宽和博士后王少江，提出了一个原初黑洞形成的新机制，并利用天文观测数据对一阶相变的性质给出了严格的限制。由于真空隧穿的随机性，不同区域内假真空衰变的进度不同。研究注意到假真空内的能量密度几乎不随宇宙膨胀改变，而其他物质组分能量密度如辐射和冷物质均会随宇宙膨胀迅速降低。因此，在相变结束后，较晚衰变的区域中能量密度较高。也就是说，宇宙学一阶相变会诱导能量密度扰动。这些较高能量密度的区域通过引力坍塌导致原初黑洞形成。这些原初黑洞的质量谱几乎是单色的。相关成果以快报（Letter）的形式，发表在Physical Review D【105 (2022) L021303】上。通过这一机制形成的原初黑洞和相伴的引力波可以解释LIGO-Vergo合作组观测到的黑洞并合率，也可以解释北美纳赫兹引力波天文台（NANOGrav）观测到的信号。

研究发现，一阶相变会诱导产生超视界曲率扰动，并可以通过对宇宙小尺度曲率扰动的观测来探测和限制相变的性质。研究显示，通过量子隧穿理论可以得到单位时间单位体积内真空泡泡的产生几率。相变结束后，由于尺度大于相变时间乘以光速的区域彼此没有因果联系，因果律要求曲率扰动的能量谱正比于波数的三次方。如果考虑超视界尺度，相变诱导的曲率扰动可以在小尺度远超过宇宙早期暴胀产生的原初扰动，而被很多天文观测实验所探测，包括宇宙微波背景辐射温度各向异性和谱畸变以及超密暗晕的数密度等。反过来说，科学家可以通过这些天文观测提供的曲率扰动功率谱的上限来对相变性质给出限制。

研究得到了一阶相变诱导的曲率扰动功率谱，并首次通过天文观测的曲率扰动上限给出了相变参数的严格限制。相关成果发表在Physical Review Letters【130 (2023) 051001】上。如图所示，该工作得到了对电弱能标及以下所有宇宙学一阶相变的限制。被限制的相变参数包括相变强度 ϕ ，相变速率 $\dot{\phi}/H^*$ 和相变温度 T^* ，这些限制来自原初核合成过程（蓝线）、宇宙微波背景辐射谱畸

变（绿线）和超密暗晕的数密度（橙实线来自脉冲星计时，橙虚线来自伽马射线探测）给出的曲率扰动的上限。该成果拓展了此前通过随机引力波背景（灰色实线）和原初核合成探测（灰色点虚线）对QCD一阶相变、低能标暗相变和某些电弱相变参数空间的限制，尤其对低能标相变和慢相变给出了很强的限制。

研究工作得到国家自然科学基金、科技部和中科院的支持。



对曲率扰动的不同观测实验对相变参数空间的限制，其中， βH_* 代表相变的强度， T_*/H_* 代表相变的速率， T_* 为相变的温度。左图和中图里灰色实线和灰色点虚线为通过引力波和原初核合成对相变参数空间的限制。

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](https://www.iikx.com)转发