

---

# 探寻量子引力中的洛伦兹与CPT对称性破缺——弦理论视角下的天体物理探针 MDPI Symmetry

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36665.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！*

探寻量子引力中的洛伦兹与CPT对称性破缺——弦理论视角下的天体物理探针 MDPI Symmetry。论文标题：Probes for String-Inspired Foam, Lorentz, and CPT Violations in Astrophysics

论文链接：<https://www.mdpi.com/2073-8994/17/6/974>

期刊名称：Symmetry

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/symmetry>

洛伦兹不变性作为现代物理学的基石之一，在狭义相对论和粒子物理标准模型中都扮演着重要角色。然而，量子引力理论(如弦理论、圈量子引力等)普遍预言，在普朗克尺度(约为10-35米)下，时空可能呈现泡沫状结构，从而引发洛伦兹不变性乃至CPT(电荷-宇称-时间)对称性的破缺。这种效应虽极其微弱，但通过对高能天体物理现象的观测，人们或许能捕捉到它们的踪迹。来自北京大学物理学院的马伯强教授(现为郑州大学特聘教授)与其博士后李成翊在Symmetry期刊发表综述文章，系统梳理了该领域近年来的关键进展，着重总结了弦理论启发的时空泡沫模型如何为当前伽马射线与中微子天文观测中的洛伦兹破缺信号提供自洽解释，进而提供量子引力存在的可能迹象。

研究内容与结果

弦论中的时空泡沫与对称性破缺

作者在文中指出，许多试图统一广义相对论与量子理论的量子引力模型都预言，普朗克尺度下的时空可能具有泡沫状微观结构，即时空泡沫(space-time foam)，从而破坏经典相对论时空的洛伦兹不变性。时空本身会成为一种色散介质，使得真空光速不再恒定。文章重点介绍了一类基于D膜(D-brane)的弦理论泡沫模型，称为D泡沫(D-foam)。该模型假设我们的宇宙是一张嵌入高维空间的三维膜。高维时空背景中存在的大量点状D粒子缺陷会与传播中的光子、中微子等中性粒子发生相互作用，导致粒子在真空中的传播速度产生能量依赖的修正，表现为真空的反常色散或折射效应，进而引发粒子在传播过程中出现时间延迟或提前。这类模型有几个关键特征：其一，光子传播始终亚光速，不发生双折射效应(即螺旋度无关)，造成的延迟被弦标度 $M_s$ 线性压低。

---

$$\Delta t^{\text{D-foam}} \sim L\delta(k^0) \sim \frac{E}{M_s} n_D L,$$

与某些有效场论模型的预言显著不同；其二，中微子与反中微子的传播有可能破坏CPT；其三，D泡沫对带电粒子(如电子)透明，从而保持后者的洛伦兹不变性。这种对粒子种类的选择性作用(破坏等效原理)，使得该模型在应对多种天体物理约束时表现出独特的优势。

### 高能宇宙光子和中微子的速度变化

文章详细回顾了近年来Fermi(费米望远镜)、LHAASO(高海拔宇宙线观测站)、IceCube(冰立方中微子天文台)等合作组在伽马射线暴、活动星系核及高能中微子方面的观测实验。通过对多红移来源的光子到达时间数据的分析，研究人员发现，在剔除源内禀发射时间的影响后，高能光子在宇宙真空中的传播相较于低能光子存在延迟，传播速度与光子能量呈线性关系，对应的洛伦兹破缺能标约为 $3 \times 10^{17}$  GeV，接近普朗克能标(约为 $10^{19}$  GeV)。这一现象与D泡沫模型的预言(1)高度一致。值得注意的是，人们在迄今最亮伽马暴GRB 221009A中观测到的TeV量级光子为此类唯象信号提供了更强的证据。另一方面，有研究表明，IceCube探测到的若干高能中微子事件与伽马射线暴在时间上存在关联，并表现出类似的洛伦兹破坏迹象。与光子不同的是，其传播速度可能发生超光速或亚光速修正，且与反中微子行为相反，暗示CPT破缺的可能性。D泡沫的随机涨落图景可自然给出这一效应，同时能够避免通常情况下超光速(反)中微子不稳定的问题。不过，作者也指出，近期基于IceCube数据修正后的分析可能进一步支持中微子传播的亚光速倾向。这与某些D泡沫模型的预测相符。

### 来自其他天体物理观测的启示

任何试图解释宇宙光子和中微子速度变化与时间延迟效应的量子引力模型，都必须同时满足其他类型的天体物理限制。时空洛伦兹破缺的互补性检验包括对光子自发衰变、电子真空切伦科夫效应、同步辐射谱反常等现象的测量。作者在文中强调，基于有效场论的洛伦兹破缺模型作为量子引力唯象学领域最热门的理论框架，由于其线性阶修正会导致光子双折射以及超光速中微子的不稳定性，已被观测数据严格限制。而D泡沫模型因不引入双折射、不破坏带电粒子(及其构成的非基本粒子)的洛伦兹不变性，且在某些情况下可通过(粒子间相互作用过程的)能量不守恒机制避免中微子衰变，从而能够较好地兼容各类现有约束。例如，LHAASO对PeV光子的观测结果对光子衰变过程施加了极强的限制，在一定程度上排除了超光速传播模型，而光子在D泡沫中的亚光速行为可以自然规避这一问题。对蟹状星云电磁辐射、超高能宇宙线及GZK截断的测量则分别为电子/正电子等带电轻子、质子和介子等带电或不带电强子的洛伦兹不变性提供了强有力的支持，符合该理论的预期。此外，上述泡沫效应不依赖中微子味道，故不产生某些理论所预言的中微子振荡异常，与现有实验相一致。

### 结论与展望

本文指出，弦理论启发的D泡沫模型为当前天体物理中可能的洛伦兹与CPT破坏现象提供了一个自洽且可检验的理论框架。该模型不仅能够统一解释高能宇宙光子与中微子的(线性)能量依赖传播延迟与速度变化，还能自然规避其他多种物理过程的严格约束，显示出其在量子引力唯象学中

---

的独特价值。随着LHAASO、IceCube等现役实验装置的持续运行，未来将有更多高能光子和中微子数据被积累，从而为检验这类模型提供更为坚实的观测基础。此外，结合多信使天文学方法，如同时分析光子、中微子乃至引力波等信号，人们将有可能在更广阔的能段和更远的宇宙距离上检验时空的基本对称性，并有望在量子引力理论的发展中迈出关键一步。

原文出自Symmetry 期刊

Li, C.; Ma, B.-Q. Probes for String-Inspired Foam, Lorentz, and CPT Violations in Astrophysics. Symmetry 2025, 17, 974.

<https://www.mdpi.com/2073-8994/17/6/974>

Symmetry 期刊介绍

主编：Sergei D. Odintsov, Institute of Space Sciences (IEEC-CSIC), Spain

荣誉主编：蔡荣根教授，宁波大学，中国；张继平教授，北京大学，中国

Symmetry (ISSN 2073-8994) 是一个国际化、经同行评审的开放获取期刊。期刊主题涵盖了所有科学研究中有关对称/非对称现象的理论和应用研究，主要包括数学、计算机、物理学、生命科学、化学以及工程与材料等领域的最新进展。期刊已被 Scopus、SCIE (Web of Science)、CABIus/SciFinder 等多家知名数据库收录。期刊目前最新影响因子是 (Impact Factor) 为2.2，在多学科领域位列2区。

2024 Impact Factor 2.2 2024 CiteScore 5.3 Time to First Decision 17.1 Days Acceptance to Publication 2.8 Days

来源：Symmetry

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