

粒子宇宙学与引力波

余钊焕

中山大学物理学院

<https://yzhxxzxy.github.io>

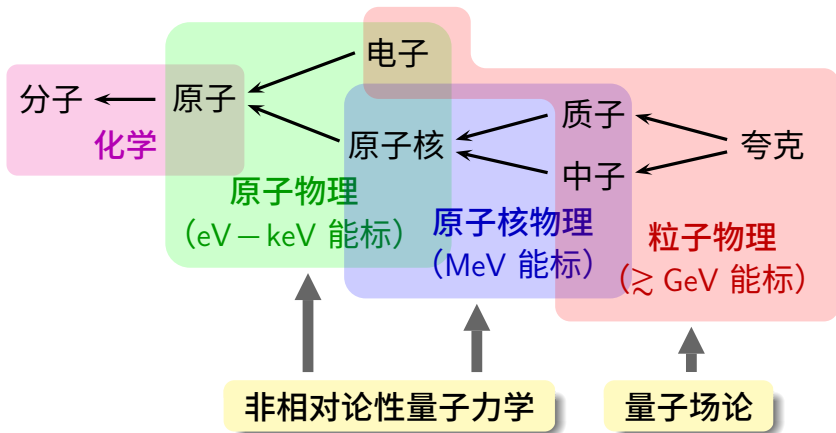


2026 年 7 月 9 日

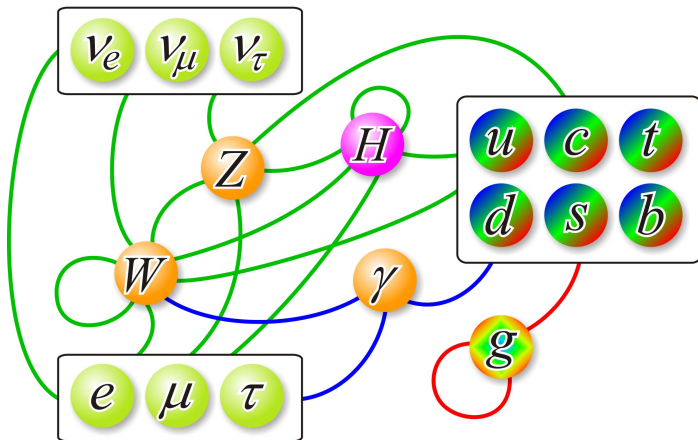


粒子物理学

 **粒子物理学**，也称为**高能物理学**，是研究物质的**基本结构**和**基本相互作用**的科学，理论基础是结合**量子力学**和**狭义相对论**的**量子场论**



粒子物理标准模型



研究基本粒子间**强**、**电磁**、**弱**相互作用建立起来的**量子色动力学**和**电弱规范理论**，合起来称为粒子物理**标准模型**，它是一个 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 规范场论

标准模型的问题与新物理

✓ **标准模型**在解释基本粒子相互作用方面非常成功，其预言与大多数实验结果相符

🚨 但是，标准模型也存在不少**问题**，为解决这些问题，许多**新物理理论**被提出来

- 1 不能解释**中微子的微小质量** 📌 **跷跷板机制**
- 2 不能解释宇宙中的**暗物质**和**暗能量** 📌 **暗物质模型、暗能量模型**
- 3 不能解释宇宙的**正反物质不对称性** 📌 **重子创生机制、轻子创生机制**
- 4 存在**太多耦合和质量参数** 📌 **大统一理论、味物理模型**
- 5 存在**强 CP 问题** 📌 **Peccei-Quinn 机制** 📌 **轴子**
- 6 存在**等级问题** 📌 **超对称、额外维**

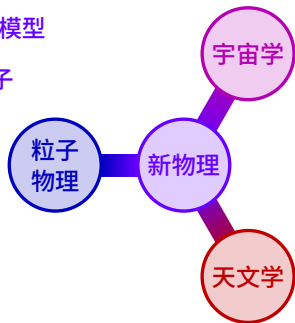
标准模型的问题与新物理

✅ **标准模型**在解释基本粒子相互作用方面非常成功，其预言与大多数实验结果相符

🚨 但是，标准模型也存在不少**问题**，为解决这些问题，许多**新物理理论**被提出来

- ❶ 不能解释**中微子的微小质量** 🖱️ **跷跷板机制**
- ❷ 不能解释宇宙中的**暗物质**和**暗能量** 🖱️ **暗物质模型、暗能量模型**
- ❸ 不能解释宇宙的**正反物质不对称性** 🖱️ **重子创生机制、轻子创生机制**
- ❹ 存在**太多耦合和质量参数** 🖱️ **大统一理论、味物理模型**
- ❺ 存在**强 CP 问题** 🖱️ **Peccei-Quinn 机制** 🖱️ **轴子**
- ❻ 存在**等级问题** 🖱️ **超对称、额外维**

🤝 这些**新物理理论**预言了**新的场、粒子和相互作用**，为各类**粒子物理实验**、**宇宙学实验**和**天文学实验**上提供了许多可观测效应，促成**粒子物理学**、**宇宙学**和**天文学**的交叉融合



引力波



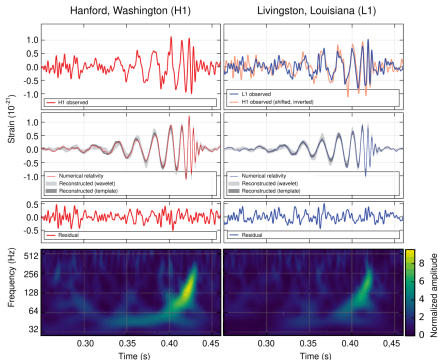
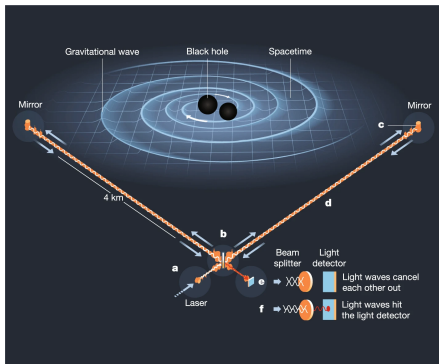
1916 年，爱因斯坦证明**广义相对论**中存在**引力波**



2015 年 9 月，**激光干涉仪实验 LIGO** 首次探测到**黑洞双星并合**产生的**引力波**



引力波作为一种**新的信使**，为探索**新物理**和**宇宙早期历史**提供了一条崭新的路径



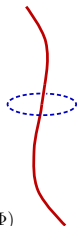
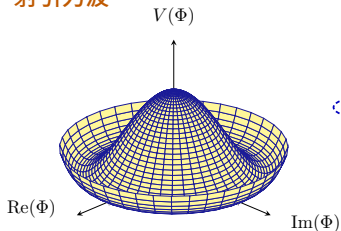
[LIGO & Virgo Coll., PRL **115**, 061102 (2016)]

拓扑缺陷

在一些包含**标量场**的**新物理理论**中，发生**对称性自发破缺**时，如果**真空流形**具有**非平庸**的**拓扑同伦群**，就会在早期宇宙中形成一些**拓扑缺陷**

- 畴壁 (domain wall): 二维拓扑缺陷
- 宇宙弦 (cosmic string): 一维拓扑缺陷
- 单极子 (monopole): 零维拓扑缺陷

畴壁的运动和坍缩、宇宙弦的相对论性振动都会辐射引力波

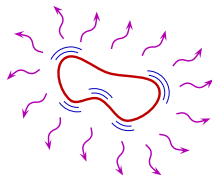
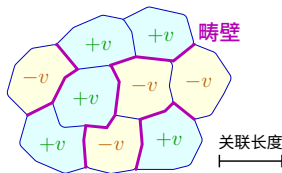
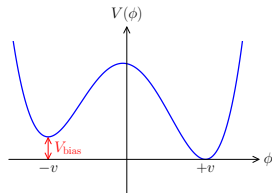


简并真空

$$v\Phi e^{i\varphi}/\sqrt{2}$$

绕一圈 $\Delta\varphi = 2\pi n$

$n \neq 0$ 引起宇宙弦



与赝南部-戈德斯通暗物质相关的宇宙弦引力波



我们引入 $U(1)_X$ 规范对称性以构建一个赝南部-戈德斯通暗物质的紫外完备模型

[DY Liu, CF Cai, XM Jiang, ZHY, HH Zhang, 2208.06653, JHEP]



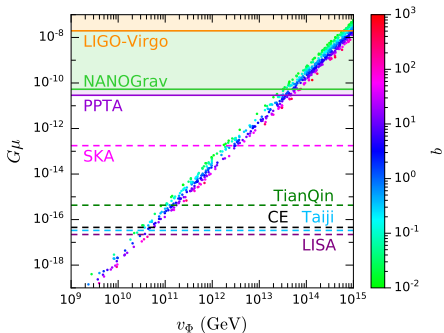
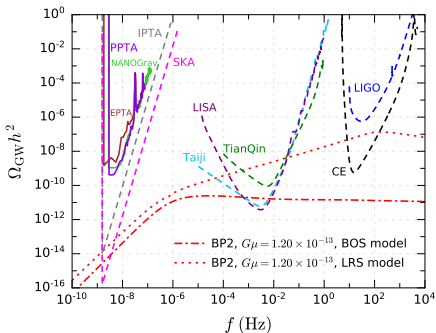
对暗物质寿命的实验限制要求 $U(1)_X$ 对称性破缺能标 $v_\Phi > 10^9$ GeV



$U(1)_X$ 对称性的自发破缺在早期宇宙中生成宇宙弦，进而产生随机引力波背景



计算表明未来引力波探测实验可以有效地探索这个模型的参数空间



[ZY Qiu, ZHY, 2304.02506, CPC]

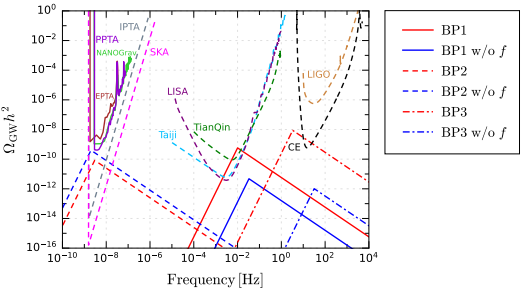
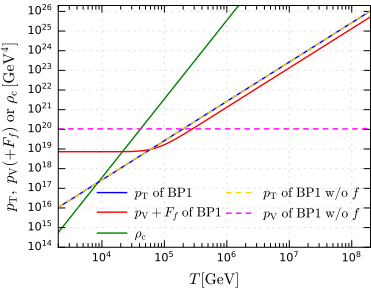
热浴费米子耦合对畴壁引力波频谱的影响

在以往的畴壁坍缩研究中，通常假设势能偏差项 V_{bias} 是常数

我们考虑热浴费米子与标量场的耦合对有效势的单圈量子修正和单圈热温修正

进而讨论 V_{bias} 的温度依赖性对畴壁湮灭温度 T_{ann} 的影响

计算结果表明这种影响有可能导致畴壁产生的随机引力波频谱发生显著的变化



[QQ Zeng, X Xi, ZHY, JM Zheng, 2501.10059, PRD]

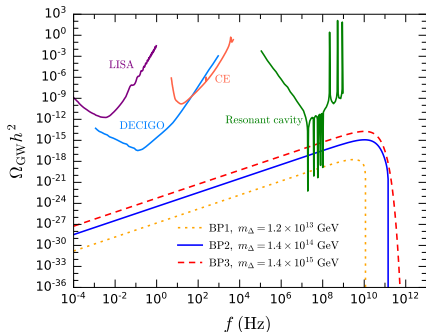
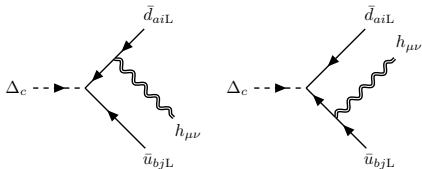
标量轻子夸克衰变中的引力子韧致辐射

由于量子引力效应，新物理理论中的超重粒子在早期宇宙中的衰变和散射过程会伴随发生引力子韧致辐射，从而形成留存至今的随机引力波背景

标量轻子夸克是大统一理论预言的一种同时耦合夸克和轻子的标量玻色子，会引起质子衰变，而质子衰变搜寻实验的零发现要求其质量大于 10^{13} GeV

我们研究标量轻子夸克在早期宇宙中的丰度，计算其衰变中的引力子韧致辐射

结果表明相应的随机引力波频谱有可能被未来电磁共振腔实验所探测



[QJ Wang, H Tong, ZHY, 2606.28699]

利用标量玻色子衰变来提升轻子生成效率



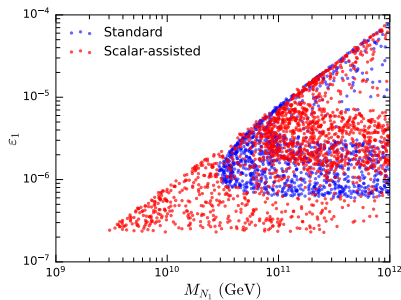
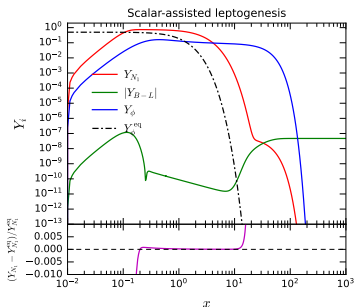
轻子生成机制通过右手中微子衰变来产生正反轻子不对称性，再通过电弱滑子过程将其转换为正反重子不对称性以解释宇宙中的正反物质不对称性



我们引入一种能够衰变到右手中微子的长寿命标量玻色子，它的非热平衡衰变为右手中微子提供一个额外来源，进而提升轻子生成过程的效率



结果表明，对右手中微子的质量要求可以降低 1 至 3 个数量级



[JY Tong, ZHY, HH Zhang, 2406.13468, JHEP]

总结

- 1 尽管**标准模型**在解释大多数粒子物理实验现象上非常成功，它仍然存在不少**问题**，许多**超出标准模型**的**新物理理论**被提出来解决这些问题
- 2 这些**新物理理论**在各类实验上预言了许多可观测效应，促成**粒子物理学**、**宇宙学**和**天文学**的交叉融合
- 3 近年来，我们在**粒子宇宙学**上开展了**宇宙弦**、**畴壁**、**引力子韧致辐射**、**轻子生成**等多方面**新物理**研究工作，预言了一些在**未来引力波实验**上可以探测的信号

总结

- 1 尽管**标准模型**在解释大多数粒子物理实验现象上非常成功，它仍然存在不少**问题**，许多**超出标准模型**的**新物理理论**被提出来解决这些问题
- 2 这些**新物理理论**在各类实验上预言了许多可观测效应，促成**粒子物理学**、**宇宙学**和**天文学**的交叉融合
- 3 近年来，我们在**粒子宇宙学**上开展了**宇宙弦**、**畴壁**、**引力子韧致辐射**、**轻子生成**等多方面**新物理**研究工作，预言了一些在**未来引力波实验**上可以探测的信号

谢谢大家！