利用引力波探索新物理

余钊焕

中山大学物理学院

https://yzhxxzxy.github.io

2025 年 3 月 23 日

基本粒子

- 基本粒子指没有发现内部结构的粒子
- 第一代、第二代、第三代费米子（自旋为 $1/2$）
  - 带电轻子：电子 (e)，μ 子 (μ)，τ 子 (τ)
  - 中微子：电子型中微子 (ν_e)，μ 子型中微子 (ν_μ)，τ 子型中微子 (ν_τ)
  - 上型夸克：上夸克 (u)，粲夸克 (c)，顶夸克 (t)
  - 下型夸克：下夸克 (d)，奇夸克 (s)，底夸克 (b)
- 矢量玻色子（自旋为 1）
  - 电弱规范玻色子：光子 (γ)，$W^\pm$，Z^0
  - 强规范玻色子：8 种胶子 (g)
- 标量玻色子（自旋为 0）：Higgs 玻色子 (H^0)

基本粒子的相互作用

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

粒子物理标准模型

- 粒子物理**标准模型**是一个 $\mathbf{SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y}$ **规范场论**
- 模型中有三代费米子，每一代包含一种上型夸克、一种下型夸克、一种带电轻子和一种中微子，规范玻色子传递费米子间相互作用
- $\mathrm{SU(3)_C}$ 部分描述**强相互作用**，称为**量子色动力学**，规范玻色子是**胶子**
- $\mathrm{SU(2)_L \times U(1)_Y}$ 部分描述夸克和轻子的电磁和弱相互作用，称为**电弱规范理论**，理论中包含一个**希格斯场**，它引起规范群的**对称性自发破缺**，使 $\mathrm{SU(2)_L \times U(1)_Y}$ 群破缺为 $\mathbf{U(1)_{EM}}$ 群

基本粒子质量起源

🍔 电弱对称性破缺前，电弱理论中存在 4 个无质量的规范玻色子和 4 个希格斯场自由度；左手费米子和右手费米子都没有质量，具有不同量子数

🍕 破缺后，3 个规范玻色子与 3 个希格斯场自由度结合，从而获得质量，成为 $W^{\pm}$ 玻色子和 Z^0 玻色子，传递弱相互作用

🍰 剩下的 1 个无质量规范玻色子是光子，传递电磁相互作用

🥐 剩下的 1 个希格斯场自由度对应于 2012 年在 LHC 上发现的希格斯玻色子

希格斯玻色子

🍒 与希格斯场的汤川耦合导致左手和右手费米子组合成狄拉克费米子，并获得质量

🥨 在标准模型中，中微子没有右手分量，因而没有获得质量

大爆炸宇宙学

- 约 138 亿年前，宇宙处于**极度炽热、稠密、均匀**的状态
- 宇宙中所有粒子通过相互作用彼此处于**热平衡态**
- 随宇宙膨胀和冷却，各种成分逐一**退耦**，脱离热平衡
- 逐步形成原子核、原子、恒星、星系

宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB)

$t \sim 380\ 000$ yr, $T \sim 3000$ K

电子 + 原子核 → 原子

光子退耦

👇 冷却到今天

2.7 K 宇宙微波背景

宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB)

$t \sim 380\ 000$ yr, $T \sim 3000$ K
电子 + 原子核 → 原子
光子退耦

👇 冷却到今天

2.7 K 宇宙微波背景

🎯 拟合宇宙微波背景各向异性功率谱，确定当前宇宙中的冷暗物质比例 Ω_c、重子物质比例 Ω_b 和暗能量比例 Ω_Λ

Planck 2018
[1807.06205, 1807.06209]

冷暗物质 (26.5%)
$\Omega_c h^2 = 0.1200 \pm 0.0012$

重子物质 (4.9%)
$\Omega_b h^2 = 0.02237 \pm 0.00015$

暗能量 (68.6%)
$\Omega_\Lambda = 0.6847 \pm 0.0073$

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
- ♈ 标准模型不能解释**中微子**的**微小质量**
  - 💚 可通过各类**跷跷板机制** (seesaw mechanism) 来解释

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
- ♈ 标准模型不能解释**中微子**的**微小质量**
  - 💚 可通过各类**跷跷板机制** (seesaw mechanism) 来解释
- ♉ 标准模型不能解释宇宙中的**暗物质**和**暗能量**
- ♊ 标准模型不能解释宇宙的**正反物质不对称性**
  - ❤️ 可通过**重子创生** (baryogenesis) 机制或**轻子创生** (leptogenesis) 机制解释

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
- ♈ 标准模型不能解释**中微子**的**微小质量**
  - 💚 可通过各类**跷跷板机制** (seesaw mechanism) 来解释
- ♉ 标准模型不能解释宇宙中的**暗物质**和**暗能量**
- ♊ 标准模型不能解释宇宙的**正反物质不对称性**
  - ❤️ 可通过**重子创生** (baryogenesis) 机制或**轻子创生** (leptogenesis) 机制解释
- ♋ 标准模型中存在**强 CP 问题**
  - 🧡 解决强 CP 问题的 **Peccei–Quinn 机制**预言了**轴子**，它是一种**暗物质候选粒子**
- ♌ 标准模型中存在**等级问题** (hierarchy problem)
  - 💜 可在**超对称**、**额外维**等新物理理论中解决，并自然地预言 **WIMP 暗物质**
- ♍ 标准模型有**许多耦合和质量参数**
  - 💙 **大统一理论**可在高能标处统一耦合和质量

引力波

- 1916 年，爱因斯坦证明广义相对论中存在引力波
- 大质量物体的非球对称运动会改变时空曲率并辐射引力波
- 引力波经过时，两个探测器之间的距离会发生周期性增加和减小
- 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

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

引力波实验

- 当前和未来的各类引力波探测实验
- 脉冲星计时阵列：NANOGrav、EPTA、PPTA、CPTA、IPTA、SKA
- 空间激光干涉仪：LISA、天琴、太极、BBO、DECIGO
- 地面激光干涉仪：LIGO、Virgo、KAGRA、CE、ET

nHz 频段随机引力波背景的迹象

🔭 2023 年 6 月，4 个**脉冲星计时阵列**实验组 **NANOGrav** [2306.16213, 2306.16219, ApJL]、**CPTA** [2306.16216, RAA]、**PPTA** [2306.16215, ApJL] 和 **EPTA** [2306.16214, 2306.16227, A&A] 在 nHz 频段观测到**随机引力波背景**的强烈迹象，测量了相关的**Hellings-Downs 关联曲线**

[NANOGrav Coll., 2306.16213]

🌾 可能的**引力波源**包括

- 🫐 **超大质量黑洞双星**
- 🍈 **暴胀引力波**
- 🍉 **标量扰动引起的引力波**
- 🍌 **强一级相变**
- 🍆 **宇宙弦**
- 🥥 **坍缩的畴壁**

[NANOGrav Coll., 2306.16219]

宇宙学相变

- 由于有效势的热温修正，场论中发生自发破缺的对称性会在温度较高时得到恢复
- 在宇宙历史中，对称性自发破缺体现为宇宙学相变
- 在标准模型中，根据测量到的参数值，电弱相变只体现为平滑过渡 (crossover)

宇宙学相变

- 由于有效势的热温修正，场论中发生自发破缺的对称性会在温度较高时得到恢复
- 在宇宙历史中，对称性自发破缺体现为宇宙学相变
- 在标准模型中，根据测量到的参数值，电弱相变只体现为平滑过渡 (crossover)
- 在一些新物理理论中，则可能发生较强的一级电弱相变，这也是电弱重子创生机制的必要条件

强一级相变导致的引力波

- 强一级相变会在宇宙中产生泡泡 (bubble)，泡泡的内部为真真空，外部为假真空
- 泡泡碰撞、泡泡与等离子体相互作用引起的声波和湍流都会产生显著的引力波

[X Wang, FP Huang, XM Zhang, 2003.08892, JCAP]

赝南部－戈德斯通暗物质与相变引力波

☃️ 在一类包括**赝南部－戈德斯通暗物质**和**双希格斯二重态**的**新物理模型** [XM Jiang, CF Cai, **ZHY**, YP Zeng, HH Zhang, 1907.09684, PRD] 中，我们找到一些能够引起**强一级电弱相变**的参数点，并研究相应的**随机引力波信号**

[Z Zhang, CF Cai, XM Jiang, YL Tang, **ZHY**, HH Zhang, 2102.01588, JHEP]

拓扑缺陷

在发生**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**

用畴壁解释 nHz 随机引力波迹象

⛰️ 随着宇宙膨胀，畴壁能量密度的下降速度比辐射和物质都要慢，导致稳定的畴壁会迅速地**主导**宇宙总能量，与宇宙学观测结果**抵触**，因此必须让畴壁不稳定

🤺 可在相应标量场势能中加入**偏差项** $V_{\rm bias}$ 来提供作用到畴壁上的压力，使畴壁坍缩

⛷️ 我们利用坍缩的畴壁解释 2023 年脉冲星计时阵列实验观测到的**随机引力波迹象**，并用 **freeze-in** 暗物质与标量场的微弱耦合通过单圈图解释所需要的**极微小** $V_{\rm bias}$

[Z Zhang, CF Cai, YH Su, SY Wang, **ZHY**, HH Zhang, 2307.11495, PRD]

热浴费米子耦合对畴壁引力波频谱的影响

- 以往研究通常假设**势能偏差项** $V_{\rm bias}$ 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 $V_{\rm bias}$ 的**温度依赖性**对**畴壁湮灭温度** $T_{\rm ann}$ 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]

与赝南部－戈德斯通暗物质相关的宇宙弦引力波

- 我们引入 $\mathrm{U}(1)_\mathrm{X}$ **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 $\mathrm{U}(1)_\mathrm{X}$ **对称性破缺能标** $v_\Phi > 10^9$ GeV
- $\mathrm{U}(1)_\mathrm{X}$ **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]

早物质主导时期对宇宙弦引力波的影响

- 当前宇宙学观测证据来自**原初核合成** ($t \sim 0.01$–200 s) 之后的宇宙，之前的宇宙历史有可能与**标准的 ΛCDM 宇宙学模型**不同
- 在**光子退耦**之前，**电磁波不能自由传播**，而**引力波**却能将早期宇宙信息传递过来
- 我们考虑宇宙历史中存在一段**早物质主导时期**，讨论它对**宇宙弦引力波**的影响

[SQ Ling, **ZHY**, 2304.02506]

总结

1. 尽管粒子物理**标准模型**在解释大多数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. **引力波**的发现为我们提供了一种探索新物理的新型工具
3. 有些新物理理论会在早期宇宙中引起**强一级相变**、**畴壁**或**宇宙弦**，从而产生有可能被**引力波实验**探测到的**随机引力波背景**

总结

1. 尽管粒子物理**标准模型**在解释大多数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. **引力波**的发现为我们提供了一种探索新物理的新型工具
3. 有些新物理理论会在早期宇宙中引起**强一级相变**、**畴壁**或**宇宙弦**，从而产生有可能被**引力波实验**探测到的**随机引力波背景**

谢谢大家！