

利用引力波探索新物理

余钊煥

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

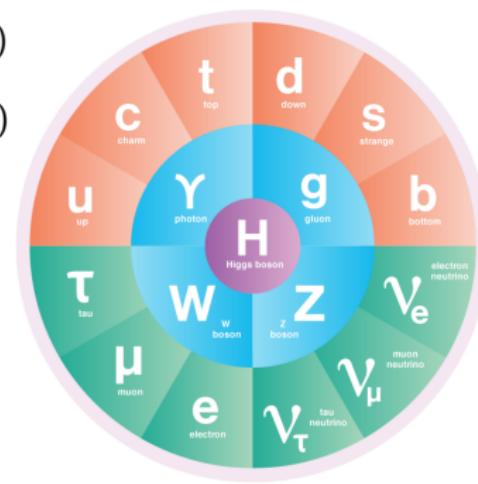
第一代、第二代、第三代费米子（自旋为 $1/2$ ）

- 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)

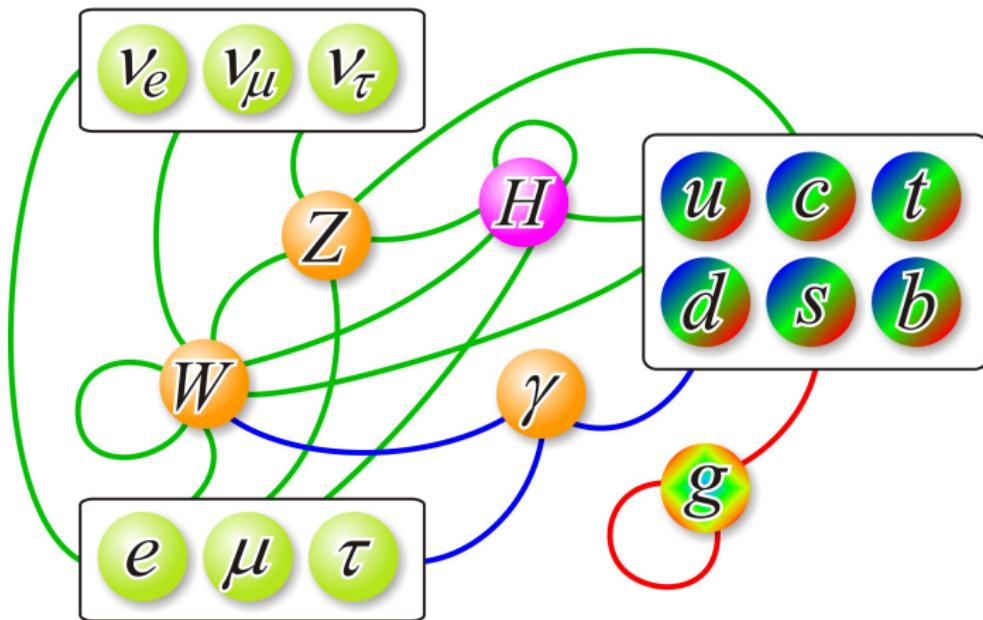
矢量玻色子（自旋为 1）

- 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**

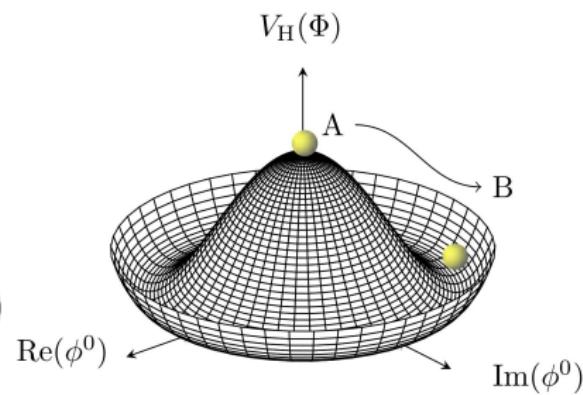
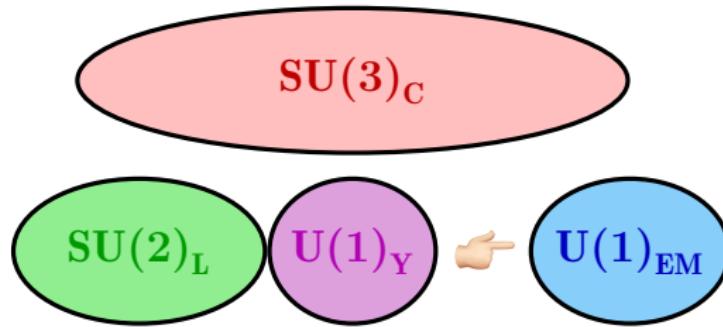
粒子物理标准模型

 粒子物理**标准模型**是一个 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 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

 $SU(3)_C$ 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**

 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 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 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 群破缺为 $U(1)_{EM}$ 群



基本粒子质量起源

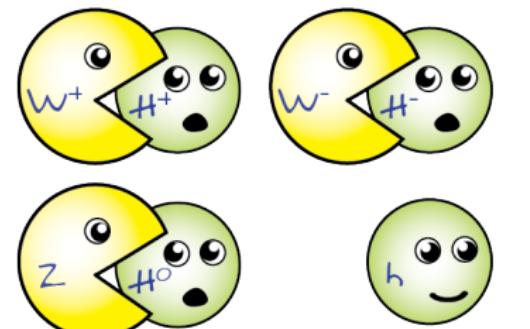
🍔 电弱对称性破缺前，电弱理论中存在 4 个无质量的规范玻色子和 4 个希格斯场自由度；左手费米子和右手费米子都没有质量，具有不同量子数

🍕 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

🍒 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



希格斯玻色子

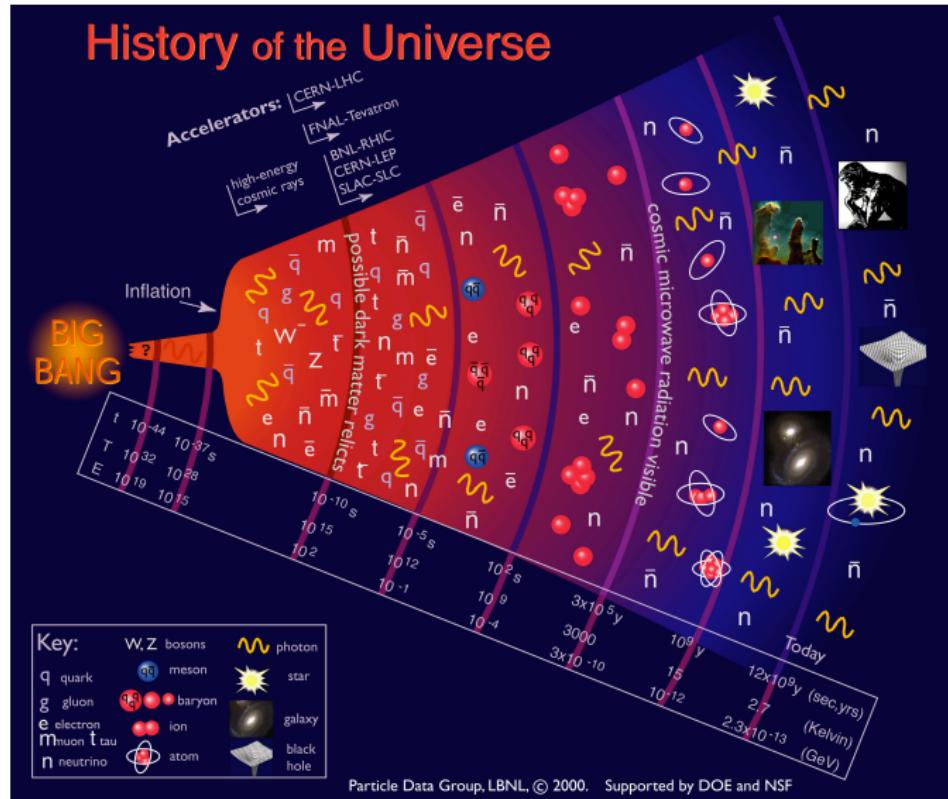
大爆炸宇宙学

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)

$t \sim 380\,000\text{ yr}$, $T \sim 3000\text{ K}$

电子 + 原子核 \rightarrow 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)

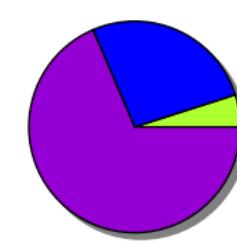
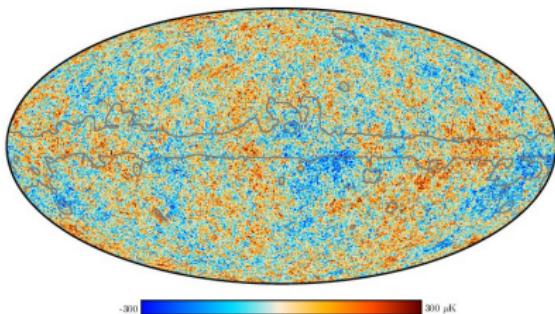
$t \sim 380\,000\text{ yr}$, $T \sim 3000\text{ K}$

电子 + 原子核 \rightarrow 原子
光子退耦



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%)

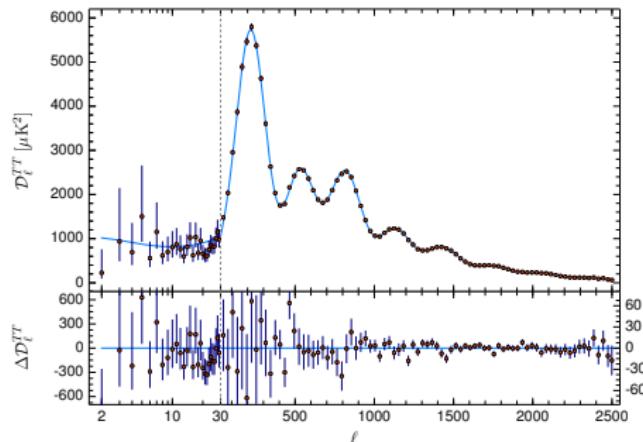
$$\Omega_c h^2 = 0.1200 \pm 0.0012$$

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

sos 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

sos 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

GREEN 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

sos 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

)V 标准模型不能解释中微子的微小质量

GREEN 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

Ⅱ 标准模型不能解释宇宙的正反物质不对称性

HEART 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

HEART 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

δ 标准模型中存在等级问题 (hierarchy problem)

HEART 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

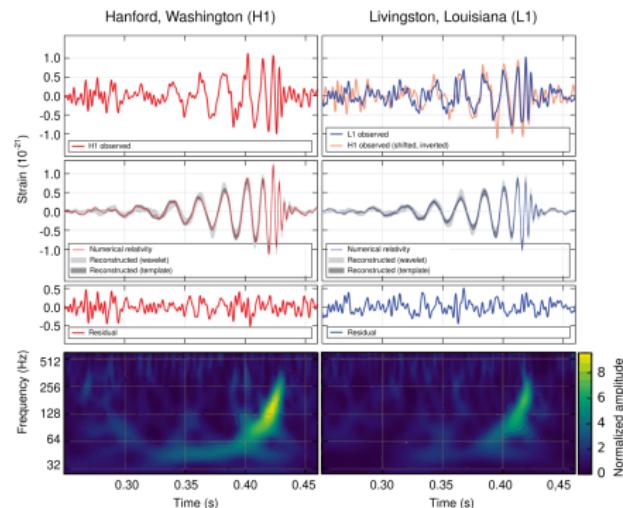
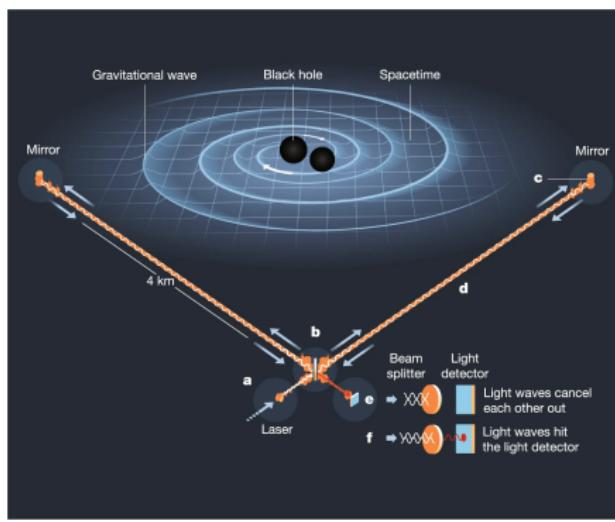


1916 年，爱因斯坦证明广义相对论中存在引力波

🌊 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

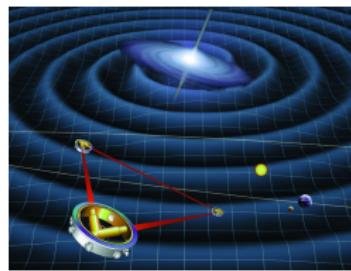
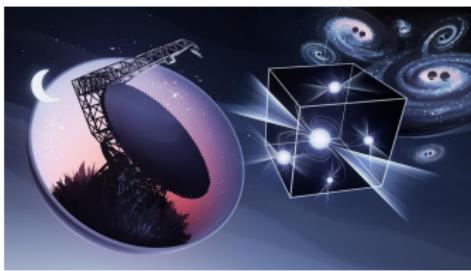
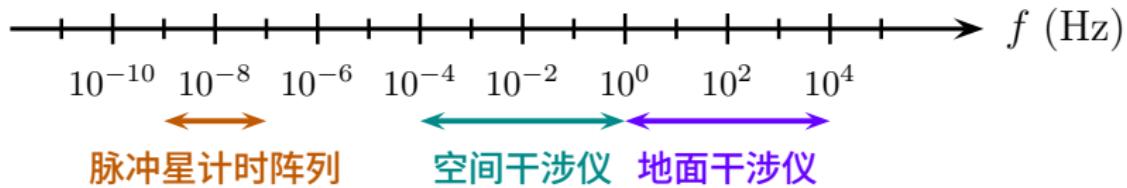


[LIGO & Virgo Coll., PRL 115, 061102 (2016)]

引力波实验

当前和未来的各类引力波探测实验

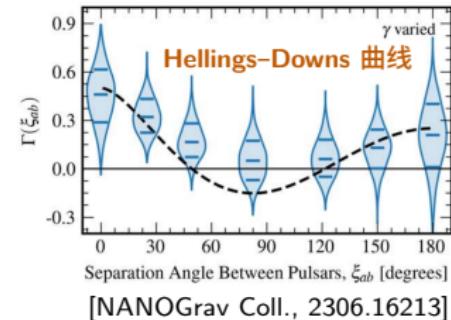
- 脉冲星计时阵列: NANOGrav、EPTA、PPTA、CPTA、IPTA、SKA
- 空间激光干涉仪: LISA、天琴、太极、BBO、DECIGO
- 地面激光干涉仪: LIGO、Virgo、KAGRA、CE、ET



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



可能的引力波源包括

超大质量黑洞双星

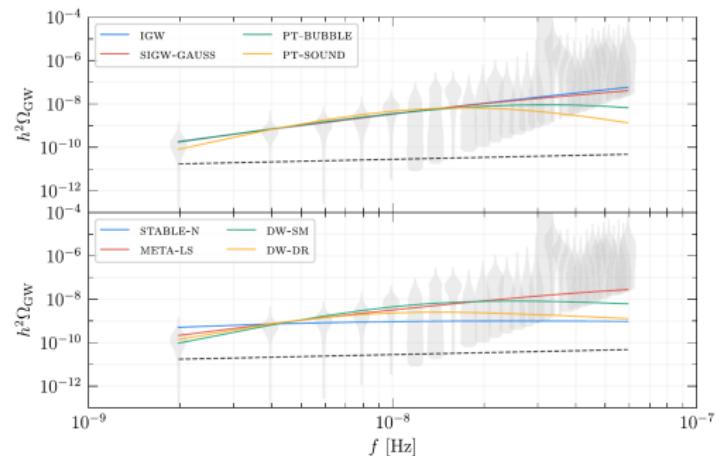
暴涨引力波

标量扰动引起的引力波

强一级相变

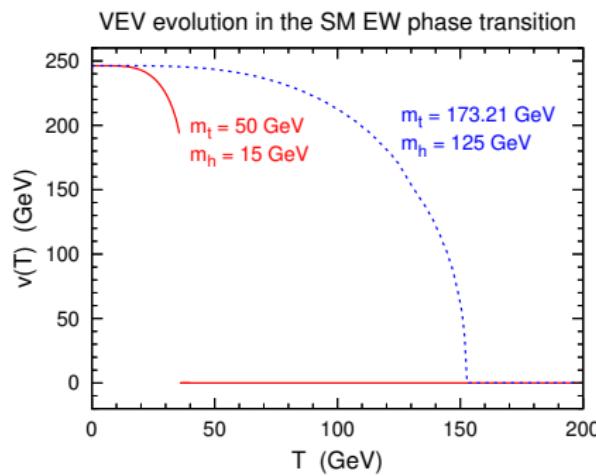
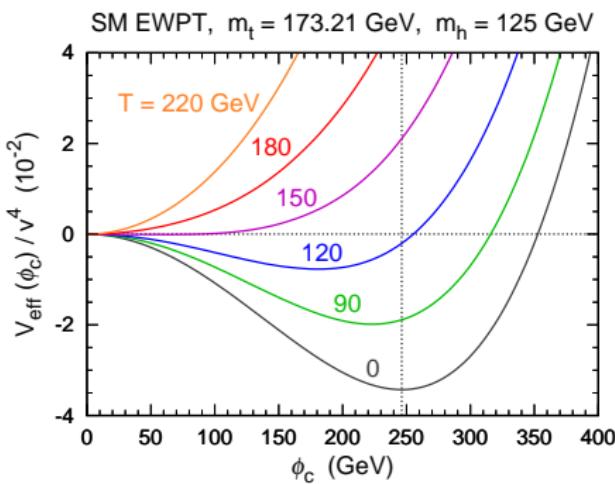
宇宙弦

坍缩的畴壁



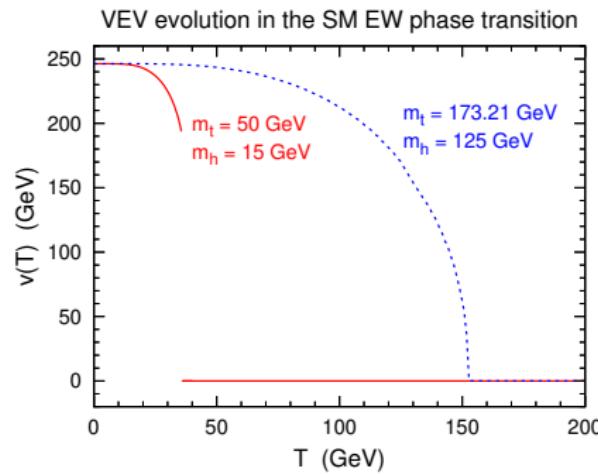
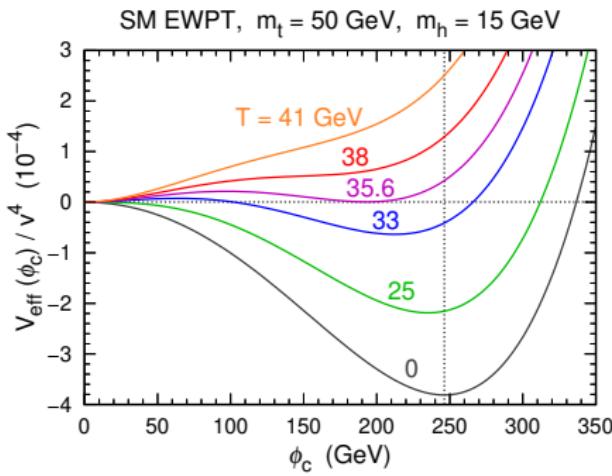
宇宙学相变

- 🔥 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
- weathermap 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）



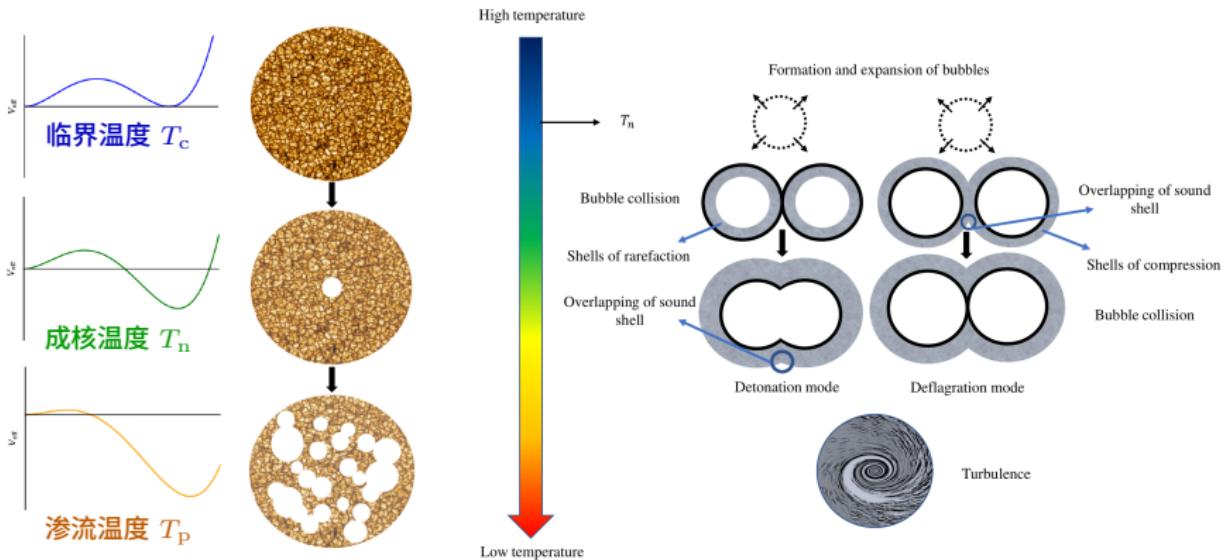
宇宙学相变

- 🔥 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
- weathermap 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**

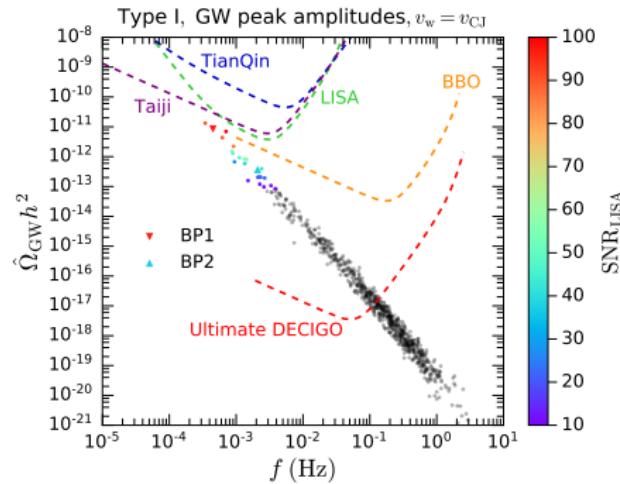
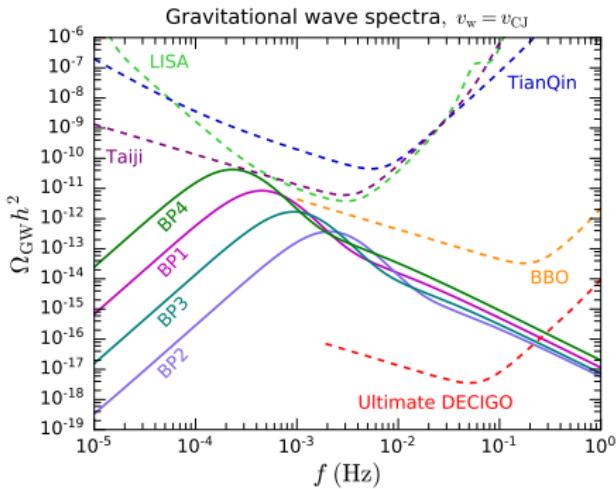


[X Wang, FP Huang, XM Zhang, 2003.08892, JCAP]

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**



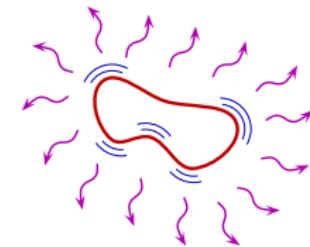
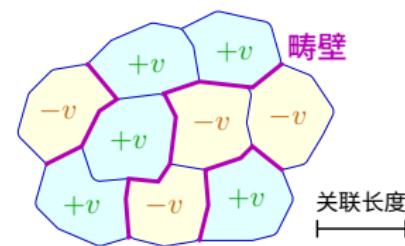
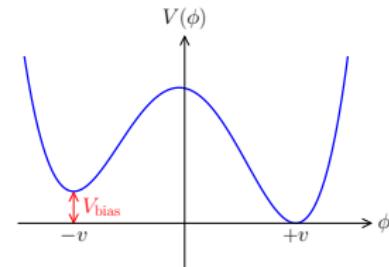
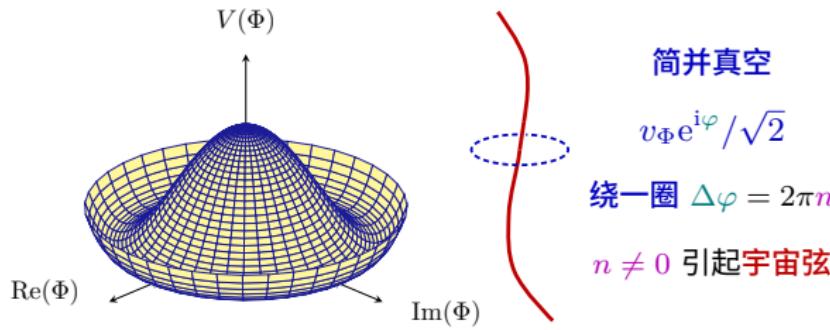
[Z Zhang, CF Cai, XM Jiang, YL Tang, ZHY, HH Zhang, 2102.01588, JHEP]

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

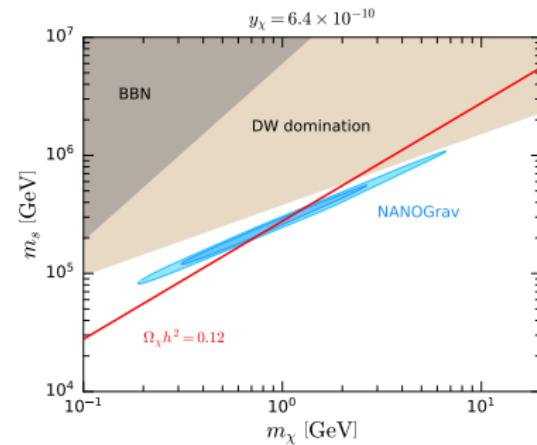
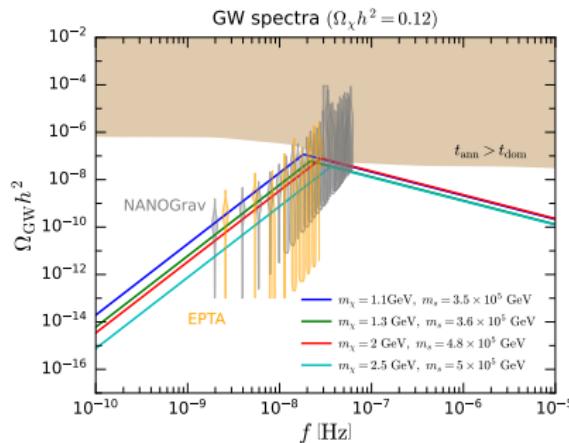


用畴壁解释 nHz 随机引力波迹象

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_{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_{bias}



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

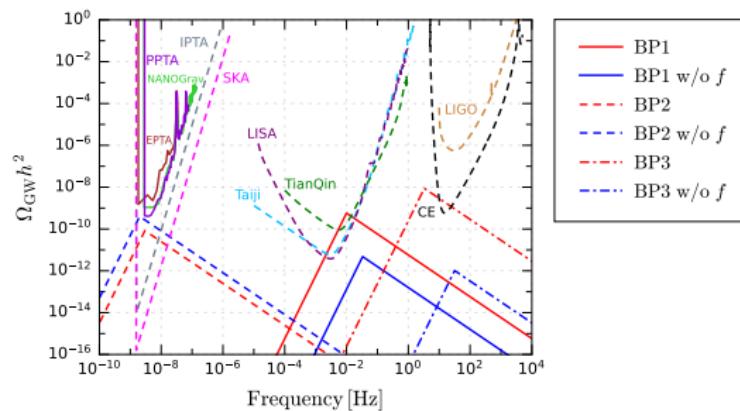
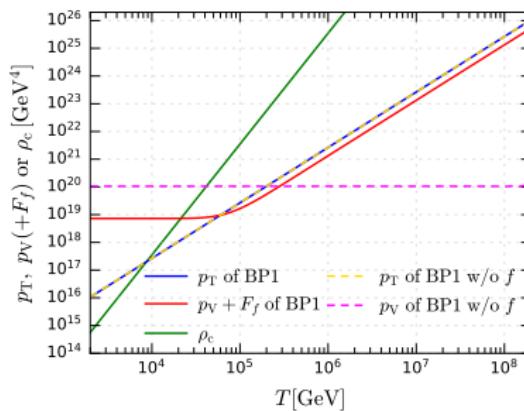
热浴费米子耦合对畴壁引力波频谱的影响

💡 以往研究通常假设势能偏差项 V_{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]

与赝南部-戈德斯通暗物质相关的宇宙弦引力波

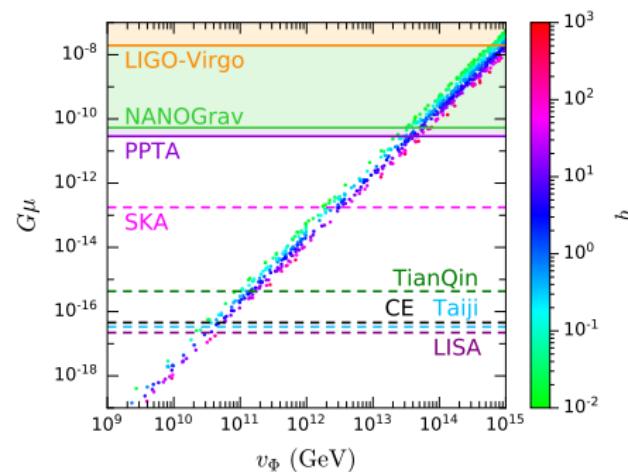
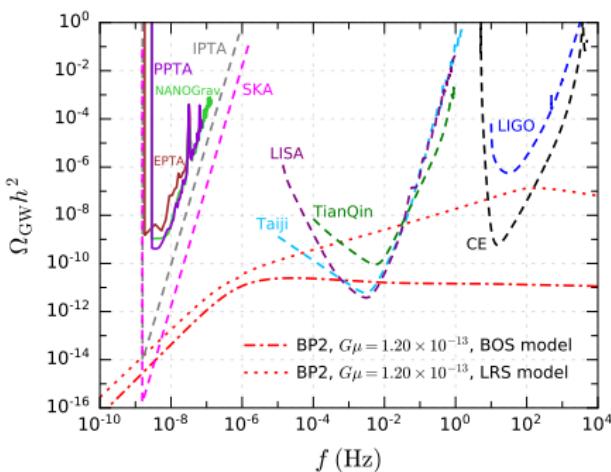
我们引入 $U(1)_X$ 规范对称性以构建一个赝南部-戈德斯通暗物质的紫外完备模型

[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

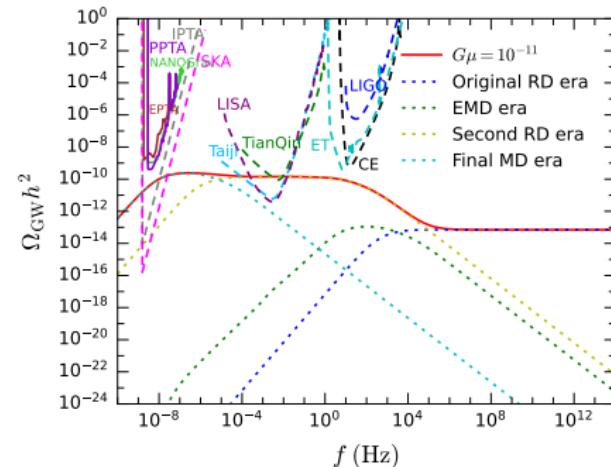
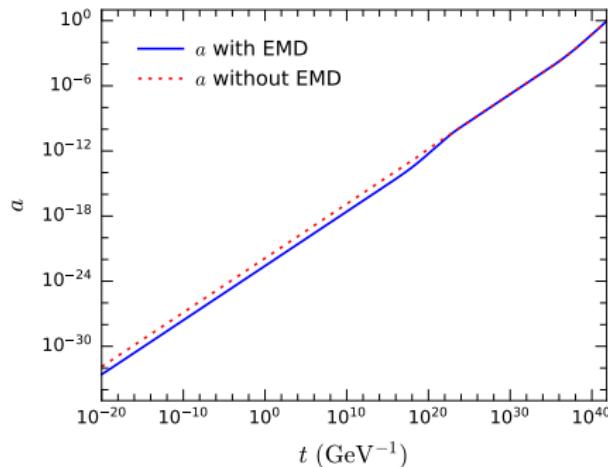
计算表明未来引力波探测实验可以有效地探索这个模型的参数空间



[ZY Qiu, ZHY, 2304.02506, CPC]

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** ($t \sim 0.01\text{--}200\text{ s}$) 之后的宇宙，之前的宇宙历史有可能与**标准的 Λ CDM 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, 2502.16576]

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！