

几何弦理论三大关键实验预言

2025 年 12 月 21 日

1 实验一：高能标耦合常数偏离

1.1 理论核心

当对撞能量接近方向范畴 \mathcal{D} 的特征尺度 $\Lambda_{\mathcal{D}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$ 时，耦合常数的跑动会因 \mathcal{D} 的拓扑（第二贝蒂数 $b_2 = 3$ ）而发生可计算的偏离。

1.2 具体预言

在未来环形对撞机（FCC, $\sqrt{s} = 100 \text{ TeV}$ ）上，三个耦合常数的倒数 α_i^{-1} 将相对于标准模型外推值出现非平行偏离，偏离比例固定为：

$$\frac{\Delta\alpha_1^{-1}}{\Delta\alpha_2^{-1}} : \frac{\Delta\alpha_2^{-1}}{\Delta\alpha_3^{-1}} = 5 : 3 : 2$$

数值上：

$$\Delta\alpha_3^{-1} \approx +0.5 \pm 0.1, \quad \Delta(\sin^2 \theta_W) \approx -3 \times 10^{-5}$$

1.3 检验方法

- 在 FCC-ee 上通过 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$ 的截面与角分布测量 α_{em} 和弱混合角
- 在 FCC-hh 上通过喷注截面测量 α_s
- 需要积分亮度 $\int \mathcal{L} > 10 \text{ fb}^{-1}$ ，测量精度 $\delta\alpha_i^{-1} \sim 0.1$

1.4 证伪条件

如果在 FCC 的 100 TeV 能区未发现耦合常数偏离，或偏离模式不符合 5 : 3 : 2 的比例，且统计显著性超过 5σ 。

2 实验二：精细结构常数空间各向异性

2.1 理论核心

方向范畴 \mathcal{D} 的挠率场会导致精细结构常数 α 在空间中出现四极矩型各向异性，主轴与宇宙微波背景辐射偶极子方向对齐。

2.2 具体预言

$$\frac{\Delta\alpha(\hat{\mathbf{n}})}{\alpha_0} = Q_{ij}n^i n^j, \quad \sqrt{Q_{ij}Q^{ij}} \sim 10^{-18}$$

方向: CMB 偶极子方向 (赤经 $\approx 168^\circ$, 赤纬 $\approx -7^\circ$) 对于沿此方向放置的两个原子钟, 频率偏移:

$$\frac{\delta\nu}{\nu} \approx 2 \times 10^{-18}$$

2.3 检验方法

1. 建立全球光学原子钟网络 (至少 6 个站点), 通过光纤/卫星链路进行比对
2. 使用 30 米级望远镜 (TMT/ELT) 和天文光梳, 测量 100 个以上不同天区方向的类星体吸收线
3. 需要系统误差控制到 10^{-19} 水平

2.4 证伪条件

如果原子钟网络在 10^{-19} 精度未发现与 CMB 偶极子相关的频率偏移, 且类星体光谱在 10^{-9} 精度未发现四极矩各向异性。

3 实验三: 原初引力波谱拓扑印记

3.1 理论核心

方向范畴 \mathcal{D} 的欧拉示性数 $\chi(\mathcal{D}) = 2$ 会在原初引力波功率谱上刻下振荡印记。

3.2 具体预言

原初张量功率谱:

$$P_T(k) = A_T \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_T} \times \left[1 + \gamma \cdot \cos \left(\frac{2\pi k}{k_{\mathcal{D}}} + \phi_0 \right) \right]$$

其中:

$$k_{\mathcal{D}}^{-1} \approx 2.2 \text{ Gpc}, \quad \gamma \sim 10^{-3}$$

在 CMB 的 B 模式功率谱中表现为:

$$C_l^{BB} \propto [1 + 0.1 \cdot \cos(0.2 \cdot l + \pi/4)]$$

特征尺度 $l_0 \sim 60$

3.3 检验方法

1. CMB-HD 实验: 测量 $l = 30 - 200$ 范围内的 B 模式功率谱精细结构
2. Big Bang Observer (BBO): 探测 $0.1 - 1 \text{ Hz}$ 频段引力波背景的周期性调制
3. 需要 CMB 偏振测量灵敏度达 $\mu\text{K} \cdot \text{arcmin}$, 引力波背景灵敏度 $\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-17}$

3.4 证伪条件

如果 CMB-HD 确认 B 模式功率谱在 $l = 30 - 200$ 范围内是光滑的，且 BBO 未探测到周期性调制的引力波背景。

4 时间线

- 2035-2045 年：全球原子钟网络验证 α 各向异性
- 2040-2050 年：CMB-HD 和 BBO 验证引力波拓扑印记
- 2050-2060 年：FCC 验证耦合常数偏离