



河南师范大学
HENAN NORMAL UNIVERSITY

Dark Matter in One-Loop Solutions to the R_D Anomaly: A Systematic Study

刘文凤

2023.10.08

$R_{D^{(*)}}$ 反常

近年来，寻找出超出标准模型的新物理是粒子物理领域的主要任务之一。到目前为止，实验上仍然没有直接探测到新物理信号。然而，实验给出的B介子半轻衰变中 $R_{D^{(*)}}$ 的实验测量值与标准模型预言值之间存在显著偏差，意味着其中可能存在超出标准模型的新物理。具体地，

$$R_D \equiv \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D \tau \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D l \bar{\nu}_l)}, \quad R_{D^*} \equiv \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D^* \tau \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D^* l \bar{\nu}_l)},$$

其中， $l = e, \mu$ 。近期， R_D 的实验值更新为：

$$R_D^{\text{LHCb2022}} = 0.441 \pm 0.060 \pm 0.066, \quad R_{D^*}^{\text{LHCb2022}} = 0.281 \pm 0.018 \pm 0.024.$$

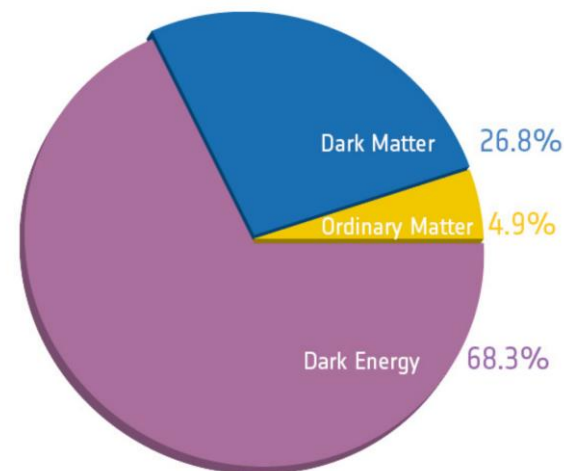
与标准模型预言值相差 2.16σ 和 2.26σ 。

LHCb Collaboration, “ $R(D^*)$ and $R(D)$ with $\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$ ”. LHC Seminar, 18 Oct 2022 [[CERN LHC Seminar](#)].

暗物质粒子

暗物质粒子性质：

- 稳定性：暗物质粒子应该是高度稳定的或者其寿命要远大于宇宙的寿命
- 电中性：暗物质粒子不发光也几乎不参与电磁相互作用
- “冷”暗物质：暗物质在退耦时的速度不能太大
- 质量范围：暗物质可允许的质量范围非常大： $10^{-22}\text{eV} \lesssim m_{\text{DM}} \lesssim 10^{48}\text{GeV}$



暗物质粒子很可能是目前一些超出标准模型新物理模型中的某种粒子，这类可能为暗物质的粒子被称为 WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)，这种理论上的巧合被称为 WIMP 奇迹。



研究思路

本研究将在单圈（1-loop）情况下的 $b \rightarrow cl\bar{\nu}$ 衰变过程中引入新物理粒子，系统的讨论 R_D 反常，给出可能成为暗物质候选者的粒子的新物理粒子的相关信息。

- 有效理论
- 确定量子数
- 暗物质候选者
- 其他新物理过程限制
- 计算暗物质残余丰度
- 结论分析

有效理论

假设中微子是左手的，则 $b \rightarrow cl\bar{\nu}$ 衰变过程的低能有效哈密顿量一般写为

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = 2\sqrt{2}G_F V_{cb} \left[(1 + C_{V_L}) O_{V_L} + C_{V_R} O_{V_R} + C_{S_L} O_{S_L} + C_{S_R} O_{S_R} + C_T O_T \right],$$

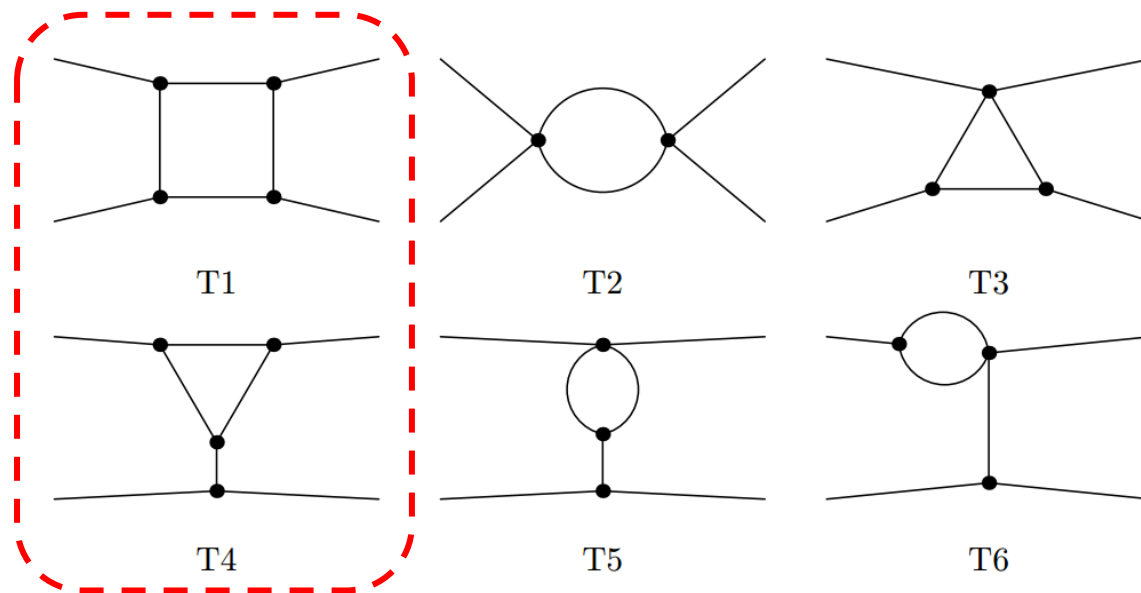
其中

$$\begin{aligned} O_{V_L} &= (\bar{c}\gamma^\mu P_L b)(\bar{\tau}\gamma_\mu P_L \nu_\tau), & O_{V_R} &= (\bar{c}\gamma^\mu P_R b)(\bar{\tau}\gamma_\mu P_L \nu_\tau), \\ O_{S_L} &= (\bar{c}P_L b)(\bar{\tau}P_L \nu_\tau), & O_{S_R} &= (\bar{c}P_R b)(\bar{\tau}P_L \nu_\tau), \\ O_T &= (\bar{c}\sigma^{\mu\nu} P_L b)(\bar{\tau}\sigma_{\mu\nu} P_L \nu_\tau), \end{aligned}$$

这里 $C_{V_{L,R}}$, $C_{S_{L,R}}$, C_T 为新物理算符贡献对应的Wilson系数。在全局拟合 (Global fit) 中, O_{V_L} 算符在跑动时不与其他算符发生耦合, 因此选择 O_{V_L} 算符做具体分析。

拓扑结构

首先，我们利用FeynCalc软件包系统地给出了 $b \rightarrow cl\bar{\nu}$ 衰变过程的拓扑结构，排除蝌蚪图和自能图，会得到如下图所示的6个拓扑图。进一步地，考虑到我们需要通过loop引入新的未知粒子，根据可重整化要求，只有T1和T4图两种拓扑结构才能满足条件。



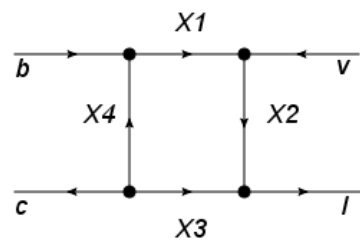
外线粒子

在 $b \rightarrow cl\bar{\nu}$ 衰变过程中，我们只考虑左手中微子。拓扑结构确定之后，除左手中微子为左手轻子二重态外，此衰变过程其他外线粒子的SU(2)量子数有如下表所示四种不同的可能组合。

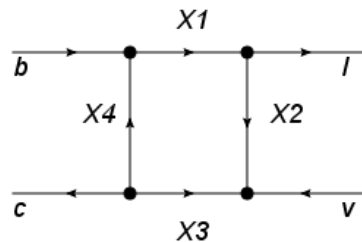
	b	c	l	$\bar{\nu}$
I	1	1	2	2
II	1	2	1	2
III	2	1	1	2
IV	2	2	2	2

其中，只有第IV种方案能够产生 O_{V_L} 贡献。因此外线粒子的SU(2)量子数采用第IV种方案。

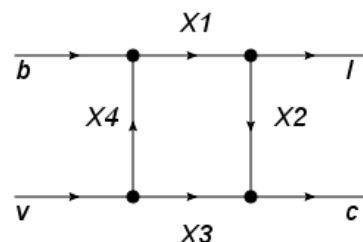
内线粒子



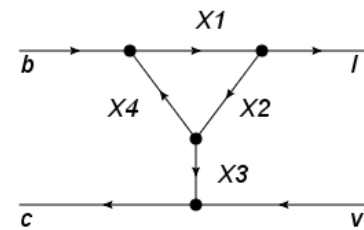
T1-1



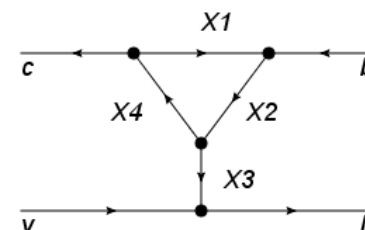
T1-2



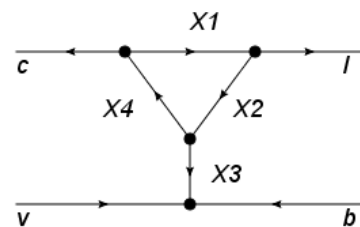
T1-3



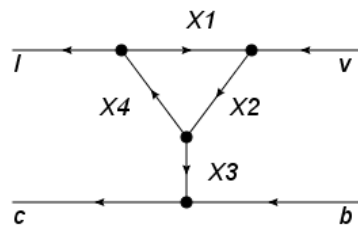
T2-1



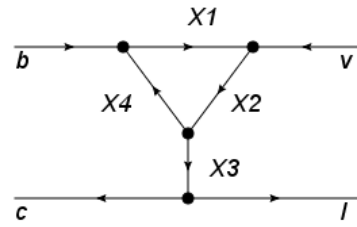
T2-2



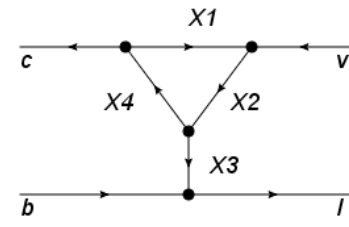
T2-3



T2-4



T2-5



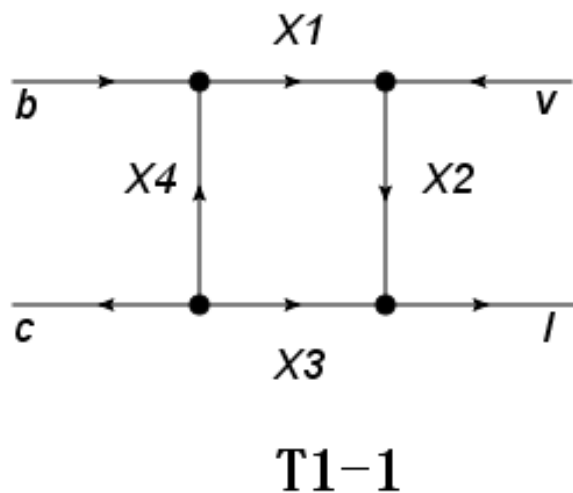
T2-6

我们假设图中的新物理粒子 $X1$, $X2$, $X3$, $X4$ 为新的重费米子和标量粒子。

内线粒子

$$SU(3)_C: 3 \otimes 3 = \bar{3} \oplus 6, \quad 3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8, \quad 3 \otimes 6 \supset 8, \quad 3 \otimes \bar{6} \supset \bar{3}, \quad 3 \otimes 8 \supset 3 \oplus \bar{6}, \quad 6 \otimes 6 \supset \bar{6}, \\ 6 \otimes \bar{6} \supset 1 \oplus 8, \quad 6 \otimes 8 \supset \bar{3} \oplus 6, \quad 8 \otimes 8 \supset 1 \oplus 8 \oplus 8.$$

$$SU(2)_L: 2 \otimes 2 = 1 \oplus 3, \quad 2 \otimes 3 \supset 2, \quad 3 \otimes 3 = 1 \oplus 3.$$



	X1	X2	X3	X4
T1-1-1	$(1, 1 \oplus 3, a)$	$(1, 2, a - \frac{1}{2})$	$(1, 1 \oplus 3, a)$	$(\bar{3}, 2, a - \frac{1}{6})$
T1-1-2	$(1, 2, a)$	$(1, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{2})$	$(1, 2, a)$	$(\bar{3}, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{6})$
T1-1-3	$(3, 1 \oplus 3, a)$	$(3, 2, a - \frac{1}{2})$	$(3, 1 \oplus 3, a)$	$(1, 2, a - \frac{1}{6})$
T1-1-4	$(3, 2, a)$	$(3, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{2})$	$(3, 2, a)$	$(1, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{6})$

DM候选者

对于当前1-loop情况下的 $b \rightarrow cl\bar{\nu}$ 衰变的拓扑图，中间粒子X1, X2, X3, X4可以选作暗物质候选者的条件为：

- 暗物质必须是电中性的。 $Q = T_3 + Y/2, \longrightarrow Y = -2T_3$ 。
- 实验上，为了避免来自暗物质直接探测实验的限制，我们要求暗物质场的超荷 $Y=0$ 。

核子反冲的直接探测截面与 Y^2 成正比。

综上，暗物质候选者须满足 $Y = T_3 = 0$ 。

以上条件会导致SU(2)的偶数多重态被排除，而 $Y = \pm 1$ 的标量二重态例外。

DM候选者

考虑暗物质候选者的条件，最终得到T1-1拓扑图所有新粒子中符合DM候选者的量子数条件的粒子，如下表最后一列所示。

	X1	X2	X3	X4	DM candidates
T1-1-1	$(1, 1 \oplus 3, a)$	$(1, 2, a - \frac{1}{2})$	$(1, 1 \oplus 3, a)$	$(\bar{3}, 2, a - \frac{1}{6})$	$[X1, X2, X3] \Big _{a=0}, [X2] \Big _{a=1}$
T1-1-2	$(1, 2, a)$	$(1, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{2})$	$(1, 2, a)$	$(\bar{3}, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{6})$	$[X1, X2, X3] \Big _{a=\frac{1}{2}}, [X1, X3] \Big _{a=-\frac{1}{2}}$
T1-1-3	$(3, 1 \oplus 3, a)$	$(3, 2, a - \frac{1}{2})$	$(3, 1 \oplus 3, a)$	$(1, 2, a - \frac{1}{6})$	$[X4] \Big _{a=-\frac{1}{3} \text{ 或 } \frac{2}{3}}$
T1-1-4	$(3, 2, a)$	$(3, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{2})$	$(3, 2, a)$	$(1, 1 \oplus 3, a - \frac{1}{6})$	$[X4] \Big _{a=\frac{1}{6}}$



后期研究计划

□ 其他新物理过程限制

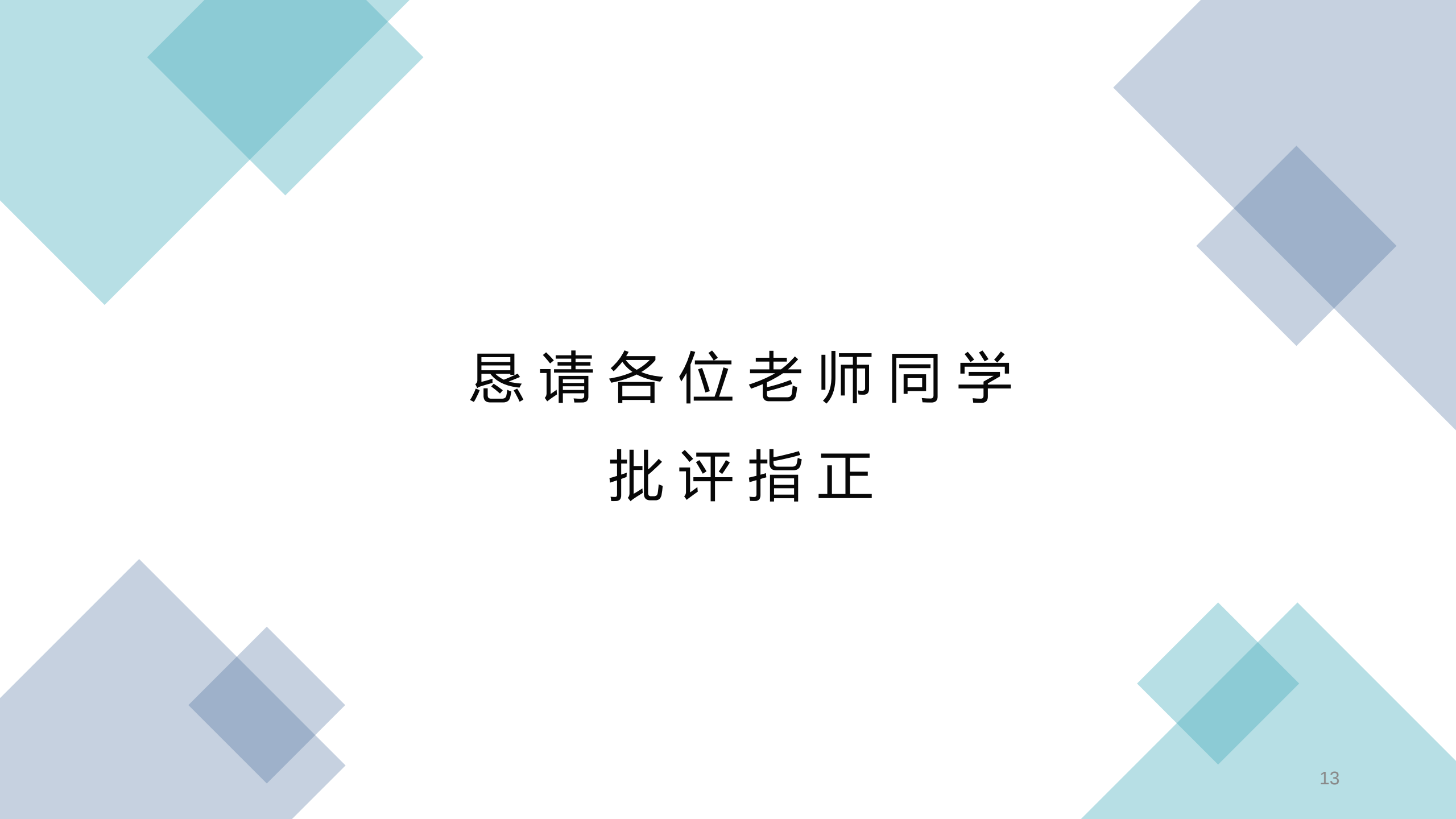
- 在分析过程中，我们引入的新物理耦合可能会产生其他的新物理过程，我们将考虑所有有关的新物理过程，并具体分析这些过程对新物理耦合系数等参数的相关限制。

□ 计算暗物质残余丰度

- 对于初步选出的暗物质候选者，验证每个粒子是否能够产生实验上可观测的暗物质残余丰度。

□ 结论分析

- 结合新物理耦合系数等参数给出的限制和暗物质残余丰度验证，最终挑选出的新粒子即可证明暗物质可以解释 R_D 反常。

The background features four large, overlapping geometric shapes in the corners: a teal diamond in the top-left, a blue diamond in the top-right, a blue diamond in the bottom-left, and a teal diamond in the bottom-right. The text is centered in the white space between these shapes.

恳请各位老师同学
批评指正