

# High-energy enhancement of Higgs boson production at $\mu^+\mu^+$ colliders

高井 峻聖

総合研究大学院大学 (SOKENDAI) ・ KEK 理論センター



## 導入： $\mu^+\mu^+$ コライダーは Higgs ファクトリーになり得るか

### $\mu^+\mu^+$ コライダーの長所

- 素粒子を衝突させるため、精密測定が得意
- シンクロトロン輻射が極めて少ないため、エネルギーフロンティアを開拓できる： $\sqrt{s} \sim \mathcal{O}(10)$  TeV
- 超低速ミュオンにより、極めて小さなエミッタンスが期待できる

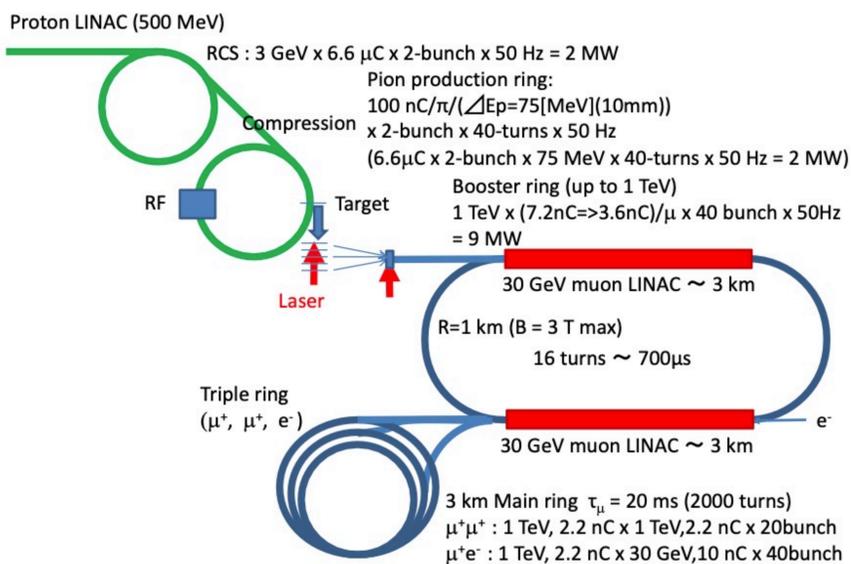


Figure 1:  $\mu$ TRISTANの概略。arXiv:2201.06664 より引用。

### Higgs粒子の作り方

- 衝突エネルギーが 1 TeV を超えるとき、支配的なのはベクトルボソンの衝突過程
- $\mu^+\mu^-$  コライダーの場合、 $W$  ボソン衝突 (WBF,  $\mu^+\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu \nu_\mu h$ ) と  $Z$  ボソン衝突 (ZBF,  $\mu^+\mu^- \rightarrow \mu^+\mu^- h$ ) があり、 $\log s/m_h^2$  で成長
- WBFはZBFの約10倍

### $\gamma/Z$ -mediated WBF

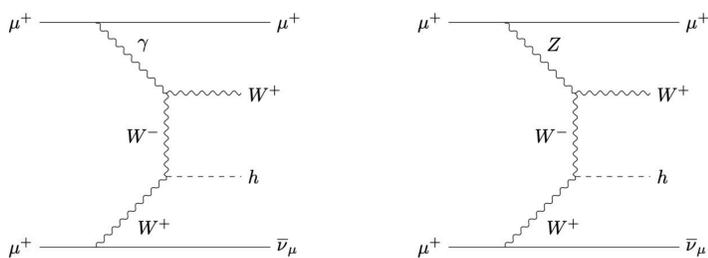


Figure 2:  $\mu^+\mu^+$  コライダーで実現できるWBFに寄与するダイアグラムのうち代表的なもの。

### 光子が媒介するダイアグラムの寄与

- collinearな光子によるダイアグラム (図2左) が重要
- 光子と縦波 $W$ ボソンのパートン分布関数 (PDF) は

$$f_{\gamma/\mu}(x) \sim \frac{\alpha}{x} \log \frac{s}{m_\mu^2}, \quad f_{W_L^+/\mu^+}(x) \sim \frac{1 + P_{\mu^+}}{2} \frac{\alpha_2}{x} \quad (1)$$

- パートンの衝突過程  $\gamma W_L^+ \rightarrow W^+ h$  の断面積は

$$\sigma_{\gamma W}(s) \sim \frac{\alpha \alpha_2}{m_W^2} \quad \text{for } s > s_{\min} = (m_W + m_h)^2 \quad (2)$$

$$\Rightarrow \sigma_\gamma(s) \simeq \int dx dy f_{\gamma/\mu}(x) f_{W_L^+/\mu^+}(y) \sigma_{\gamma W}(xys) \quad (3)$$

$$\sim \frac{1 + P_{\mu^+}}{2} \frac{\alpha^2 \alpha_2^2}{m_W^2} \log \frac{s}{m_\mu^2} \left( \log \frac{s}{s_{\min}} \right)^2 \quad \text{Three large logs!} \quad (4)$$

### Zボソンの寄与

- $Z$ ボソンの質量  $m_Z$  を無視すれば、光子 (図2左) と  $Z$ ボソン (図2右) が媒介するダイアグラムは結合定数の違いを除いて等しい：

$$|\mathcal{M}|^2 = |g_\gamma|^2 |\mathcal{M}_0|^2 + |g_{Z_T}|^2 |\mathcal{M}_0|^2 + 2\text{Re}(g_\gamma g_{Z_T}) |\mathcal{M}_0|^2 + \mathcal{O}(m_Z^2/s) \quad (5)$$

- 結合定数の比は

$$\frac{g_{Z_T}^{\mu^+} g_Z^W}{g_\gamma^{\mu^+} g_\gamma^W} = \frac{1}{2 \sin^2 \theta_W} - 1, \quad \frac{g_{Z_T}^{\mu^+} g_Z^W}{g_\gamma^{\mu^+} g_\gamma^W} = -1 \quad (6)$$

- $Z$ ボソンの質量  $m_Z$  の効果はIRカットオフに現れる

$$\log \frac{s}{m_\mu^2} \Rightarrow \log \frac{s}{m_Z^2} \quad (7)$$

### $\gamma/Z$ -mediated WBF の概算

- $Z_T$ の項

$$\sigma_{Z_T}(s) = \sigma_\gamma(s) \frac{\log s/m_Z^2}{\log s/m_\mu^2} \left[ \frac{1 + P_{\mu^+}}{2} \left( \frac{g_{Z_T}^{\mu^+} g_Z^W}{g_\gamma^{\mu^+} g_\gamma^W} \right)^2 + \frac{1 - P_{\mu^+}}{2} \left( \frac{g_{Z_T}^{\mu^+} g_Z^W}{g_\gamma^{\mu^+} g_\gamma^W} \right)^2 \right] \quad (8)$$

- $\gamma Z_T$ の項

$$\sigma_{[\gamma Z_T]}(s) = 2 \sigma_\gamma(s) \frac{\log s/m_Z^2}{\log s/m_\mu^2} \left[ \frac{1 + P_{\mu^+} g_{Z_T}^{\mu^+} g_Z^W}{2 g_\gamma^{\mu^+} g_\gamma^W} + \frac{1 - P_{\mu^+} g_{Z_T}^{\mu^+} g_Z^W}{2 g_\gamma^{\mu^+} g_\gamma^W} \right] \quad (9)$$

- 全体

$$\Rightarrow \sigma(s) = \sigma_\gamma(s) \left[ 1 + (1.5 + 2.5 P_{\mu^+}) \frac{\log s/m_Z^2}{\log s/m_\mu^2} \right] \quad (10)$$

- $\mu^+$ ビームの偏極  $P_{\mu^+}$  が0でないとき、 $Z$ ボソンの寄与が効いてくる

### 結果

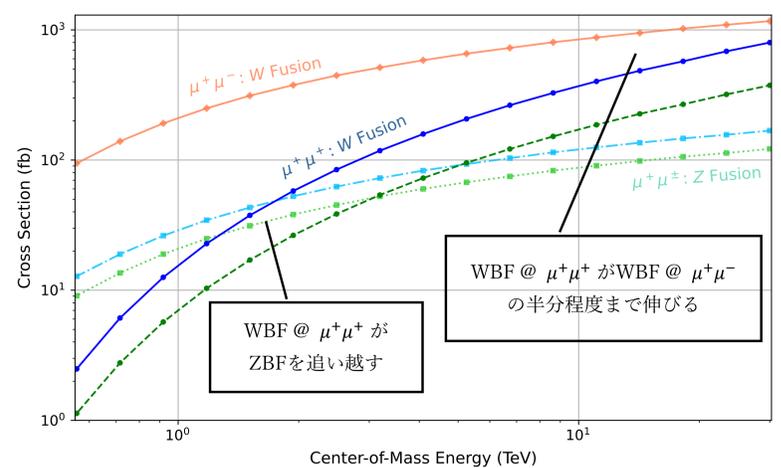


Figure 3: ベクトルボソン衝突によるHiggs粒子生成の断面積。ZBFと $\mu^+\mu^+$  コライダーのWBFは上が $P_{\mu^+} = +0.8$ の場合、下が $P_{\mu^+} = 0$ の場合。 $\mu^+\mu^-$  コライダーのWBFは $P_{\mu^+} = 0$ の場合。

### 結論

- 高エネルギーの $\mu^+\mu^+$  コライダーでは、ZBFだけでなく $\gamma/Z$ -mediated WBFも起こる
- その断面積は $(\log s)^3$ で成長し、 $\mathcal{O}(10)$  TeVでは $\mu^+\mu^-$  コライダーのWBFと比べて半分程度まで伸びる
- ミューオンビームのスピンの偏極も重要

### See also

- K. Fridell, R. Kitano and R. Takai, *Lepton flavor physics at  $\mu^+\mu^+$  colliders*, JHEP 06 (2023) 086 [arXiv:2304.14020]