

$\mu$ TRISTAN

-新しいレプトンコライダー実験の提唱-

KEK

高浦大雅

in collaboration with

濱田佑, 北野龍一郎, 松戸竜太郎, 吉田光宏

# 標準理論の立ち位置

標準理論：多くの現象を説明する正確な有効理論

## 一方で標準理論の問題点

- ・ ニュートリノ質量
- ・ ダークマター
- ・  $(g-2)_\mu$  アノマリー (?)
- ・ ヒッグス質量のfine-tuning問題

UVの物理は何か？知らない軽いセクターは何か？

# 新物理への実験的アプローチ

実験的に有用なアプローチ

(i) より高エネルギースケールに

新粒子を直接生成することが可能

(ii) ヒッグス精密測定

ヒッグスとSM粒子の結合は標準理論を仮定すると完全に決まる

→ 標準理論からのズレは新物理

ヒッグスと関係

- 電弱対称性の破れの起源
- SUSY
- 右巻きニュートリノ
- SM single scalar
- ⋮

# 検討中のレプトンコライダー

- ・ ILC, CLIC ( $e^+ e^-$  collider)

(建設された場合) ヒッグス精密測定が可能！

- ・ ミューオンコライダー ( $\mu^+ \mu^-$  colliders)

1. レプトンコライダーのため精密測定が可能
2. 電子より高エネルギー ( $O(\text{TeV})$  or  $O(10) \text{ TeV}$ ) ビームが可能

∴ ミューオン質量が重い分シンクロトロン放射が少ない

精密測定と高エネルギーを同時に実現できる魅力的オプション



# ビームの必須条件

コライダー実験のビームは

- ・ ビームを構成する粒子の大量生成
- ・ ビームが絞れている(ビーム粒子の運動量のバラツキが少ない)こと

が必要

コライダー実験での散乱断面積の測定:  $\frac{\Delta_{\text{stat.}} \sigma}{\sigma} \propto \frac{1}{\sqrt{N_{\text{event}}}} \propto \frac{1}{\sqrt{\mathcal{L}}}$

ここに

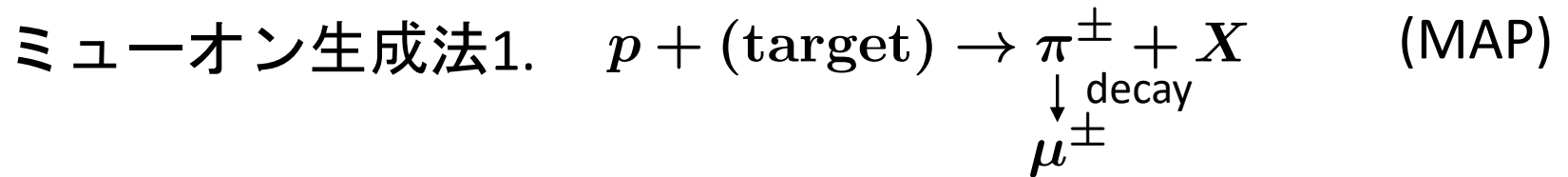
$$\mathcal{L} = \frac{N_{\text{beam1}} N_{\text{beam2}} f_{\text{rep}}}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

# of particles

How frequently collisions occur

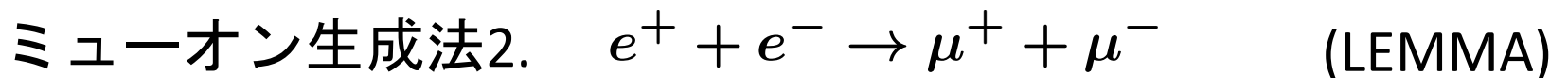
Beam size

# ミューオンビームの課題



- ・大量のミューオンが作れる
- ・ $\pi^{\pm}$ の崩壊からできる $\mu^{\pm}$ はばらついているため  
絞ったビームを実現するには**クーリング**が必要

クーリング技術の進展が必要

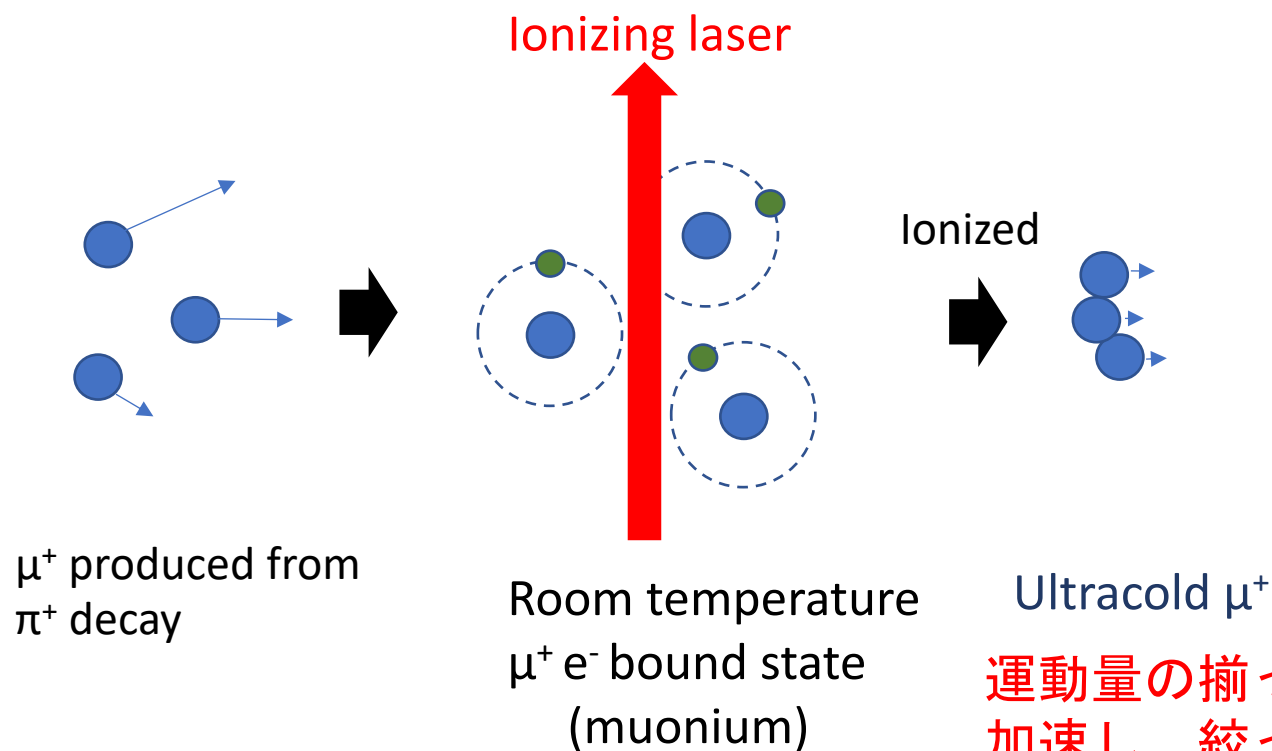


$\mu^{+}\mu^{-}$ のthreshold付近で生成

- ・ $\mu^{\pm}$ はほぼ止まってできるためクーリングは不要
- ・ただしthreshold付近のため生成断面積が小さく  
大量にミューオンを作るのは難しい

# $\mu^+$ のクーリング技術は存在！

$\mu^+$  のクーリング技術： J-PARCでの  $(g-2)_\mu$  実験のキー



\* $\mu^-$  に対して同様のことはできない

# $\mu^+$ ビームを用いた コライダー実験の提唱

2022 Hamada, Kitano, Matsudo,  
Takaura, Yoshida

良質な $\mu^+$ ビームをTeVスケールまで加速しコライダー実験

TRISTAN実験と同じ周長3kmのメインリングを仮定

$\mu^+e^-$  collider

$E_{\mu^+} = 1 \text{ TeV}, E_{e^-} = 30 \text{ GeV}$  (電子はTRISTANと同じエネルギー)

$$\rightarrow \sqrt{s} = 346 \text{ GeV}$$

$\mu^+\mu^+$  collider

$E_{\mu^+} = 1 \text{ TeV}, E_{\mu^+} = 1 \text{ TeV}$

$$\rightarrow \sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$$

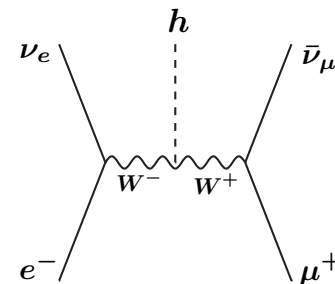
$\mu$ TRISTAN!

# $\mu$ TRISTANで期待されるインパクト

- $\mu^+e^-$  collider

$$\mathcal{L}_{\mu^+e^-} = 4.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \longrightarrow \int \mathcal{L}_{\mu^+e^-} dt = 1.0 \text{ ab}^{-1} \text{ (Ten-year running)}$$

sub percentレベルでのヒッグスカップリング測定  
次元6演算子の検出可能性の向上



- $\mu^+\mu^+$  collider

$$\mathcal{L}_{\mu^+\mu^+} = 5.7 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \longrightarrow \int \mathcal{L}_{\mu^+e^-} dt = 130 \text{ fb}^{-1}$$

TeVスケールのスカラーレプトン探索

新物理由来のfour-femi相互作用に対する $O(100)$  TeVの制限

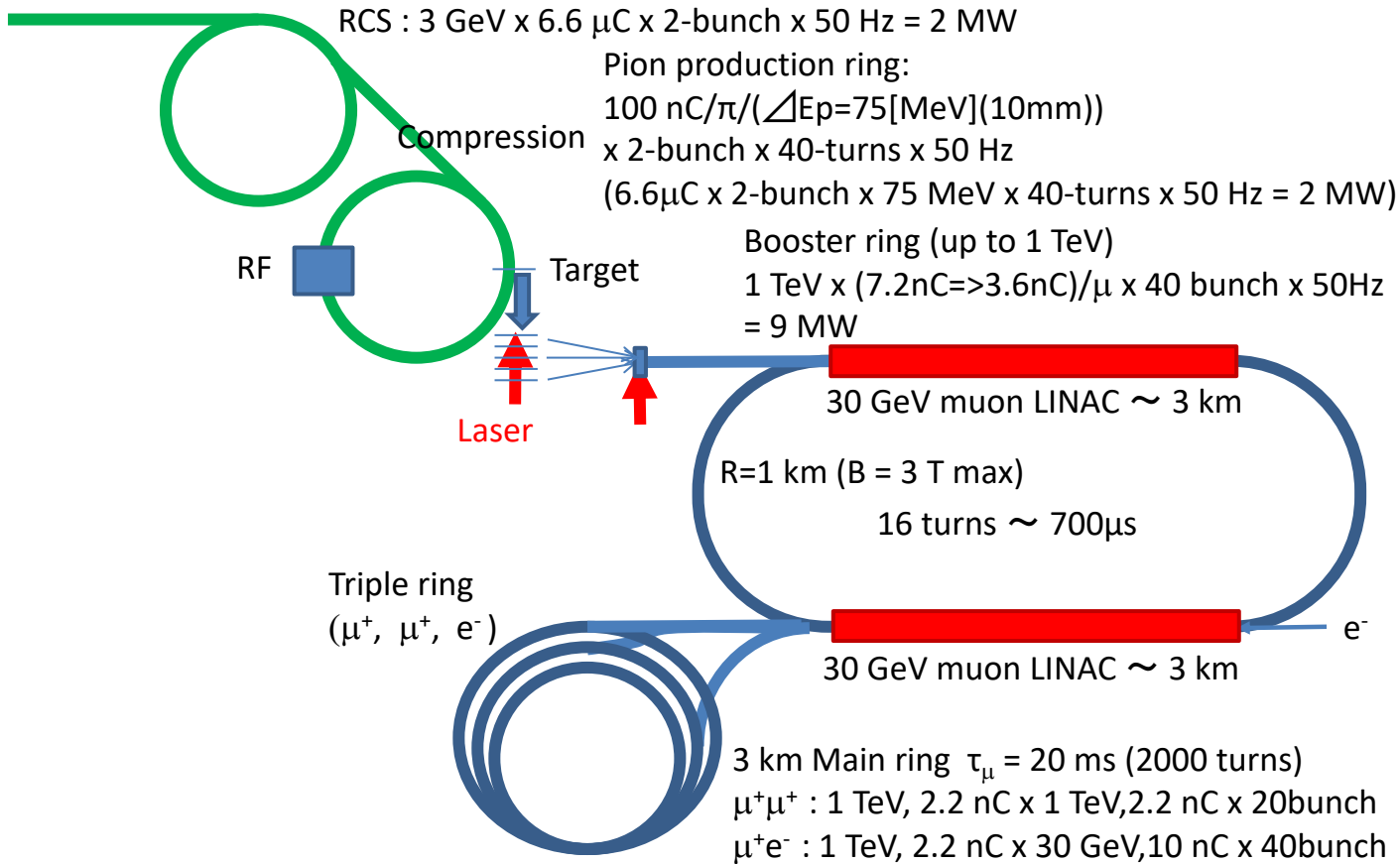
# Contents

## ✓ イントロダクション

- ・ コライダーデザインとルミノシティ
- ・ ヒッグス精密測定
- ・ 新物理探索
- ・ Summary & future prospects

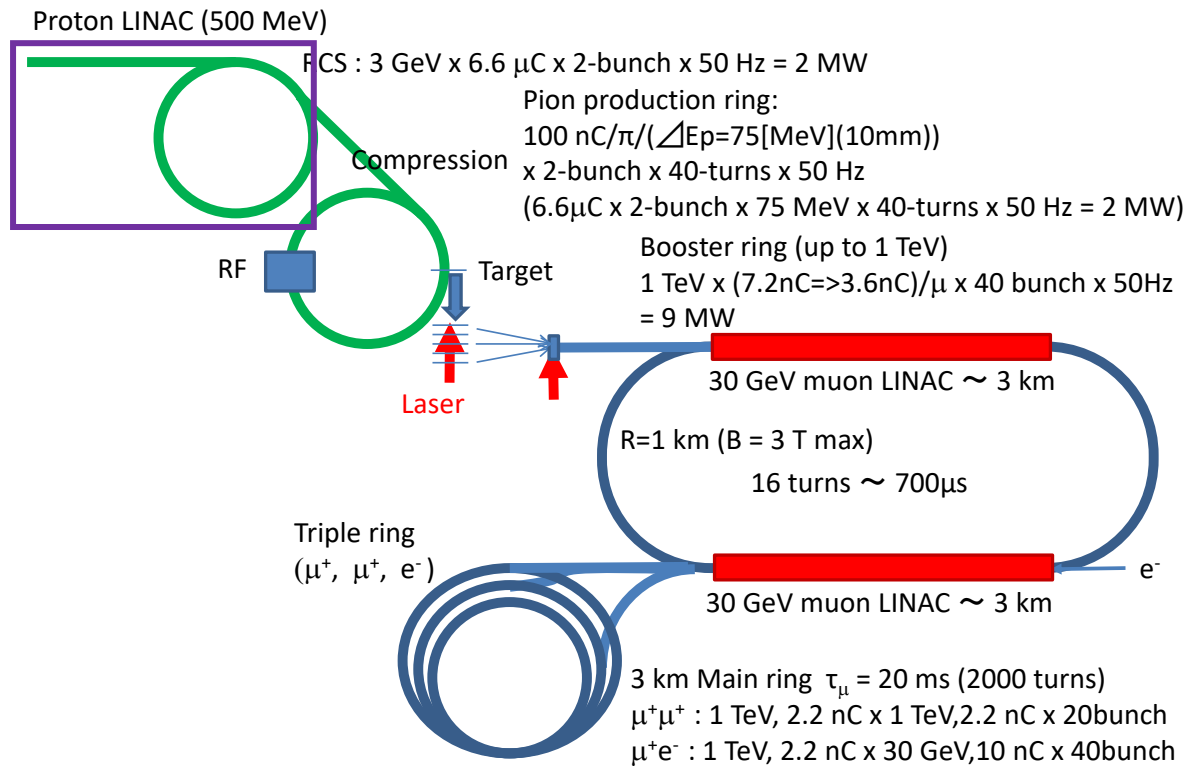
# コライダーデザイン

Proton LINAC (500 MeV)



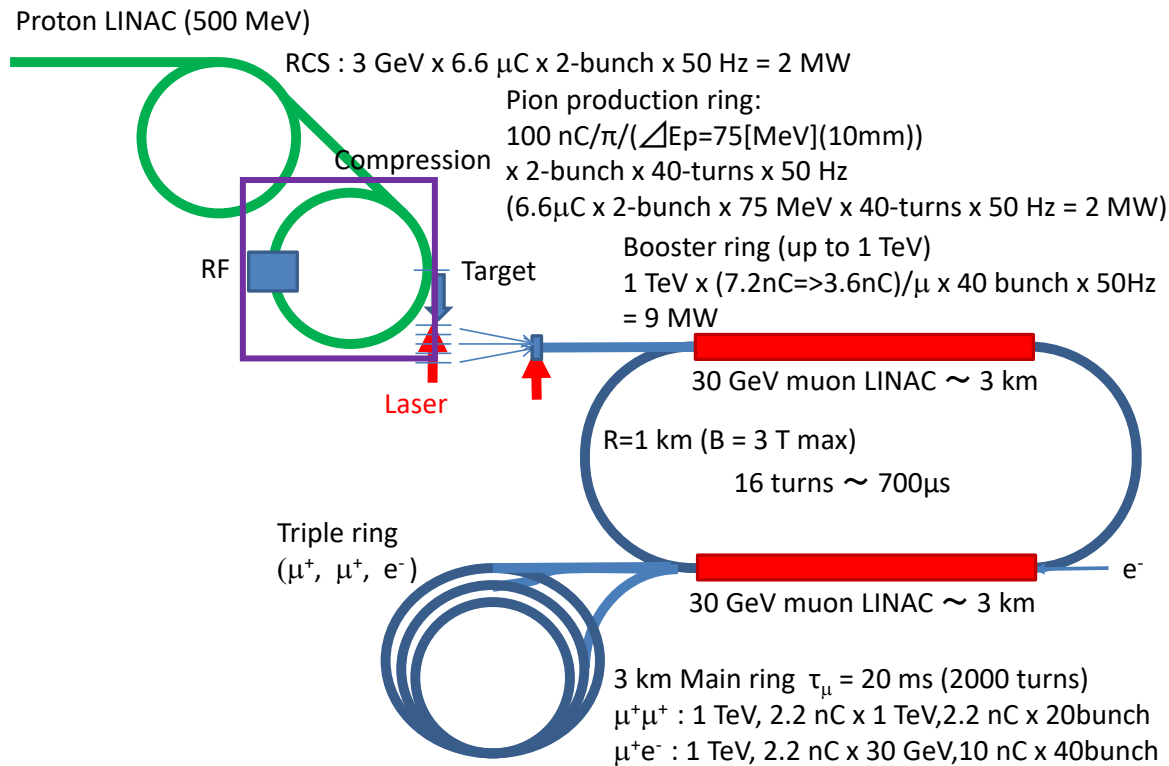
# Proton acceleration (Proton LINAC & RCS)

$p(3\text{ GeV})$





Proton acceleration (Proton LINAC & RCS)  $\longrightarrow$  Pion production (Pion production ring)  
 $p(3 \text{ GeV})$   $p(3 \text{ GeV}) + C \rightarrow \pi^+ + X$

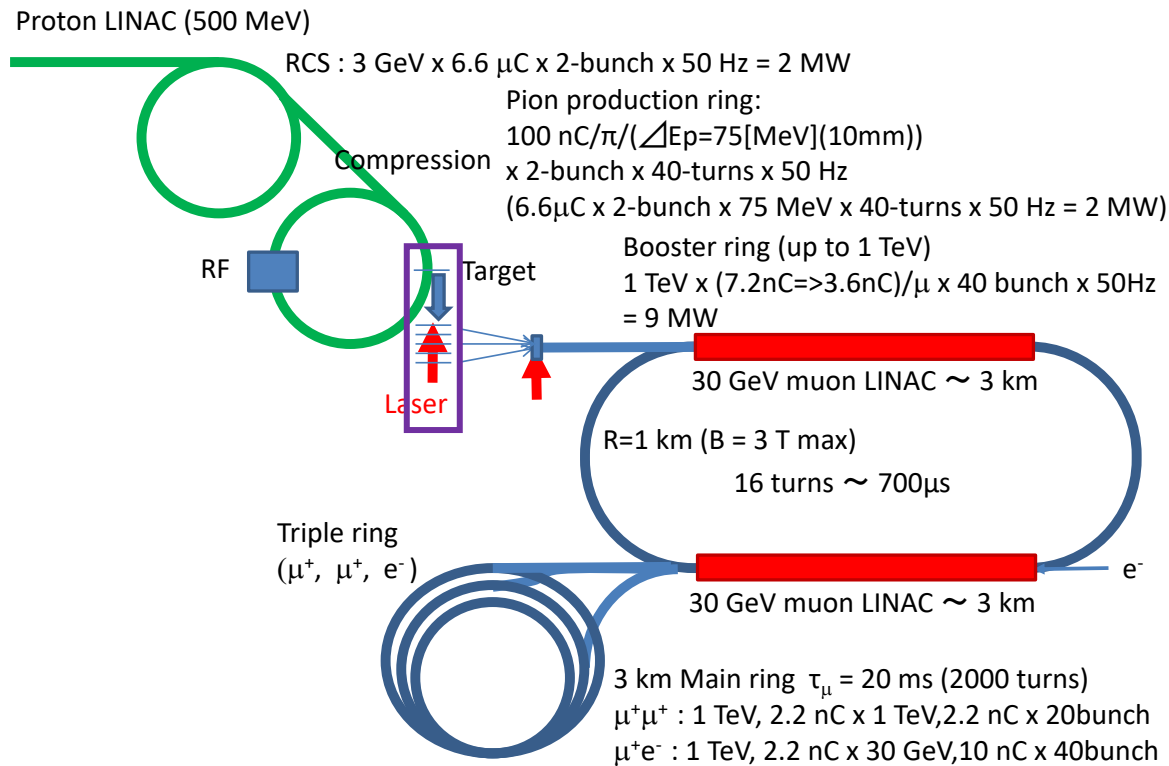
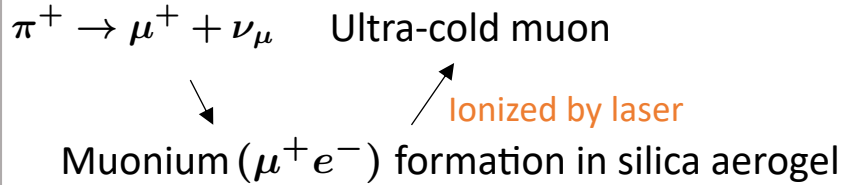


Proton acceleration (Proton LINAC & RCS)  $\longrightarrow$  Pion production (Pion production ring)

$p(3 \text{ GeV})$

$p(3 \text{ GeV}) + C \rightarrow \pi^+ + X$

$\longrightarrow$  Ultra-cold muon production



Proton acceleration (Proton LINAC & RCS) → Pion production (Pion production ring)

$$p(3 \text{ GeV})$$

$$p(3 \text{ GeV}) + C \rightarrow \pi^+ + X$$

→ Ultra-cold muon production → Muon acceleration (Booster ring)

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{Ultra-cold muon}$$

$$\mu^+ (1 \text{ TeV})$$

↓  
 Muonium ( $\mu^+ e^-$ ) formation in silica aerogel  
 ↗ Ionized by laser

Proton LINAC (500 MeV)

RCS : 3 GeV x 6.6  $\mu\text{C}$  x 2-bunch x 50 Hz = 2 MW

Pion production ring:

100 nC/ $\pi$  / ( $\Delta E_p = 75 [\text{MeV}] (10\text{mm})$ )

x 2-bunch x 40-turns x 50 Hz

(6.6  $\mu\text{C}$  x 2-bunch x 75 MeV x 40-turns x 50 Hz = 2 MW)

RF

Target

Booster ring (up to 1 TeV)

1 TeV x (7.2 nC  $\Rightarrow$  3.6 nC) /  $\mu$  x 40 bunch x 50 Hz

= 9 MW

Laser

30 GeV muon LINAC  $\sim$  3 km

R=1 km (B = 3 T max)

16 turns  $\sim$  700  $\mu\text{s}$

Triple ring

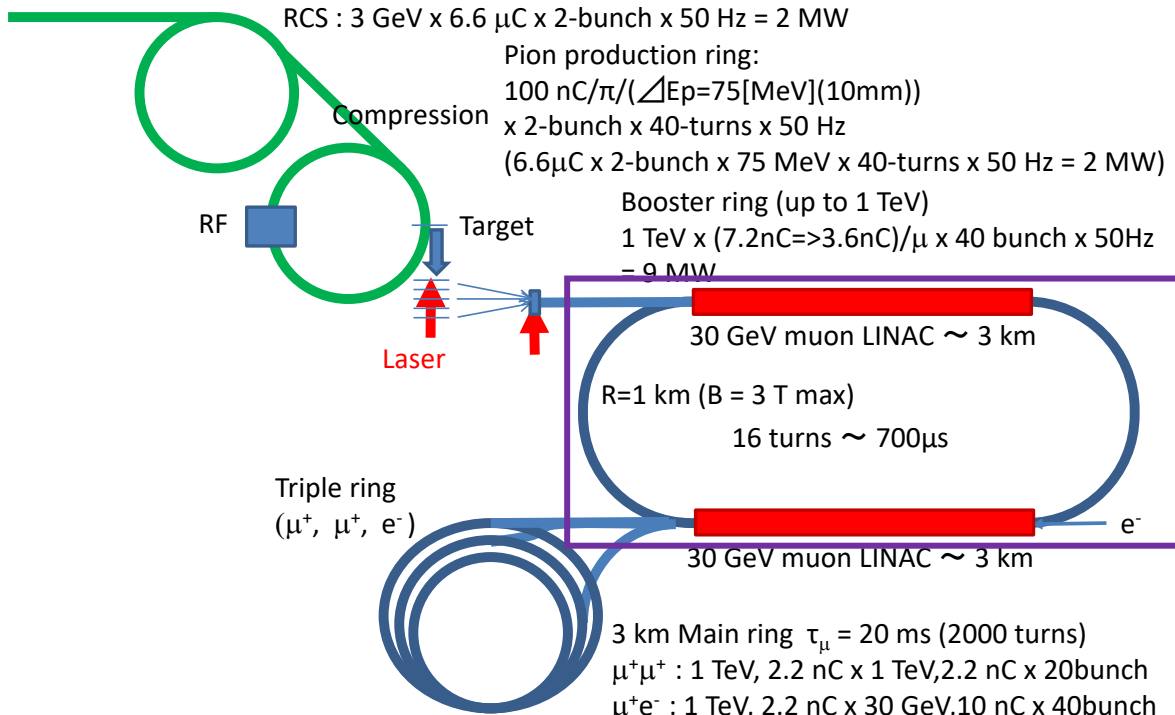
( $\mu^+$ ,  $\mu^+$ ,  $e^-$ )

30 GeV muon LINAC  $\sim$  3 km

3 km Main ring  $\tau_\mu = 20 \text{ ms}$  (2000 turns)

$\mu^+ \mu^+$  : 1 TeV, 2.2 nC x 1 TeV, 2.2 nC x 20 bunch

$\mu^+ e^-$  : 1 TeV, 2.2 nC x 30 GeV, 10 nC x 40 bunch



Proton acceleration (Proton LINAC & RCS) → Pion production (Pion production ring)

$$p(3 \text{ GeV})$$

$$p(3 \text{ GeV}) + C \rightarrow \pi^+ + X$$

→ Ultra-cold muon production → Muon acceleration (Booster ring) → Collide (Main ring)

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{Ultra-cold muon}$$

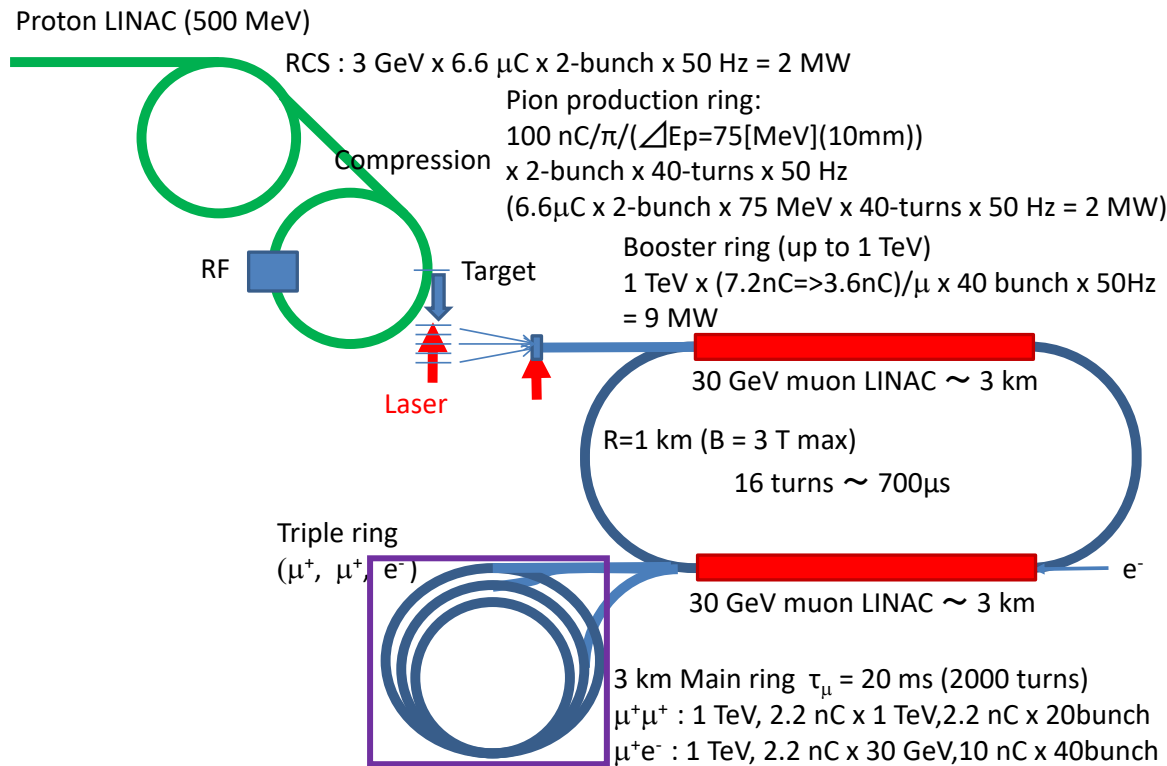
$$\mu^+(1 \text{ TeV})$$

$$[\mu^+(1 \text{ TeV}), e^-(30 \text{ GeV})]$$

or

$$[\mu^+(1 \text{ TeV}), \mu^+(1 \text{ TeV})]$$

↓  
 ↑ Ionized by laser  
 Muonium ( $\mu^+ e^-$ ) formation in silica aerogel



$$\tau_\mu(1 \text{ TeV}) = 20 \text{ ms}$$

20ms毎に新しい  
 ビームを入射

# Ultra-cold muonの数

高ルミノシティのためにはultra-coldミューオンの数が重要

$$\mathcal{L} = \frac{N_{\text{beam1}} N_{\text{beam2}}}{4\pi\sigma_x\sigma_y} f_{\text{rep}}$$

Proton:  $N_{\text{proton}} = 4.1 \times 10^{13} / \text{bunch} \times 2$  (bunches)

$\pi^+$ :  $N_{\pi^+} = N_{\text{proton}} \times 0.016 \times 80$ (bunches)

Production rate 40 turns  
(p+C→ $\pi^+$ +X)

Ultra-cold muons (ビームに使えるもの):

$N_{\mu^+} = N_{\pi^+} \times 0.034 \times 2 \times 40$ (bunches)  
Collection efficiency

Proton LINAC (500 MeV)

RCS : 3 GeV x 6.6  $\mu$ C x 2-bunch x 50 Hz = 2 MW

Pion production ring:

100 nC/ $\pi$ /( $\Delta E_p=75$ [MeV](10mm))

x 2-bunch x 40-turns x 50 Hz

(6.6 $\mu$ C x 2-bunch x 75 MeV x 40-turns x 50 Hz = 2 MW)

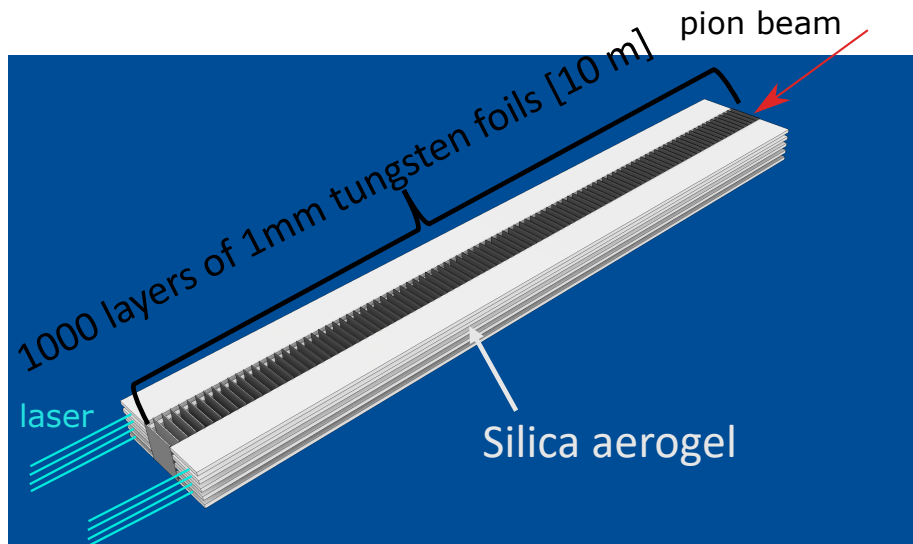
RF

Compression

Target

2nd aerogel target

Laser



1.  $\pi^+$ がターゲットで止められ  
 $\mu^+$ に崩壊

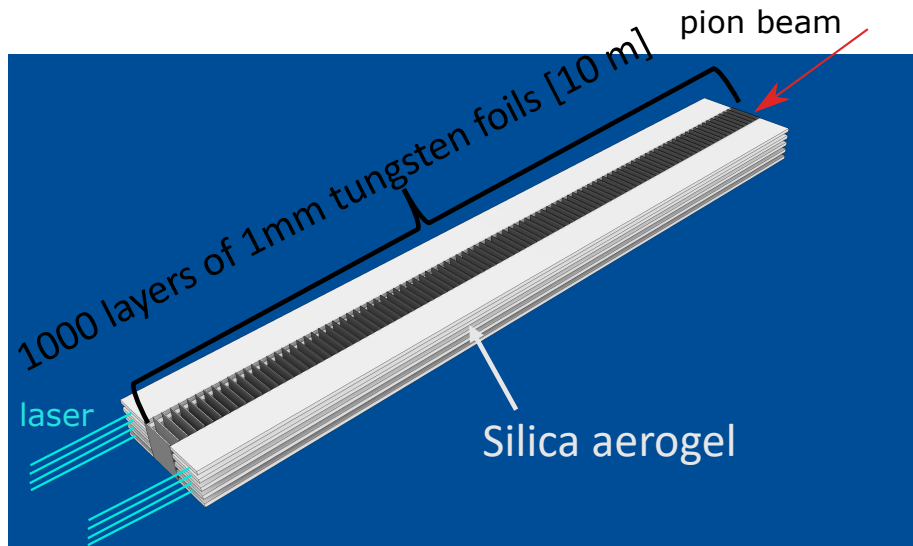
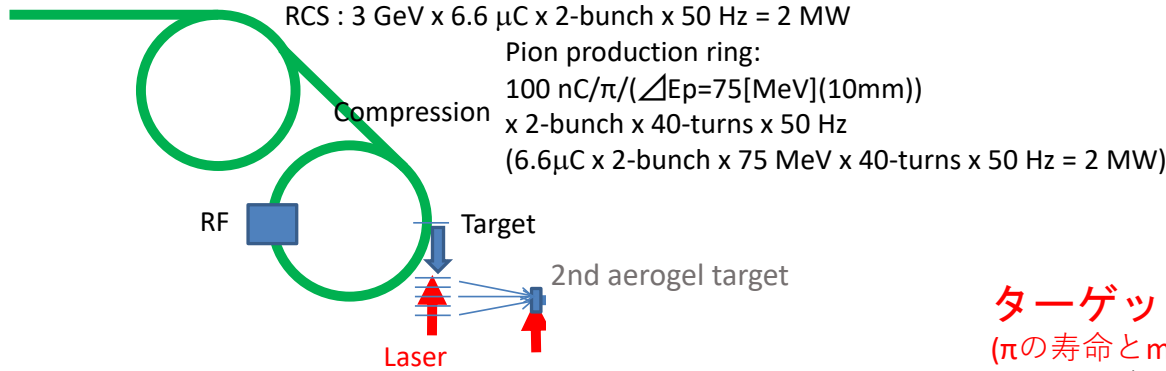
2.  $\mu^+$ がシリカエアロジェルに  
運ばれミュオニウム形成  
( $\mu^+ e^-$  bound state).

3. 熱的に飛び出してきた  
ミュオニウムをレーザーで  
イオン化

10mに広がったミュオンは数センチの2番目のターゲットに移送

We thank Takayuki Yamazaki, Cedric Zhang, and Shusei Kamioka.

Proton LINAC (500 MeV)



ターゲットへ輸送される $\pi^+$ : 50 %  
( $\pi$ の寿命とmaterialとの相互作用による喪失)

1.  $\pi^+$ がターゲットで止められ  
 $\mu^+$ に崩壊

2.  $\mu^+$ がシリカエアロジェルに  
運ばれミュオニウム形成  
( $\mu^+ e^-$  bound state).

ミュオニウム形成: 52 %

3. 熱的に飛び出てきた  
ミュオニウムをレーザーで  
イオン化

ミュオニウムの放出: 60 %

崩壊せずに残るミュオニウム: 60%

レーザーによるイオン化効率: 73 %

10mに広がったミュオンは数センチの2番目のターゲットに移送  
efficiency: 50 % \*薄いターゲットを使用

トータル効率=3.4 %





# Integrated luminosity

Duty factor 70 %で10年間走らせると

$$\int \mathcal{L}_{\mu^+ e^-} dt = 1.0 \text{ ab}^{-1}$$

$$\int \mathcal{L}_{\mu^+ \mu^+} dt = 120 \text{ fb}^{-1}$$

# Magnet

10 Tの磁石が使えると仮定

cf. High-luminosity LHC: 11 T

$$\longrightarrow (E_{\mu^+}, E_{e^-}) = (1 \text{ TeV}, 30 \text{ GeV})$$

$$(E_{\mu^+}, E_{\mu^+}) = (1 \text{ TeV}, 1 \text{ TeV})$$

を3 kmのメインリングで実現

Upgrade energy  $E_{\mu^+} = 3 \text{ TeV}$  では9 kmのメインリング

仮に16 Tの磁石が使えるとすると

$E_{\mu^+} = 3 \text{ TeV}$  に対してメインリング6 km

# Polarization

Polarization:

散乱断面積の増大や多くの物理的情報を引き出すのに有用

我々の仮定

$P_{e^-} = \pm 0.7$  ← SuperKEKBでの目標値

$P_{\mu^+} = \pm 0.8$  ← ビームの絞りと両立するかなどの検討が必要  
(悪くても  $P_{\mu^+} = \pm 0.25$  は可能)

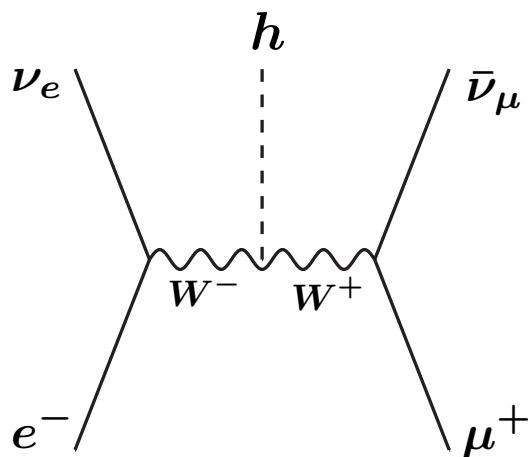
# Contents

- ✓ イントロダクション
- ✓ コライダーデザインとルミノシティ
  - ・ ヒッグス精密測定
  - ・ 新物理探索
  - ・ Summary & future prospects

# ヒッグス生成

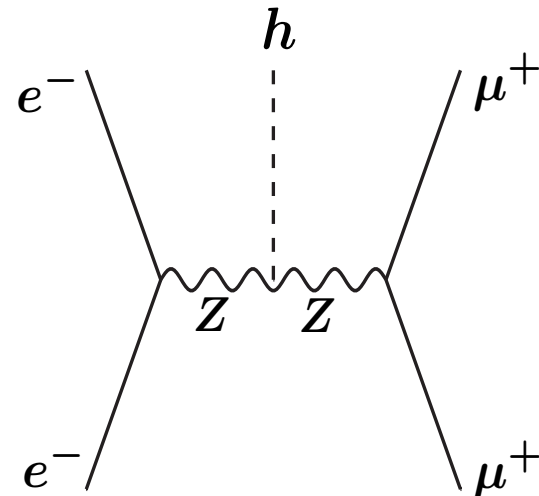
$e^- \mu^+$  コライダー  $\sqrt{s} = 346 \text{ GeV}$  &  $(P_{\mu^+}, P_{e^-}) = (0.8, -0.7)$

W boson fusion (WBF)



$$\sigma_{\text{WBF}} \approx 91 \text{ fb}$$

Z boson fusion (ZBF)



$$\sigma_{\text{ZBF}} \approx 4 \text{ fb}$$

生成機構:

積分ルミノシティ:  $\int \mathcal{L}_{\mu^+ e^-} dt = 1.0 \text{ ab}^{-1}$

ヒッグスの生成数:  $9.5 \times 10^4$

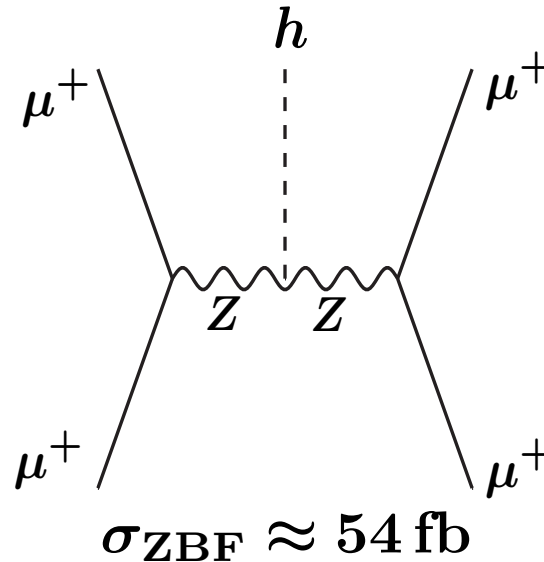
# ヒッグス生成

$\mu^+ \mu^+$  コライダー

$$\sqrt{s} = 2 \text{ TeV} \quad \& \quad (P_{\mu^+}, P_{\mu^+}) = (0.8, 0.8)$$

Z boson fusion (ZBF)

生成機構:



積分ミノシティ:  $\int \mathcal{L}_{\mu^+ e^-} dt = 120 \text{ fb}^{-1}$

ヒッグスの生成数:  $6.5 \times 10^3$  ヒッグス生成は  $e^- \mu^+$  が優る

# メインチャンネルでの カップリング測定

$e^- \mu^+$  での支配的プロセス=WBF

hは主に $b\bar{b}$ へ崩壊

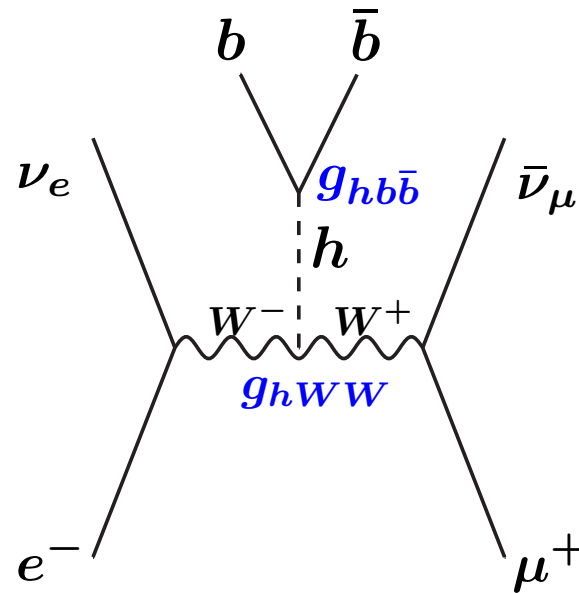
(Branching ratio 58.2 % in SM)

$$\sigma_{\text{SM}} = \sigma_{\text{WBF}}^{\text{SM}} \frac{\Gamma_{H \rightarrow b\bar{b}}^{\text{SM}}}{\Gamma_H^{\text{SM}}}$$

BSMでは

$$\longrightarrow \sigma = \frac{\kappa_W^2 \kappa_b^2}{\kappa_H^2} \sigma_{\text{SM}}$$

$$\kappa_W = 1 + \Delta\kappa_W \text{ etc.}$$



$$g_{hWW} = \kappa_W g_{hWW}^{\text{SM}}$$

$$g_{hb\bar{b}} = \kappa_b g_{hb\bar{b}}^{\text{SM}}$$

$$\Gamma_H = \kappa_H^2 \Gamma_H^{\text{SM}}$$

# メインチャンネルでの カップリング測定

$$\sigma = \frac{\kappa_W^2 \kappa_b^2}{\kappa_H^2} \sigma_{\text{SM}}$$

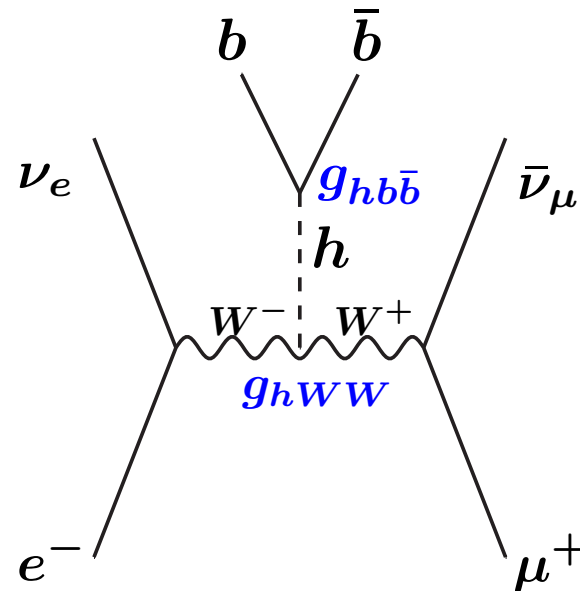
$$\kappa_W = 1 + \Delta\kappa_W \text{ etc.}$$

得られる制限

$$|\Delta\kappa_W + \Delta\kappa_b - \Delta\kappa_H|$$

$$\lesssim \frac{1}{2} \frac{\Delta_{\text{stat}} \sigma}{\sigma} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{N(\text{WBF}) \times \text{Br} \times \text{efficiency}}}$$

$$= 3.1 \times 10^{-3} \times \left( \frac{\text{integrated luminosity}}{1.0 \text{ ab}^{-1}} \right)^{-1/2} \left( \frac{\text{efficiency}}{0.5} \right)^{-1/2}$$



Sub per-cent measurement \*統計エラーのみ考慮



# 検出効率

- Kinematics

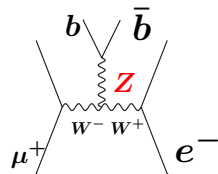
非対称エネルギー ( $E_{\mu^+}, E_{e^-}$ ) = (1 TeV, 30 GeV) のため  
終状態粒子は小角度に飛びやすい  
(ヒッグスのピークは5° 程度)

→ 小角度まで取れる検出器が望ましい

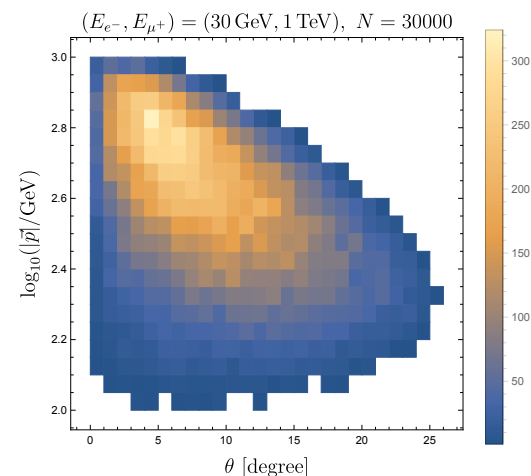
- Background

特殊な量子数 ( $N_e = 1, N_\mu = -1$ ) のため  
background processの種類は少ない

主なものは

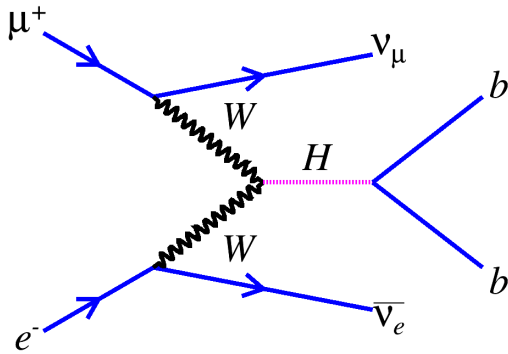


現在北さん(筑波大)、中村さん(KEK)と共同研究中



# WBF Higgs

## Signal

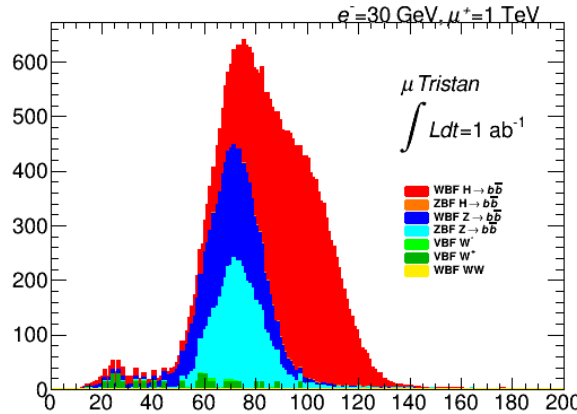


## Event selection

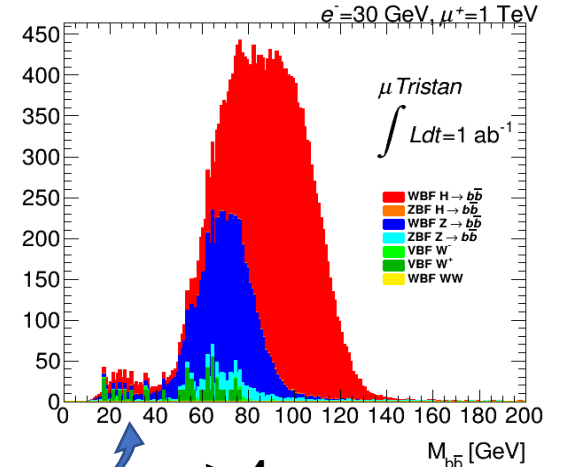
1. No muon
2. No electron
3. bjet x 2

acceptance : ~23%

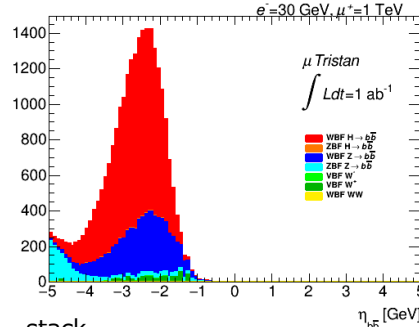
$M_{bb}$  (カット無)



$M_{bb}$  ( $\eta_{bb} > -4$ )

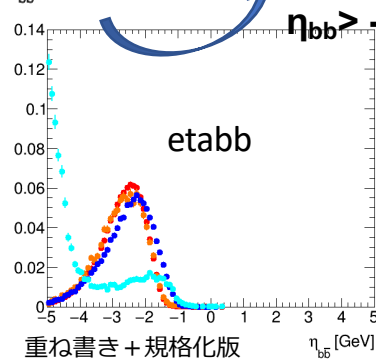


$\eta_{bb}$

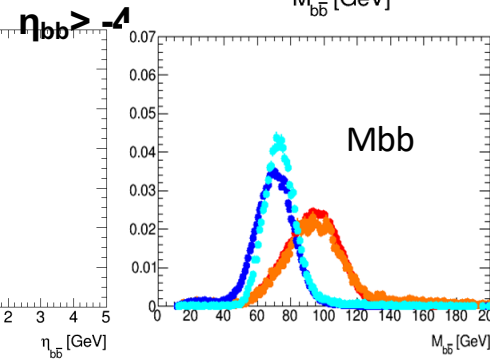


stack  
版

$M_{bb}$  [GeV]



重ね書き + 規格化版



Results are preliminary

$$|\Delta\kappa_W + \Delta\kappa_b - \Delta\kappa_H| = 4.6 \times 10^{-3}$$

# Contents

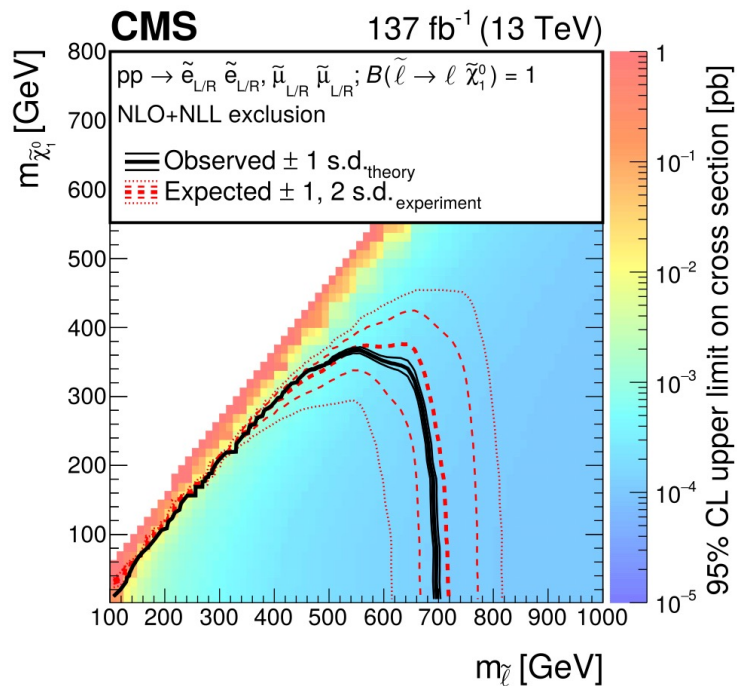
- ✓ イントロダクション
- ✓ コライダーデザインとルミノシティ
- ✓ ヒッグス精密測定
  - ・ 新物理探索
  - ・ Summary & future prospects

SUSY

# Supersymmetry

SUSY: SMの複数の問題を解決し得る新物理の候補

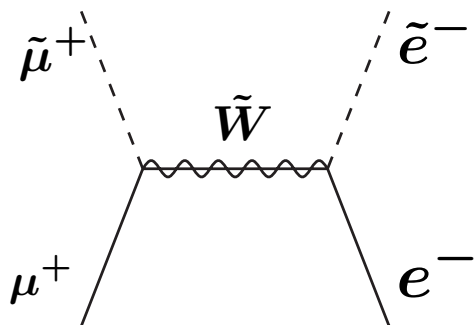
2012.08600 Current scalar lepton search at LHC



$m_{\tilde{\ell}} \lesssim 700$  GeV まで棄却  
(neutralinoとsleptonの質量が  
近い領域は探れない)

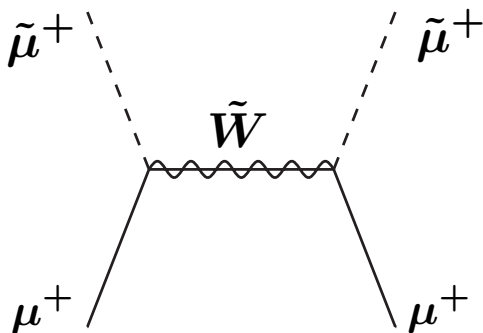
# $\mu$ TRISTANでの スカラーレプトン生成

- $\mu^+e^-$  collider



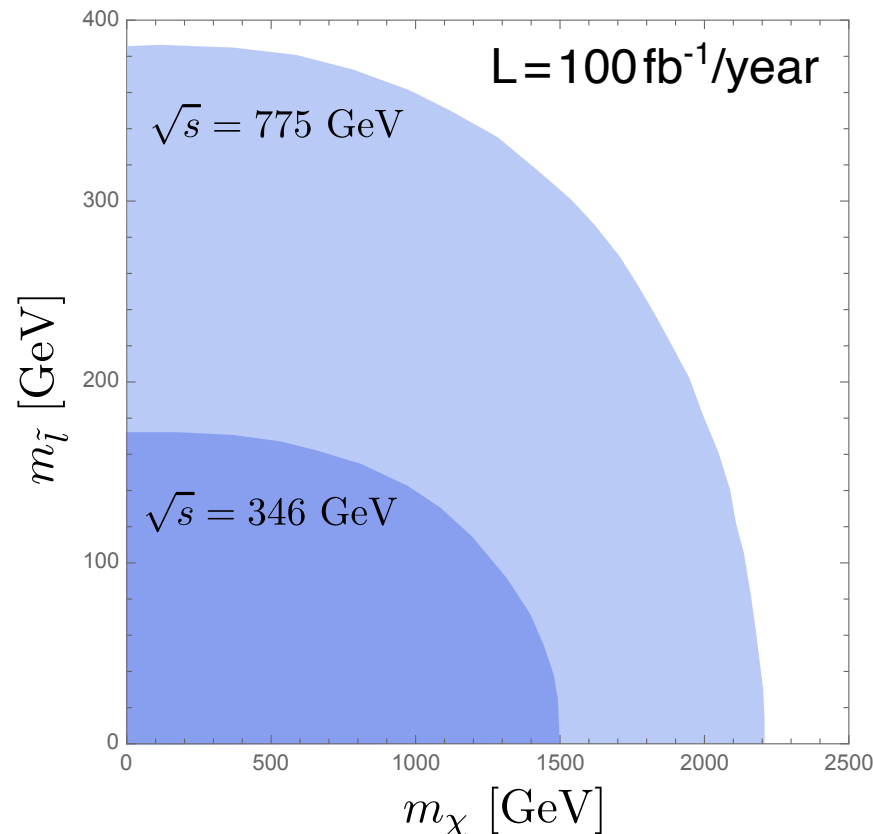
簡単のためWino  $\tilde{W}$  を交換する  
ダイアグラムのみ考える  
superpartner of  $SU(2)_L$  gauge boson

- $\mu^+\mu^+$  collider



# $\mu^+ e^-$ コライダーでの制限

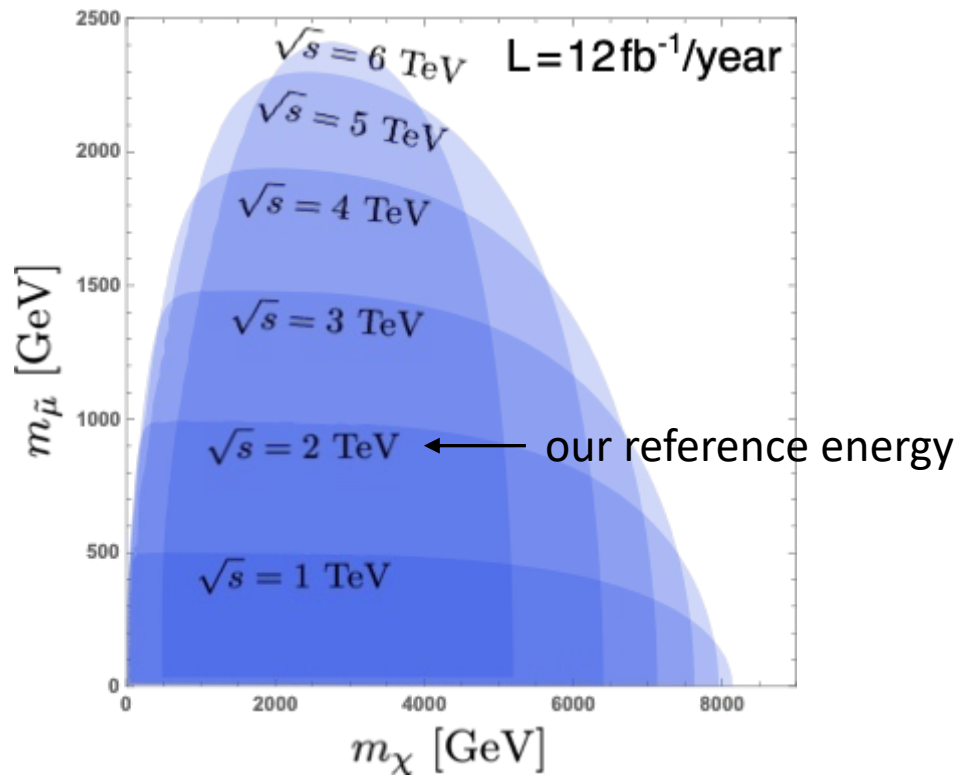
イベント数が100/年を超えるmass parameter領域



高エネルギーに届かないがLHCと違う領域をカバーする可能性

# $\mu^+\mu^+$ コライダーでの制限

イベント数が100/年を超えるmass parameter領域



$m_{\tilde{\mu}} \lesssim 1$  TeV が検出可能

muon g-2 アノマリーの説明でfavorされる領域



# SMEFT

Hamada, Matsudo, Kitano, Takaura on going

# SMEFT analysis

新物理スケールがSMスケールより十分重いと仮定した場合  
新物理効果は次元6演算子として現れる

→ **SMEFT** : 重い新物理を調べる一般的手法

$\mu$ TRISTANでの最も支配的な散乱過程を通じて  
次元6演算子に制限をかける

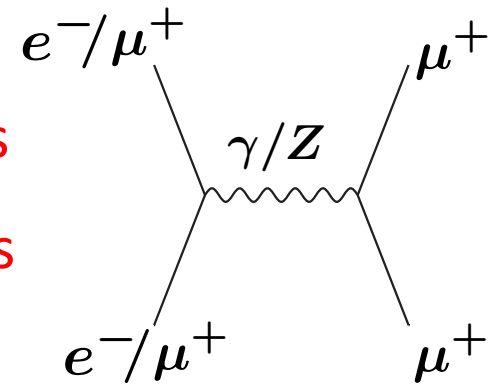
$$\cdot e^- \mu^+ \rightarrow e^- \mu^+$$

$O(10^6)$  events

$$\cdot \mu^+ \mu^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+$$

$O(10^6)$  events

イベントが大量なため強い制限が期待



# 次元6演算子

Adopt basis of  
2013 Alonso, Jenkins, Manohar, Trott

散乱実験で測れる演算子

$$Q_{HWB} = H^\dagger \tau^I H W_{\mu\nu}^I B^{\mu\nu} \quad \longleftarrow S\text{パラメータ}$$

$$Q_{HD} = (H^\dagger D_\mu H)^* (H^\dagger D_\mu H) \quad \longleftarrow T\text{パラメータ}$$

$$Q_{H\ell}^{(1)} = (H^\dagger i \overleftrightarrow{D}_\mu H) (\bar{L} \gamma^\mu L)$$

$$Q_{H\ell}^{(3)} = (H^\dagger i \overleftrightarrow{D}_\mu^I H) (\bar{L} \tau^I \gamma^\mu L)$$

$$Q_{H\mu} = (H^\dagger i \overleftrightarrow{D}_\mu H) (\bar{\mu} \gamma^\mu P_+ \mu)$$

$$Q_{ll}^{prst} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{l}_s \gamma^\mu l_t)$$

$$Q_{le}^{prst} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{e}_s \gamma^\mu e_t)$$

$$Q_{ee}^{prst} = (\bar{e}_p \gamma_\mu e_r) (\bar{e}_s \gamma^\mu e_t)$$

# Scattering

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_X C_X Q_X$$

$$\sigma = \underbrace{\sigma_{\text{SM}}}_{\text{Tree}} + \underbrace{\sigma_{\text{NP}}}_{\text{Linear in } C_X}$$

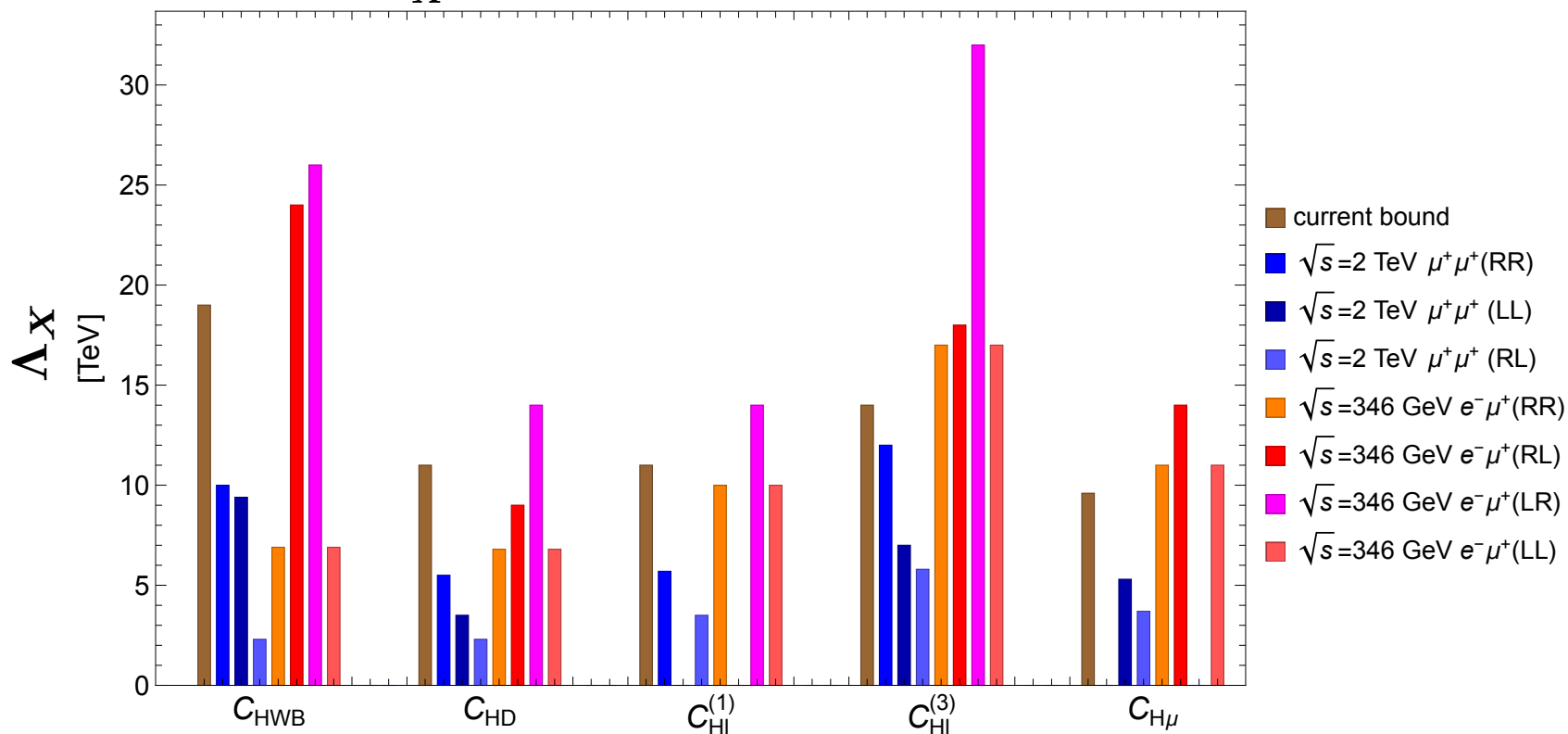
$$\chi^2 = \sum_{i:\text{bin}} \left( \frac{\sigma_{\text{obs},i} - \sigma_{\text{th},i}}{\Delta\sigma_{\text{obs},i}} \right)^2$$

2 $\sigma$ の制限を課す

# 得られる制限

$$C_X = \frac{1}{\Lambda_X^2}$$

Current bound from 2204.05260 by Bagnaschi et al.



現在の制限をimprove

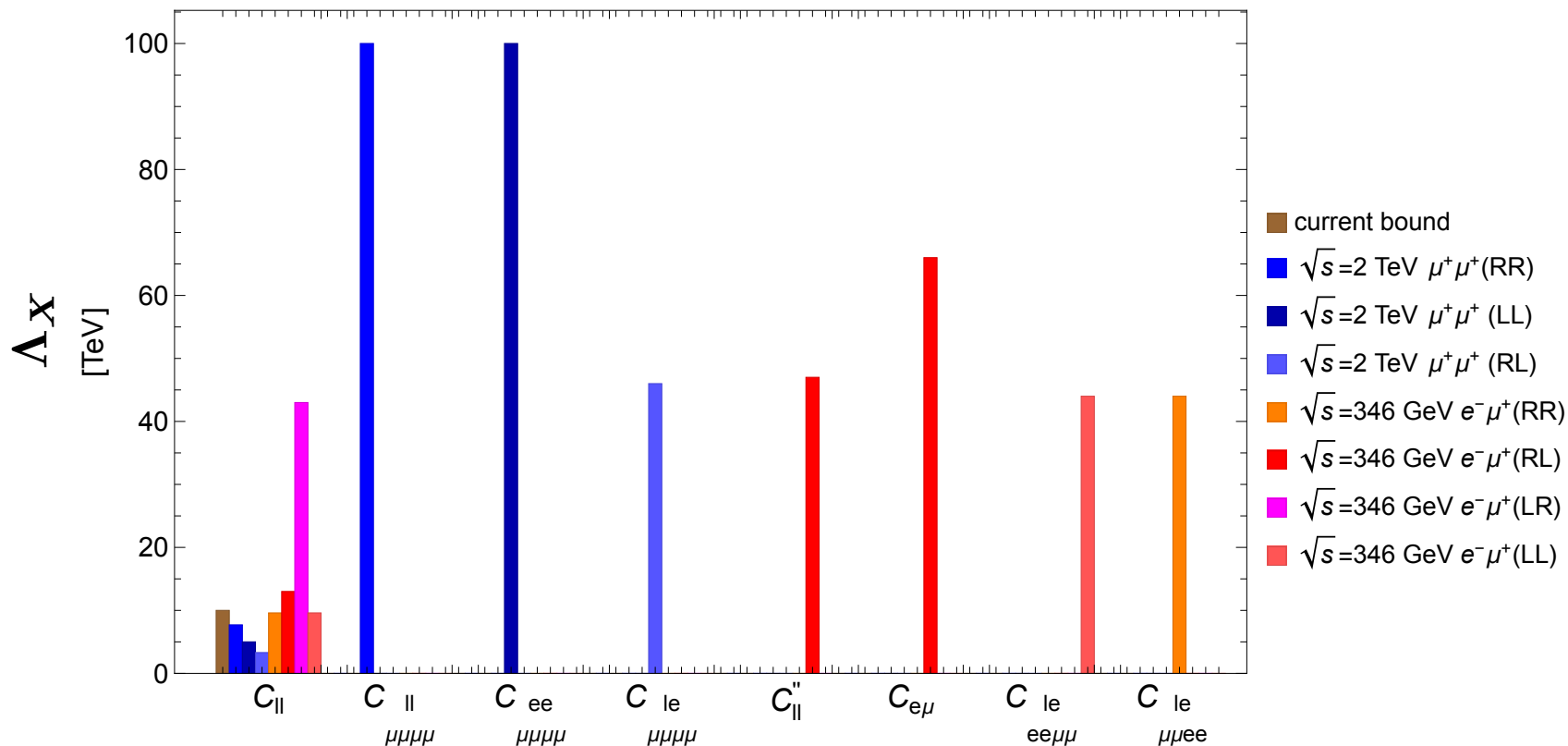
\*ここでは簡単のため

$P_{\mu^+} = P_{e^-} = \pm 1$  にセット

# 得られる制限

$$C_X = \frac{1}{\Lambda_X^2}$$

Current bound from 2204.05260 by Bagnaschi et al.



100 TeV程度まで検知!

\*ここでは簡単のため

$P_{\mu^+} = P_{e^-} = \pm 1$  にセット

# W boson mass アノマリー

最近CDFがW massのSM予言からのズレを報告

$$m_W = 80433.5 \pm 9.4 \text{ MeV} \quad (\text{CDF})$$

$$m_{W,\text{SM}} = 80354 \pm 7 \text{ MeV} \quad (\text{SM})$$

In SMEFT

$$m_W^2 = m_{W,\text{SM}}^2 \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{\cos^2 \theta_{\text{SM}}}{\cos^2 \theta_{\text{SM}} - \sin^2 \theta_{\text{SM}}} v_{\text{SM}}^2 C_{HD} - \frac{\sin^2 \theta_{\text{SM}}}{\cos^2 \theta_{\text{SM}} - \sin^2 \theta_{\text{SM}}} v_{\text{SM}}^2 \left( 2C_{He}^{(3)} - C_{\ell\ell} \right) - \frac{2 \cos \theta_{\text{SM}} \sin \theta_{\text{SM}}}{\cos^2 \theta_{\text{SM}} - \sin^2 \theta_{\text{SM}}} v_{\text{SM}}^2 C_{HWB} \right]$$

$C_{HD}$  でズレの説明が可能

2204.05260 by Bagnaschi et al.

$$C_{HD} = -[0.035, 0.019]/(\text{TeV}^2)$$

$\mu\text{TRISTAN}$ で期待されるエラー改善  $\delta C_{HD} = 0.005/(\text{TeV}^2)$

# Summary

- ・ ミューオンビームを使ったコライダー実験は  
高精度・高エネルギーを同時に実現できる魅力的オプション
- ・ 我々は現在の技術でクーリング可能な $\mu^+$ ビームを用いた  
実現性の高いコライダー実験を提唱 ( $\mu$ TRISITAN)

$\mu^+e^-$  コライダー

$$\mathcal{L}_{\mu^+e^-} = 4.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Sub percentレベルでのヒッグス精密測定

SMEFTを通じての新物理探索の向上

$\mu^+\mu^+$  コライダー

$$\mathcal{L}_{\mu^+\mu^+} = 5.7 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

TeVスケールのスカラーレプトン探索

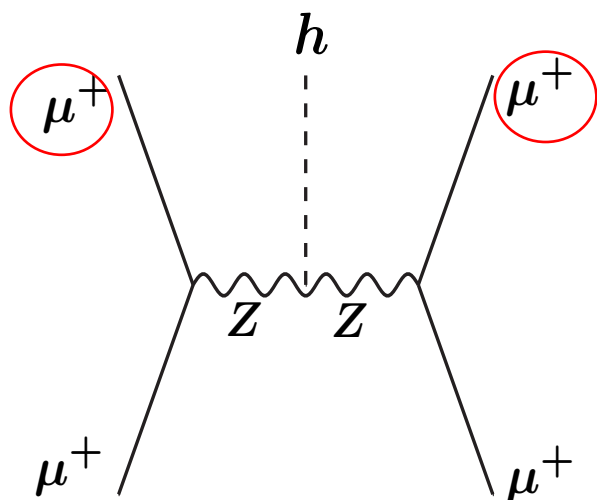
Four-fermion演算子の100 TeVまでの検出可能性



# Future prospects

ルミノシティ・コライダーデザインの改善が可能か

$\mathcal{L}_{\mu^+\mu^+}$  が向上した場合



Recoil energyの解析でヒッグスの崩壊先を見ずにヒッグス生成が分かる

- ・ 個別のカップリング測定
- ・ ヒッグス崩壊幅の測定

がより容易・高精度になると期待

# Future prospects

μTRISTANで探れるか？

- Higgs triple coupling
- Dark matter
- top mass
- W boson mass

