

# ILC から Muon Collider へ

野村大輔 (KEK 素核研)

研究会「ILC の多角的活用を考える会」  
@ KEK つくばキャンパス

2017年11月29日

# ILC から muon collider へ

ILC から  $e^\pm$  を取り出し、 $\mu^\pm$  を生成して利用することを考える  
**muon collider?**

より詳細は河村さんのスライド参照

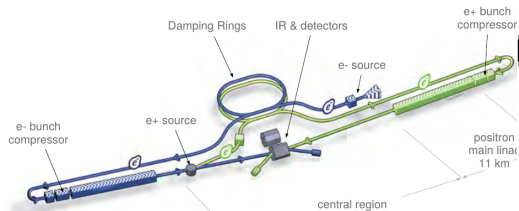
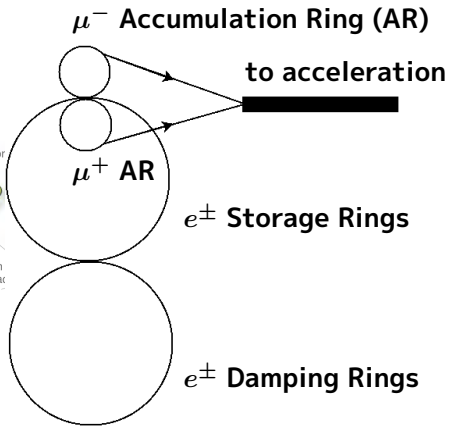


fig from ILC TDR

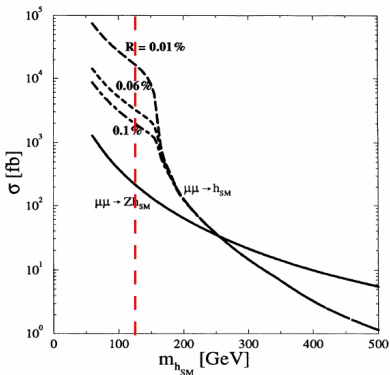


(not to scale)

# multi-TeV muon collider で何ができるか (1)

例えば  $\sqrt{s} = 4 \text{ TeV}$ ,  $\mathcal{L} = 10^{35} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$  の muon collider ができたとする  
と、そこでどんな物理ができるか。

## (1) Standard Model Higgs boson study



muon collider では s-channel でヒッグス  
ボソンを生成可能。

ビームエネルギーをどれだけ揃えられるか  
にもよるが、同じエネルギーの  $e^+e^-$  加速  
器より 1 桁から 2 桁多くヒッグスボソンを  
生成可能 (左図)。

これにより、ヒッグスボソン崩壊の分岐比  
をより詳細に調べることができる。

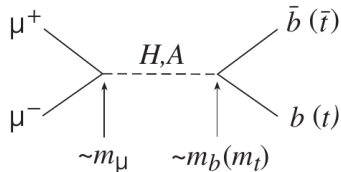
$\sqrt{s} = m_h$  での標準模型ヒッグスボソン生成断面積と、

$\sqrt{s} = m_Z + \sqrt{2}m_h$  での  $\sigma(\mu^+\mu^- \rightarrow Z^* \rightarrow hZ)$

fig from Barger et al, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 1462

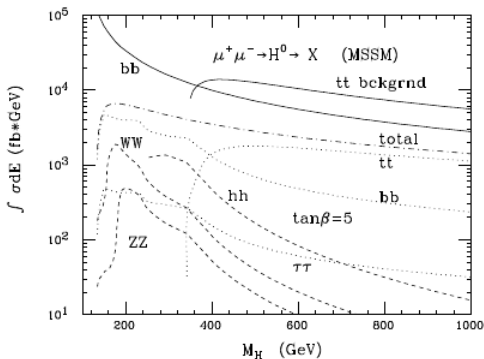
# multi-TeV muon collider で何ができるか (2)

## (2) MSSM Higgses Search



muon collider では s-channel 生成で MSSM Higgses  $H, A$  も探せる。

	$\mu^+\mu^-, b\bar{b}$	$t\bar{t}$	$ZZ, W^+W^-$
$h$	1	-1	1
$H$	$\tan\beta$	$-1/\tan\beta$	0
$A$	$-i\gamma_5 \tan\beta$	$-i\gamma_5/\tan\beta$	0



Typical signals and backgrounds for  $\mu^+\mu^- \rightarrow H \rightarrow X$  in the MSSM  
**MSSM CP-even Higgs  $H^0$  生成断面積**

**Figs and table from Barger,  
[hep-ph/9503258](http://hep-ph/9503258)**

## (3) SUSY Particle Searches

$\sqrt{s}$  と  $\int \mathcal{L} dt$  が十分であれば s-channel ( $\mu^+ \mu^- \rightarrow \gamma^*/Z^* \rightarrow \text{sparticles}$ ) で SUSY 粒子も探せる。

例えば  $\sqrt{s} = 4 \text{ TeV}$  の muon collider ができたとすると

$$\sigma_{\tilde{u}_{L,R}} = 4\beta^3 \text{ fb} \rightarrow 250 \text{ events}$$

$$\sigma_{\tilde{d}_{L,R}} = 1\beta^3 \text{ fb} \rightarrow 60 \text{ events}$$

$$\sigma_{\chi^\pm} = 6\beta \text{ fb} \rightarrow 500 \text{ events}$$

$$\sigma_t = 8 \text{ fb} \rightarrow 800 \text{ events}$$

$$\sigma_{Q_{E6}} = 6\beta \text{ fb} \rightarrow 600 \text{ events}$$

$$(\beta \equiv \sqrt{1 - 4m_{\text{SUSY}}^2/s})$$

for  $\int \mathcal{L} dt = 100 \text{ fb}^{-1}$  and  $m_{\text{SUSY}} = 1 \text{ TeV}$

table from Barger, [hep-ph/9503258](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9503258)

# muon の生成方法 (案) (下村さんとの議論による)

案 (1) :  $e^+e^-$  head-on collision

案 (2) :  $e^+$  beam on a fixed target

(より詳しくは山崎さん、河村さん、牧村さんの  
スライドをご覧ください)

# muon の生成方法 (1) : $e^+e^-$ 衝突

ルミノシティ  $\mathcal{L}$  とビームパラメータの関係 :

$$\mathcal{L} = \frac{f_{\text{col}} N^2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} H_D$$

$N$  : 1つのバンチ内の粒子数

$f_{\text{col}}$  : 単位時間あたりのバンチ同士の衝突の回数

$\sigma_x^*$  : 衝突点での水平方向の RMS ビームサイズ

$\sigma_y^*$  : 衝突点での鉛直方向の RMS ビームサイズ

$H_D$  : 衝突中のビーム間相互作用のための補正係数 (1 に近い数)

⇒ 以下、 $H_D = 1$  とする

いま、ダンピングリングを出た直後のビームを取り出して衝突させることを考える。上のパラメータのうち  $N$  と  $f_{\text{col}}$  については ILC TDR から値が読み取れるが、 $\sigma_x^*$  と  $\sigma_y^*$  については ILC 本来のビーム衝突点でビームを衝突させるわけではないため、何らかの仮定のもとでもっともらしい値を求め、その値を使う必要がある。

# muon の生成方法 (1) : $e^+e^-$ 衝突

衝突点でのビームサイズ  $\sigma_{x,y}^*$  を何らかの仮定のもとで求めたい。そのために

$$\sigma_x^* = \sqrt{\epsilon_{x,n}\beta_x^*/\gamma}, \quad \sigma_y^* = \sqrt{\epsilon_{y,n}\beta_y^*/\gamma},$$

という式を使う。ここで  $\beta_x^*, \beta_y^*$  はそれぞれ衝突点での水平方向、鉛直方向のベータ関数。  $\epsilon_{n,x}$  と  $\epsilon_{n,y}$  はそれぞれ水平方向、鉛直方向の規格化エミッタンス、  $\gamma$  はローレンツ因子。

ダンピングリングを出た直後のビームのエネルギーは  $e^+, e^-$  とともに 5 GeV なので  $\gamma = 1 \times 10^4$ 。また、ILC TDR での規格化エミッタンスの値は  $(\epsilon_{x,n}, \epsilon_{y,n}) = (6\mu\text{m}, 20\text{nm})$ 。以下、同様のエネルギーのコライダーとして CESR-C ( $(E_{\text{max}}^{\text{beam}}, \beta_x^*, \beta_y^*) = (6\text{GeV}, 0.94\text{m}, 0.012\text{m})$ ) での  $\beta_{x,y}^*$  の値を仮定すると、

$$\sigma_x^* = 24[\mu\text{m}], \quad \sigma_y^* = 0.15[\mu\text{m}],$$

を得る。  $\beta_{x,y}^*$  として KEKB での値  $(\beta_x^*, \beta_y^*) = (1.2\text{m}, 0.0059\text{m})$  や PEP-II での値  $(\beta_x^*, \beta_y^*) = (0.5\text{m}, 0.012\text{m})$  を使ってもオーダーは同じ。



# muon の生成方法 (1) : $e^+e^-$ 衝突

以上の結果を

$$\mathcal{L} = \frac{f_{\text{col}} N^2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

に代入すると、ILC TDR のパラメータ ( $f_{\text{col}}, N$ ) = (6560Hz,  $2 \times 10^{10}$ ) を使って、

$$\mathcal{L} = 5.8 \times 10^{30} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (1)$$

となる。KEKB の値 ( $\mathcal{L} = 21083 \times 10^{30} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ ) に比べずっと小さいのは、 $f_{\text{col}}$  の小ささがネックになっているから。つまり、ビームパルスの繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  (ILC の場合、5 Hz) の小ささがネックになっている。

もしダンピングリングの直後に蓄積リングをつなげてバンチ同士の衝突頻度を  $10^5$  倍程度にできるなら、ルミノシティは  $10^{35} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$  程度にできる。この場合、 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  の断面積がピークになる  $\sqrt{s}$  ( $\simeq 250\text{MeV}$ ) を使うと  $\sigma \simeq 1[\mu\text{b}]$  で、そこでは  $10^5$  イベント/秒程度の  $\mu^+\mu^-$  対生成が起こる。

# muon の生成方法 (2) : fixed target

45 GeV の  $e^+$  を fixed target に当てて  $\mu^+\mu^-$  pair を生成させる場合 (Collamati 氏の NuFact17 での talk に基づく)

標的として 3mm 厚の Be 標的を使うことを考える

一秒間に  $N_0$  個の  $e^+$  を標的に当てるとすると一秒あたりの  $\mu^+\mu^-$  生成イベント数は  $N \equiv N_0 n_e x \sigma$  イベント。ここで

$n_e$ : 標的内の単位体積あたりの電子の個数

$x$ : 標的の厚さ

$\sigma$ :  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  の反応断面積

数字を代入すると  $\text{eff.}(\mu^+\mu^-) = N/N_0 = 6.6 \times 10^{-8}$ 。

(44 GeV ビーム, 10mm 厚 Be なら  $\text{eff.}(\mu^+\mu^-) = 1.1 \times 10^{-7}$ 。山崎さんによる Geant4 での計算結果とよく合う)

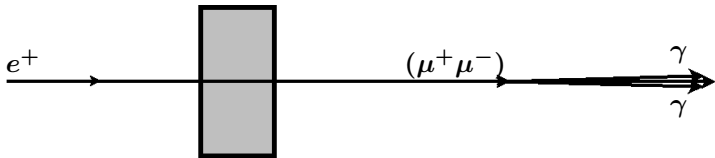
これに ILC のパラメータ  $N_0 = 5 \times 1312 \times 2 \times 10^{10}$  を代入すると  $N = 0.9 \times 10^7$  イベント/秒。

蓄積リングなどを使って  $e^+$  を貯めると、 $N_0$  を  $10^5$  倍程度にすることができる。そうすると  $N = 10^{12}$  イベント/秒 程度。

# True Muonium Search?

これだけ多くの  $\mu^+\mu^-$  がしきい値付近で対生成されるなら、そのうちいくつかは未発見の  $(\mu^+\mu^-)$  束縛状態 “**true muonium**” を作るはず。

⇒ true muonium search ができる可能性



true muonium が実際に生成されたとして、それをどう検出すればよいかは要検討

# まとめ

multi-TeV muon collider ができれば いろいろな物理ができる。

- Standard Model Higgs boson study
- MSSM (Minimal SUSY Standard Model) Higgs boson search
- SUSY particle search

毎秒  $10^{12}$  個程度の  $\mu^\pm$  が生成できる可能性がある  
(muon collider のルミノシティの評価については河村さんのスライドで)

日本に再びエネルギーフロンティアを！

# Backup Slides

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  total cross section

