

# ILCの物理 (深掘り)

末原 大幹 (東大ICEPP)  
for ILC-Japan 物理/測定器ワーキンググループ

# Contents

- ヒッグスの物理
  - なぜヒッグスを調べたいのか
    - Naturalness問題、拡張ヒッグスセクター、ヒッグスポータル、真空の問題
  - (HL-)LHCとHiggs factoryの違い
- 解析の一例: ヒッグス自己結合@550-550 GeV CM energy
  - 信号と背景事象、解析の戦略
  - 最近の進展から: フレーバー識別 with 深層学習 (Transformer)
  - FCCeeでも自己結合測定? (間接)

# Higgsは新物理の窓

GeV world  
SMが有効理論

湯川力  
Fermionの質量生成

TeV world  
SM相互作用は  
 $E^{-2}$ で減少  
新物理が本質

Electroweak  
symmetry breaking

標準理論の最後の  
本質的要素



Higgs boson

ヒッグスカ  
ヒッグス真空凝縮  
の直接的な証拠

Higgsへの疑問

- Naturalness
- Composite Higgs?
- Multiple Higgs?

Dark  
Matter?

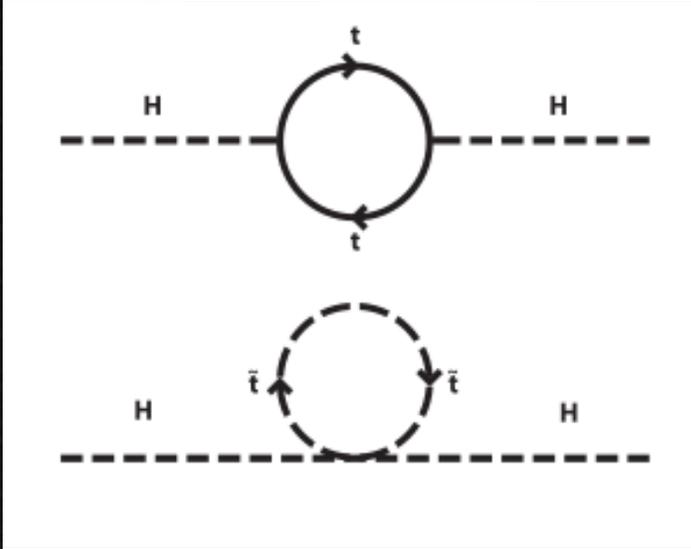
BSM  
(SUSY?)

Baryon  
Asymmetry?

Neutrino  
mass?

Inflation?

# ヒッグス粒子と「自然さ」



ヒッグス粒子の自己エネルギー  
キャンセルするダイアグラムが  
ないと無限に大きくなってしまふ

例えば同じ強さで符号が逆の  
ループがあればキャンセルして  
自己エネルギーへの寄与を消せる  
→ SUSYの場合

たとえばGUTスケールに「裸」のHiggs massが  
あり、それがループの寄与（電弱スケール  
からGUTスケールまで積分）とちょうど  
打ち消して電弱スケールにHiggs massが出た  
とすると、「不自然」な問題がある

一般にTeVスケールに新粒子がいてこの効果を  
消すことがnaturalnessに対する解答になる

# 拡張ヒッグスセクター / 複合ヒッグス

## Two Higgs doublet model (2HDM)

- SM Higgs/EW sector:  $W^\pm$ ,  $Z^0$ ,  $h$  (ヒッグス機構)
- 2<sup>nd</sup> Higgs sector:  $H^\pm$ ,  $A$  (CP-odd Higgs),  
 $H$  (Heavy CP-even Higgs)

ヒッグスとフェルミオンの結合の種類により

Type-1, 2, X, Yの2HDMがある

SUSYは Type-2 2HDMの一種

(なので(超対称性でない)Heavy Higgsを複数持つ)

さらに複雑な3HDM等もある。検出の方法は

- Heavy Higgsを直接探す (直接探索)
- SM Higgs ( $h$ )とSM粒子の結合のずれを見る (間接探索)

## 複合ヒッグス

- ヒッグスは複合粒子で  
QCD pionのような有効場状態
- TeV領域に(pionに対するkaon  
のような)高い共鳴状態が現れる
- 余剰次元模型と現象論的に等価

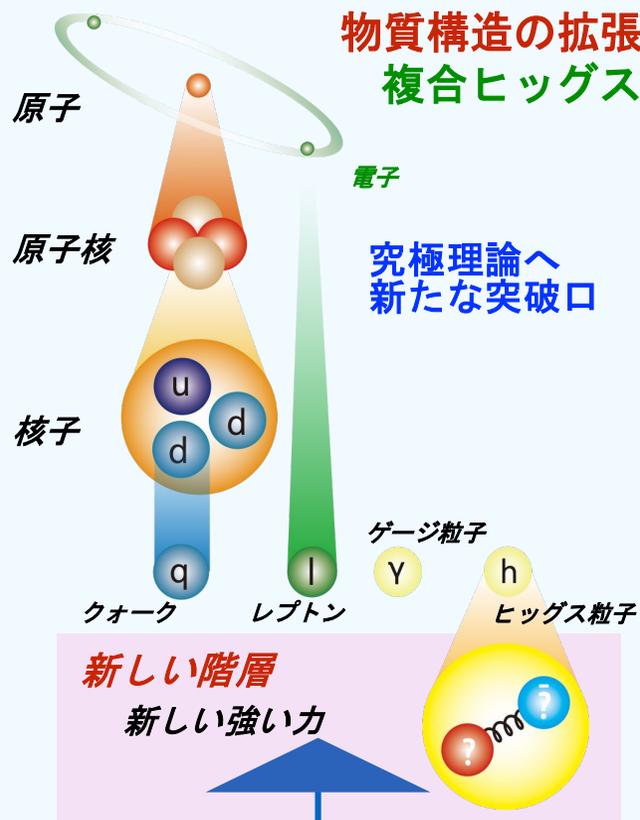
Technicolor, Little Higgsなどの模型がある。Little Higgsはtop partnerが重要な新粒子となる

拡張ヒッグスと同様に、  
直接探索とHiggs結合による間接  
探索がある。(WW scatteringもある)

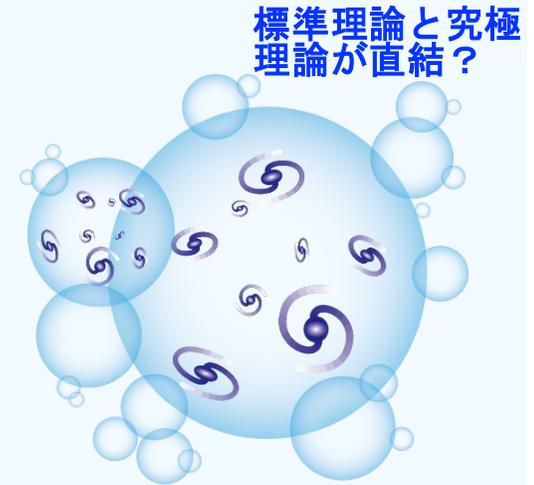
時空概念の拡張  
超対称性または余剰次元



物質構造の拡張  
複合ヒッグス



全く新しい原理？  
複数字宙＋人間原理？



第二の道：「より深い階層」

第一の道：「新たな次元」

現在地  
(電弱スケール)

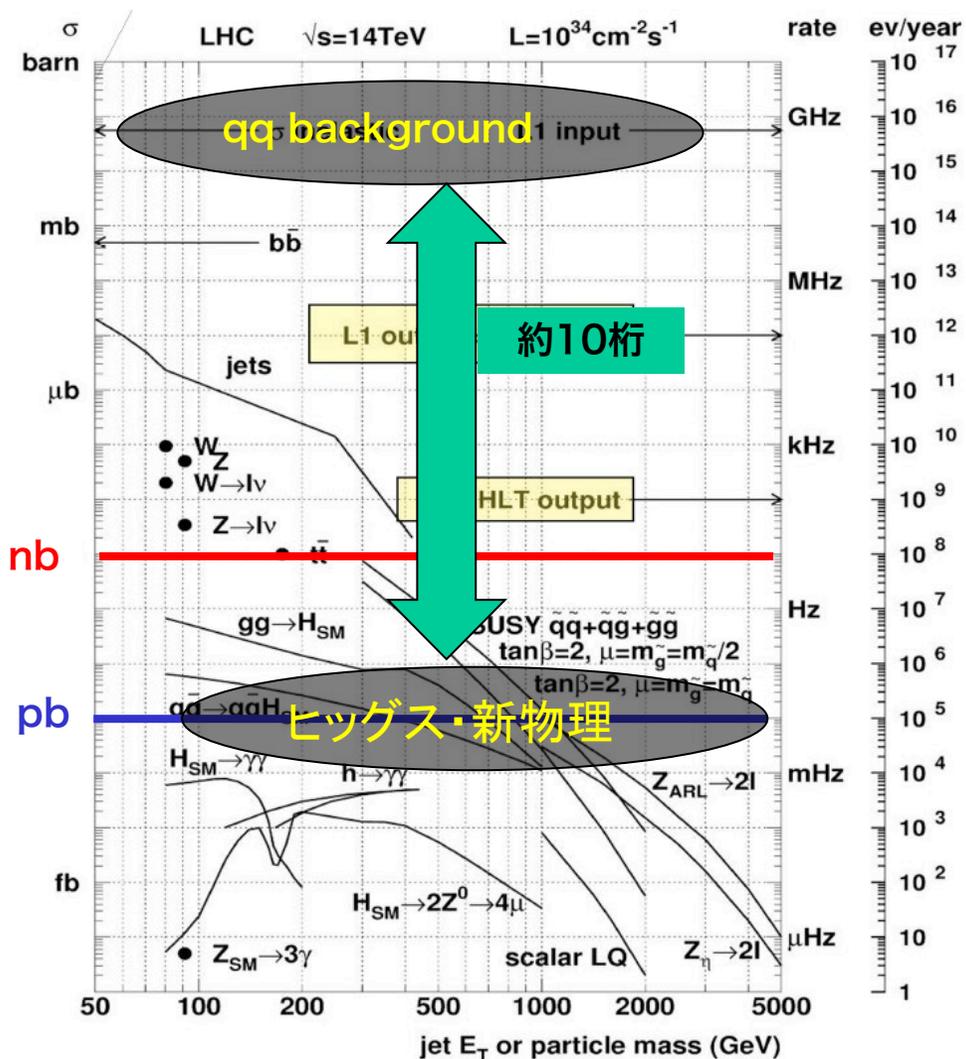
第三の道：「複数字宙？」

標準理論からのズレが見られなかった場合

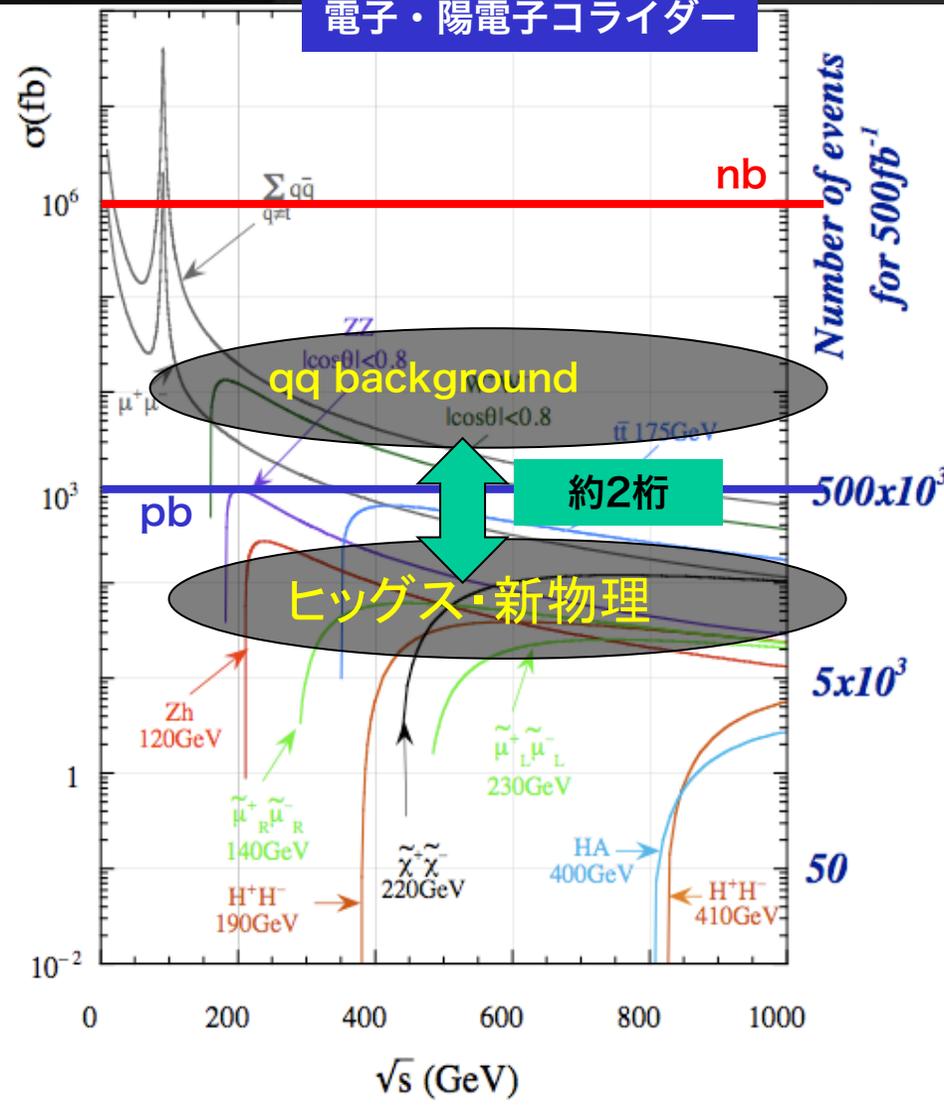
※: 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

# ハドロンコライダーとレプトンコライダー (1)

## ハドロンコライダー



## 電子・陽電子コライダー



信号の断面積はLHCが一桁多い

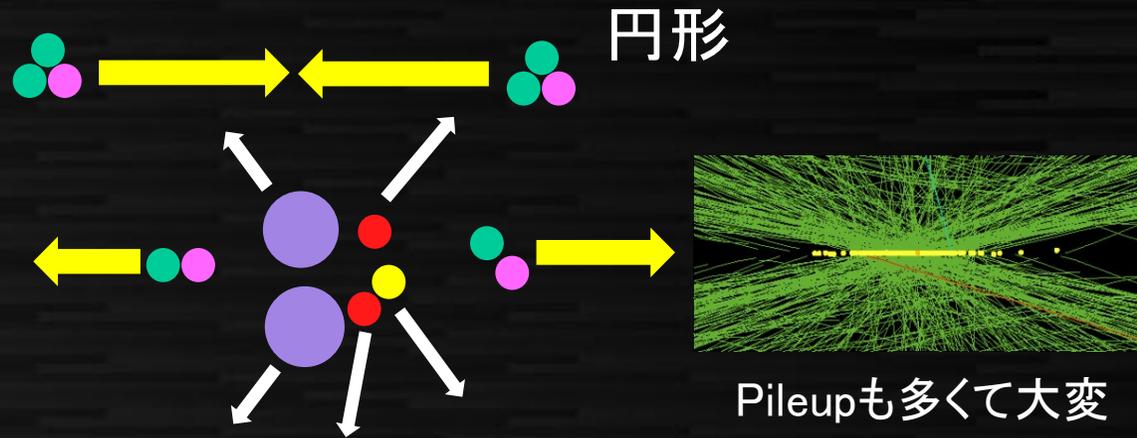
背景事象はLHCが圧倒的に多い

トリガーやカットにより背景事象を強力に落とす必要がある  
特徴的な信号(レプトン、大きなmissing等)が必要となる

# ハドロンコライダーとレプトンコライダー (2)

## Hadron collider (LHC)

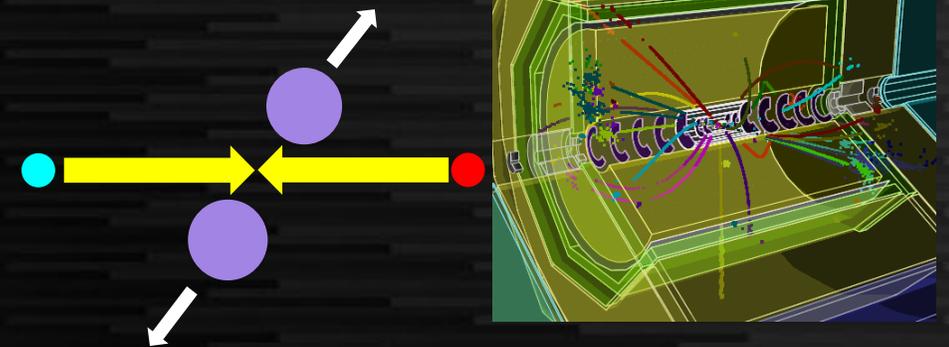
陽子・陽子衝突 14000 GeV



## Higgs factory (ILC, FCCee, ...)

電子・陽電子衝突 240- GeV

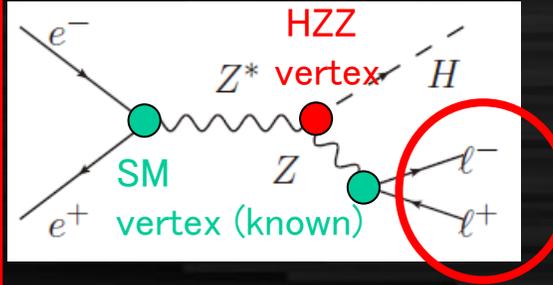
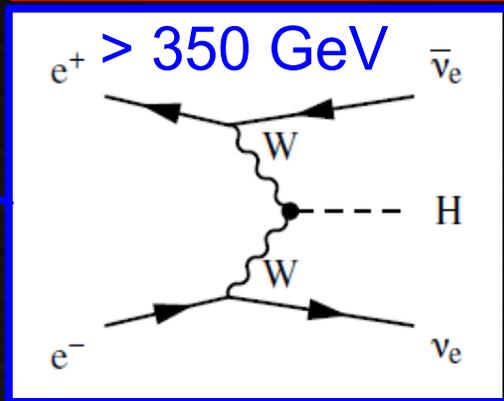
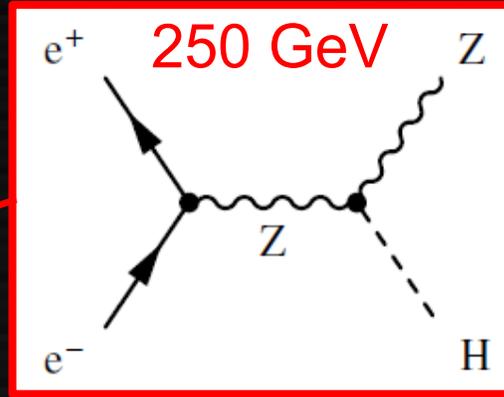
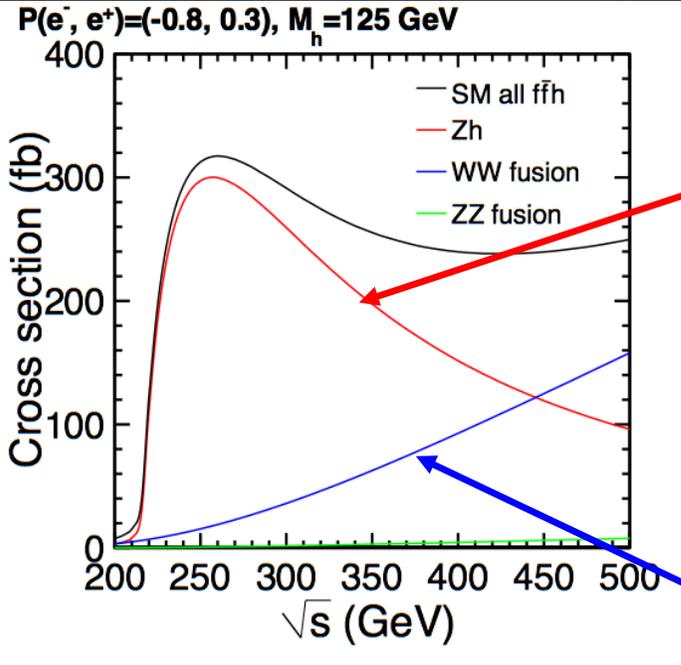
線形



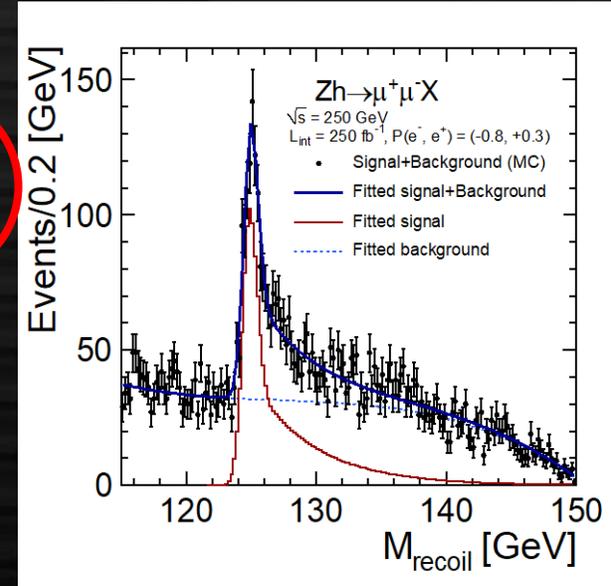
- エネルギーはHadron colliderが高い
- Hadron colliderではエネルギーの大部分はspectatorとなり、高エネルギーの事象は少ない。Lepton colliderはfull energyを使える
- Lepton colliderは4元運動量保存、hadron colliderはpT保存のみ (単純にcutに使える変数が多い)
- Linear colliderでは電子・陽電子偏極も使える (さらにパラメータが多い)

# Higgsの生成過程と全断面積・質量測定

## ZH全断面積・質量測定



$$m_h = \sqrt{E_h^2 - p_h^2}$$



Zの四元運動量と初期条件から  
Hの四元運動量→Hの質量が求まる  
イベント数からHの崩壊モード非依存に  
全断面積( $\propto HZZ$ 結合定数)が求まる

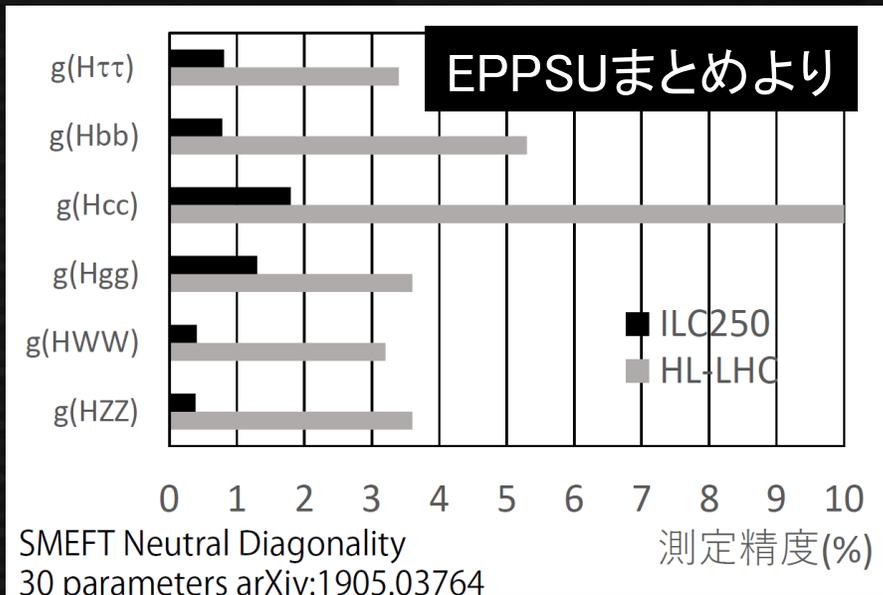
# Higgs結合の精密測定

SUSY

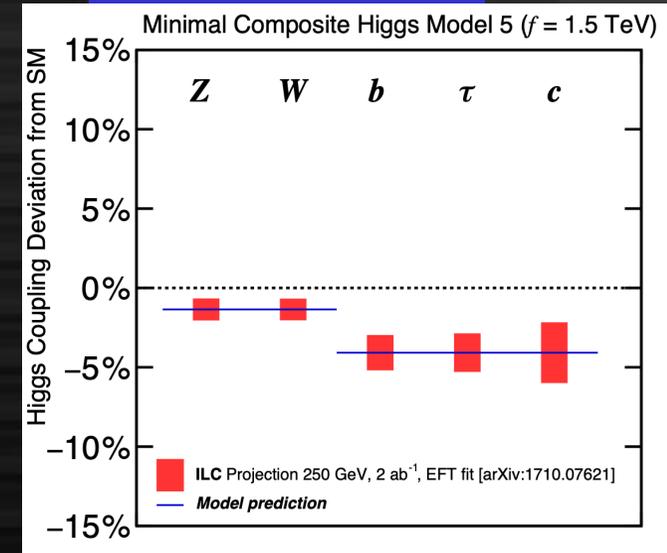
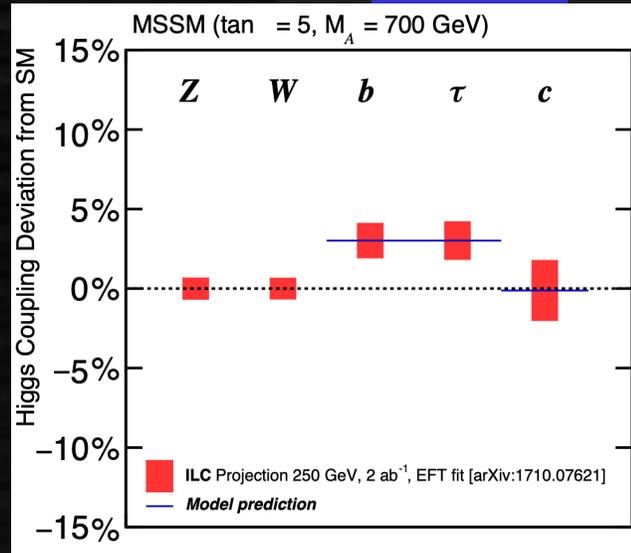
複合ヒッグス

## Higgs崩壊モードの分類

クォークのフレーバ識別が重要  
(後述)



ざっくり一桁の精度向上が期待される



ずれのパターンから様々な新物理の分離が可能

Higgsの量子補正  $\Delta m_H$  と Higgs結合定数について  
 $m_H^2 / \Delta m_H^2 \sim \delta g_h / g_h$  という関係が期待される。

$\Delta m_H$  が新物理スケールだと思えば、  
 $O(1\%)$  の結合定数測定は 1 TeV の新物理の  
 間接探索になる。

# Higgsと軽い新物理

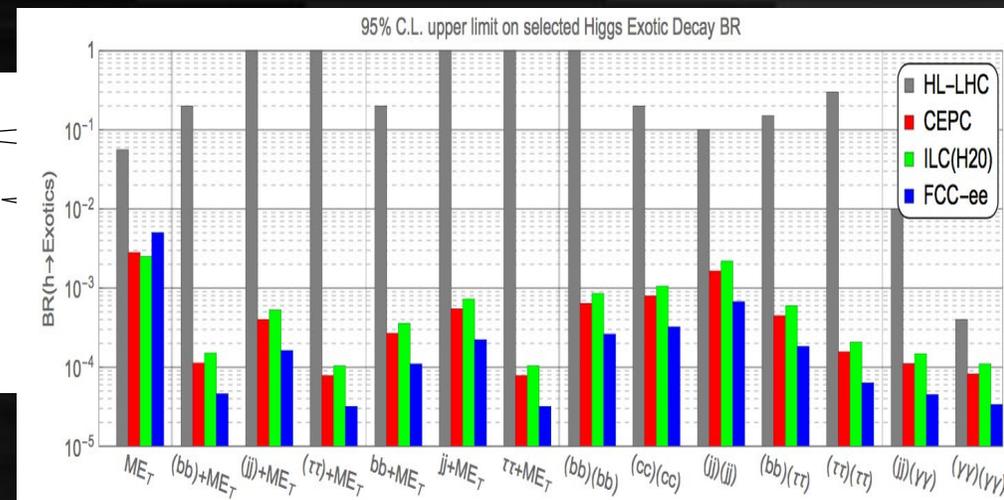
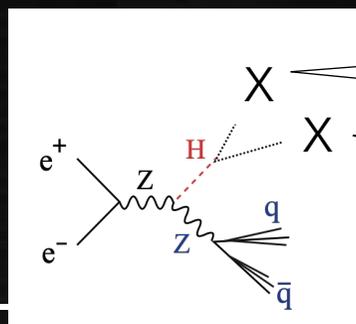
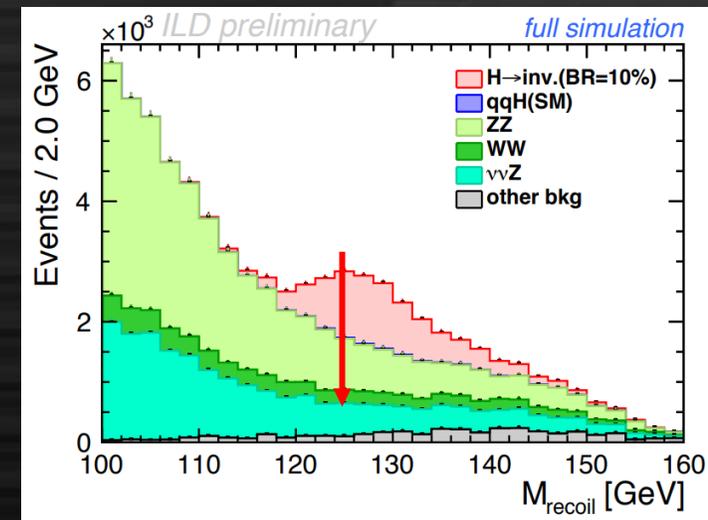
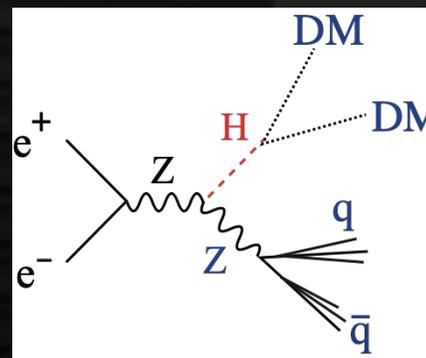
- LHCでTeV新物理が見えないため  $m_H$  以下の新物理 (GeV, MeV DM) への関心増
- Higgs exotic/invisible崩壊 “Higgsポータル”

– Higgsのみと結合する新物理

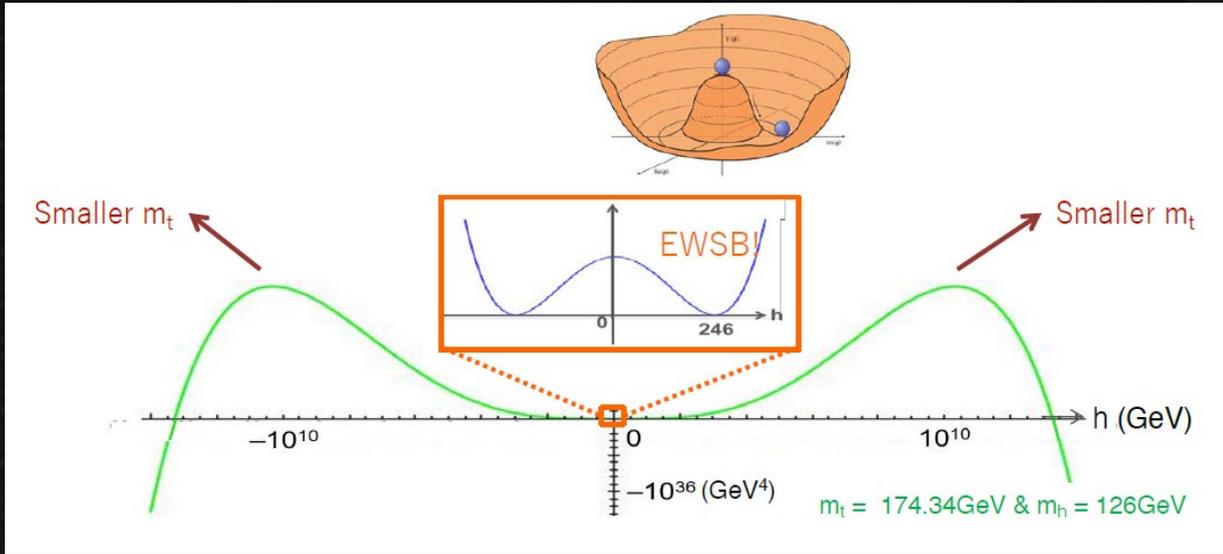
– Higgs  $\rightarrow XX$  ( $\rightarrow xxxx$ )  
(SM粒子 or DM)

– 0.01 – 0.1% BRに感度

– Invisible崩壊はjetエネルギー分解能が重要 (深層学習の応用)



# ヒッグス自己結合: 真空と時空の問題

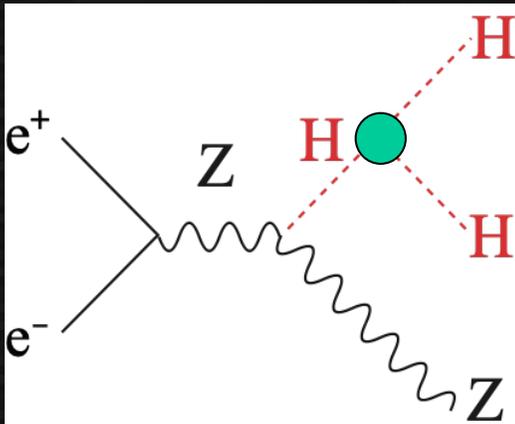


ヒッグスに関する相互作用

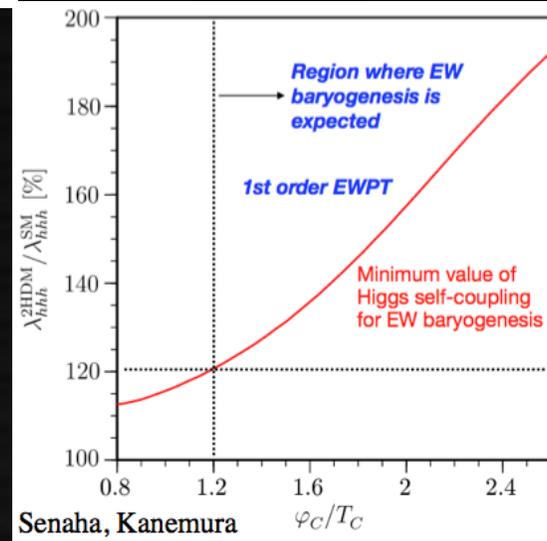
- ゲージ相互作用 (ヒッグス機構)
- 湯川相互作用 (フェルミオン結合)
- 自己相互作用

独立な項であり、独立な検証が必要  
自己相互作用のみ未検証  
(HL-LHCでも完全な検証は難しい)

ヒッグスの自己相互作用は真空の Higgs potential と直接関係している



Higgsを複数終状態に  
持つプロセス  
断面積が小さい

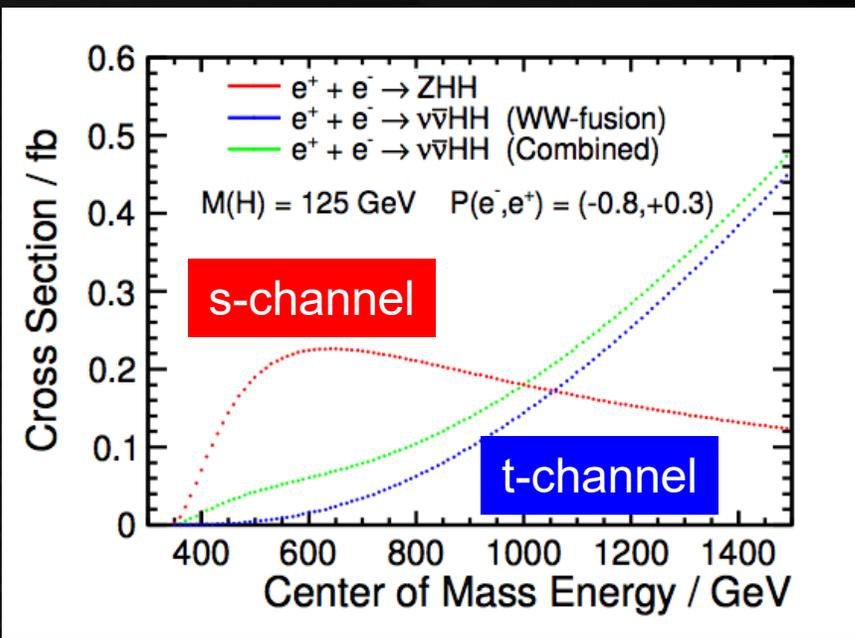


自己結合が大きいことは  
電弱バリオジェネシスが  
起きる条件の一つ

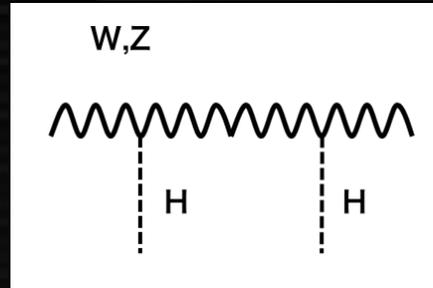
宇宙の物質生成にも  
関係する

# Higgs 自己結合の解析

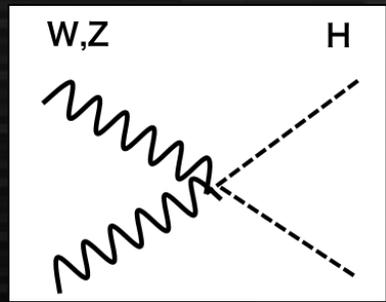
$$V(\eta_H) = \frac{1}{2} m_H^2 \eta_H^2 + \lambda v \eta_H^3 + \frac{1}{4} \lambda \eta_H^4$$



## 干渉するダイアグラム



ゲージ結合 x 2

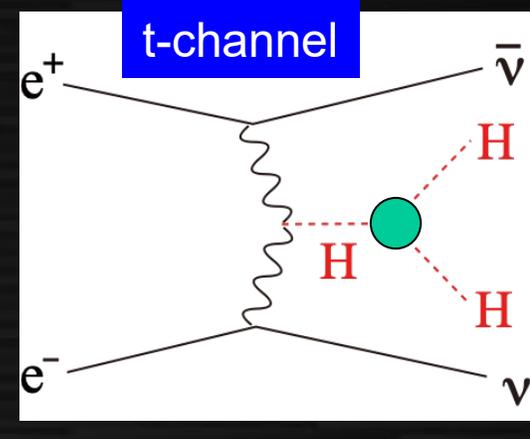
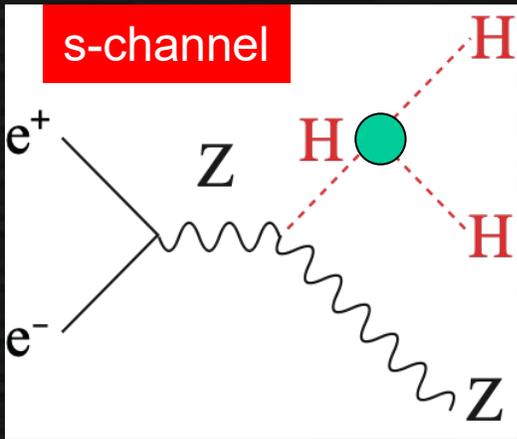


ゲージ4点結合

信号:  $O(100)$   
 背景:  $O(100万)$   
 ( $tt \rightarrow bbWW$ )

S-channel (ZHH)  
 信号の内訳

$O(100)$  events /  $ab^{-1}$



Z decay mode	HH decay mode	BranchingRatio
$Z \rightarrow e^+e^-$	$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	1.1%
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-$	$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	1.1%
$Z \rightarrow \nu^+\bar{\nu}$	$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	6.7%
$Z \rightarrow b\bar{b}$	$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	5.0%
$Z \rightarrow q\bar{q}$	$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	17%
$Z \rightarrow b\bar{b}$	$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*, WW^* \rightarrow 4q$	1.7%
$Z \rightarrow c\bar{c}$	$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*, WW^* \rightarrow 4q$	1.4%
$Z \rightarrow b\bar{b}$	$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*, WW^* \rightarrow l\nu 2q$	1.1%
$Z \rightarrow c\bar{c}$	$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*, WW^* \rightarrow l\nu 2q$	0.92%
$Z \rightarrow l^+l^-$	$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*, WW^* \rightarrow 4q$	0.76%
$Z \rightarrow l^+l^-$	$HH \rightarrow b\bar{b}WW^*, WW^* \rightarrow l\nu 2q$	0.50%

Table 1: signal channels analysed for  $e^+e^- \rightarrow ZHH$  at  $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$ .

# 解析の手法 (初心者向け)

信号:  $O(100)$

背景:  $O(100万)$

( $tt \rightarrow bbWW$ )

他, ZZH, ZH, ZZなど

イベント生成  
(シグナル/バックグラウンド)

モデル $\rightarrow$ 粒子

測定器シミュレーション

粒子 $\rightarrow$ ヒット

再構成

ヒット $\rightarrow$ 粒子

解析 (カット、フィット、  
物理パラメータ導出など)

粒子 $\rightarrow$ モデル

再構成の中身 (主なもの)

- 飛跡再構成 (tracking)
- Particle Flow / 粒子識別
- ジェットクラスタリング
- **ジェットフレーバー識別**

自己結合の解析の場合

- $Z \rightarrow ll, nn, qq$ で場合分け
- $Z \rightarrow qq$ の場合、 $HH \rightarrow 4b$ をまず考える  
( $2b2W$ は $tt$ と分けられない)
- **フレーバー識別を使って**  
 **$4b$ と $2b$ を分ける**  
 $tt, ZZH \rightarrow 4q2b$ を分ける  
( $tt$ をここで3桁落とす)
- **Kinematic cut**で $4b$ 背景事象を主に落とす  
(1桁以上の改善が必要)

## 解析の流れ

- 信号と背景事象の特徴量を取り出す  
解析フレームワーク (ilcsoft)を使い、  
ほしい変数をROOT tree等に出す
- Cut plotを作り条件を考える  
(もしくは多変量解析に入力する変数を考える)
- Signal significanceを出したり、物理量をfitで出したりする

# Previous results

## • results (example individual channels)

$ZHH$ channel	$s$ ( $HH \rightarrow bbbb$ )	$b$	$\sigma_e$	eff.
$eeHH$	$3.9 \pm 0.03$ (2.6)	$7 \pm 0.6$	$1.29\sigma$	<b>59%</b>
$\mu\mu HH$	$5.1 \pm 0.03$ (2.8)	$9 \pm 0.5$	$1.48\sigma$	<b>55%</b>
$\nu\nu HH$	$5.6 \pm 0.04$ (5.5)	$7 \pm 1.0$	$1.78\sigma$	<b>19%</b>
$bbHH$	$8.5 \pm 0.10$ (8.0)	$22 \pm 1.3$	$1.75\sigma$	<b>29%</b>
$qqHH$	$12.6 \pm 0.1$ (10.9)	$55 \pm 2.0$	$1.65\sigma$	<b>15%</b>

**Table 2:** Results of the event selection of  $ZHH$  with  $HH \rightarrow bbbb$  corresponding to an integrated luminosity of  $\mathcal{L} = 2 \text{ ab}^{-1}$  and a beam polarisation of  $P(e^+e^-) = (0.3, -0.8)$ .

major bkg.:  $tt, ZZ, ZH, ZZZ, ZZH$

## • results (combined)

$\sqrt{s}$	$\int L dt$	$\Delta\sigma/\sigma$	$\Delta\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}$
ZHH @ 500 GeV	$4 \text{ ab}^{-1}$ (*)	17%	27%
$\nu\nu HH$ @ 1 TeV	$4 \text{ ab}^{-1}$ (**)	15%	10%

$P(e^+, e^-) =$  \*: equally shared by  $(-0.8, +0.3)$  and  $(+0.8, -0.3)$ ; \*\*:  $(-0.8, +0.2)$

古い解析 (2013?)

- 古いFlavor識別 (LCFIPlus)
- BDT-based analysis
- 干渉diagramの影響は Higgs mass分布を使って低減している (青→赤の変換で考慮)

考察

- $qqHH, nnHH$ のeffが低い ( $qqHH$ はflavor tagで改善する?)
- Jet clusteringの間違えが性能を悪くしている (こちらDNNで改善?)

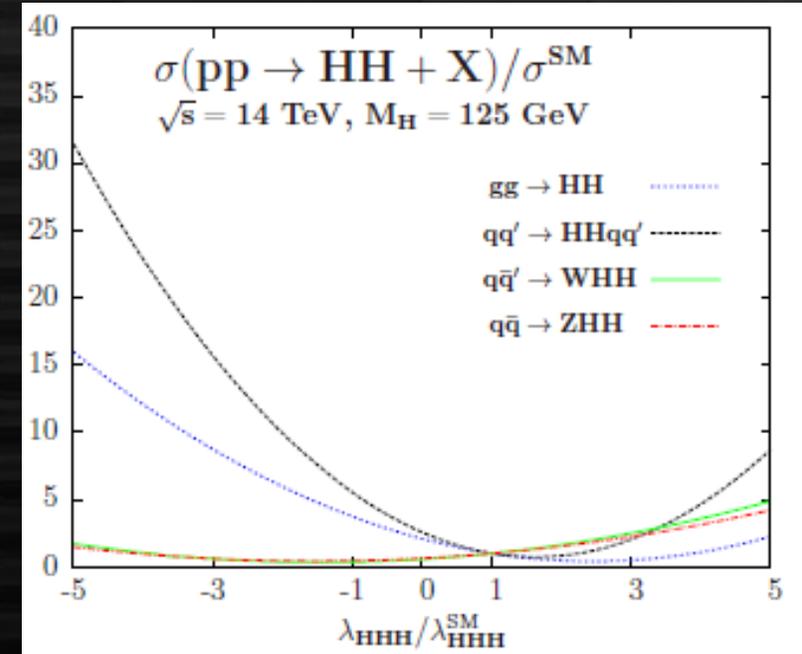
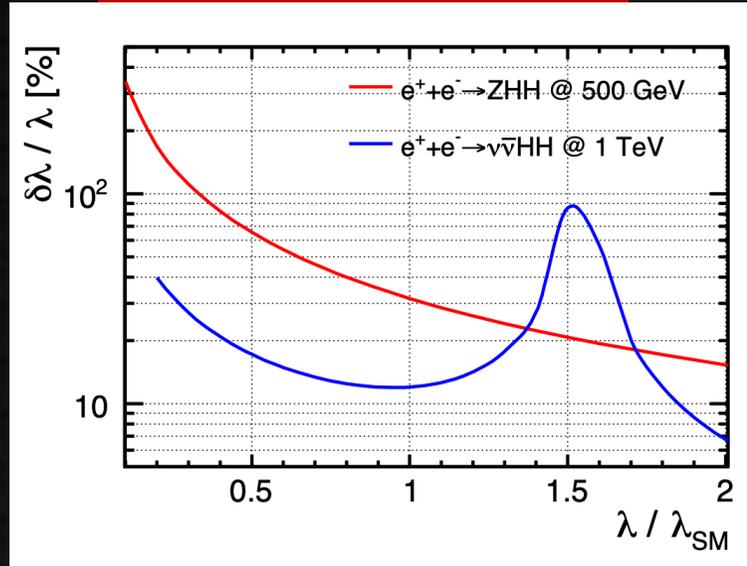
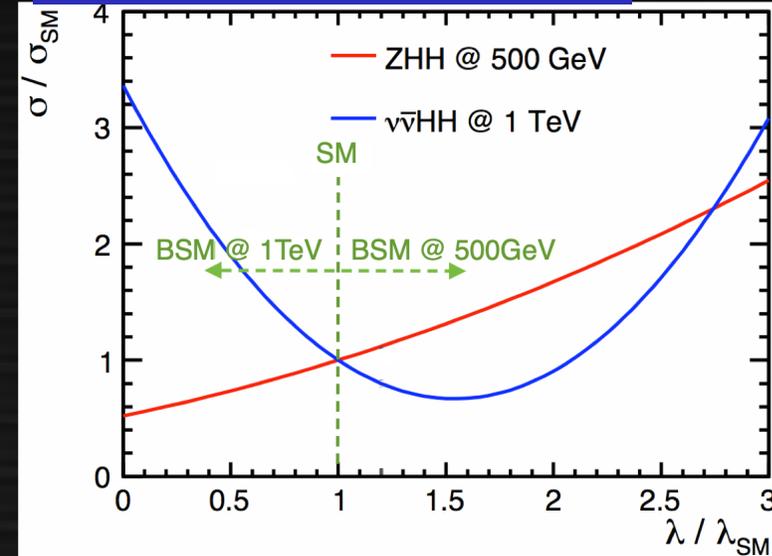
# 干渉の効果と $\delta\lambda$

ILC (500 & 1000 GeV)

HL-LHC

Effect of interference

Gradient  $\rightarrow$  resolution



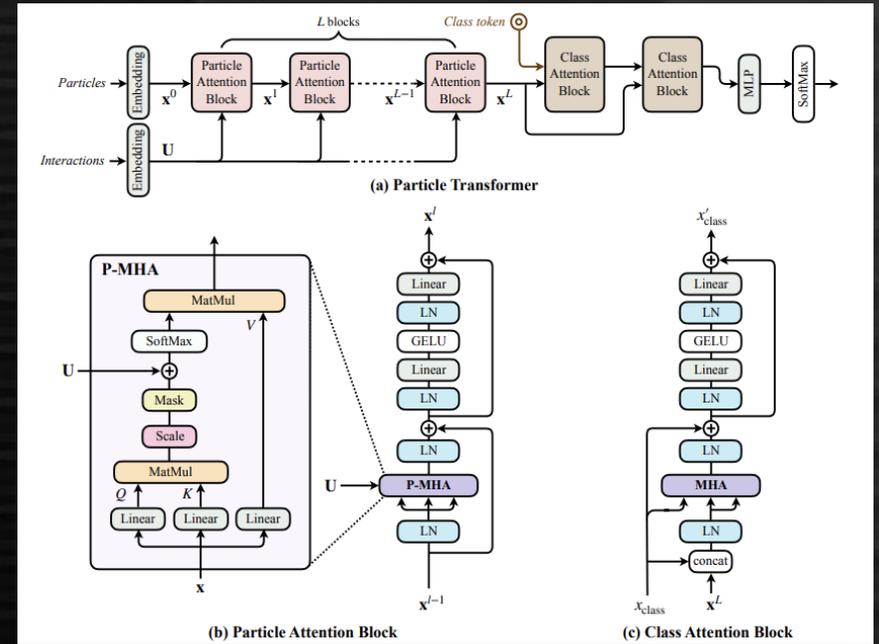
干渉がなければ $\lambda$ の精度は $\sigma$ の精度の半分 ( $\delta\lambda/\lambda = 1/2.0 \times \delta\sigma/\sigma$ )

- ILC: **x0.85** (ZHH@500 GeV), **x1.8** ( $\nu\nu$ HH@1 TeV) @ $\lambda=1$
- HL-LHC: **x0.8** (for  $gg \rightarrow HH$ ) @ $\lambda=1$

$\lambda$ が大きいとZHHは精度が向上( $\sigma$ が増えるため),  $\nu\nu$ HHは低下, ただし $\lambda > 1.7$ では復活  
HL-LHCでは $1 < \lambda < 3$ はかなり困難, 逆に $\lambda < 1$ では有利

# Expectation of improvements: flavor tag

- Transformer: 自然言語処理で開発された深層ネットワーク (e.g. ChatGPT)
  - 多分野の課題に高いパフォーマンスを出している game changer
  - 2つのオブジェクト間の関係を学習する
- Particle Transformer: 粒子間の相関を取り入れたtransformer
  - ParticleNetを上回る性能を発揮 (@LHC-like simulation)
  - CMS flavor taggingの次期バージョンで採用予定
  - ILC applicationを国内で推進中

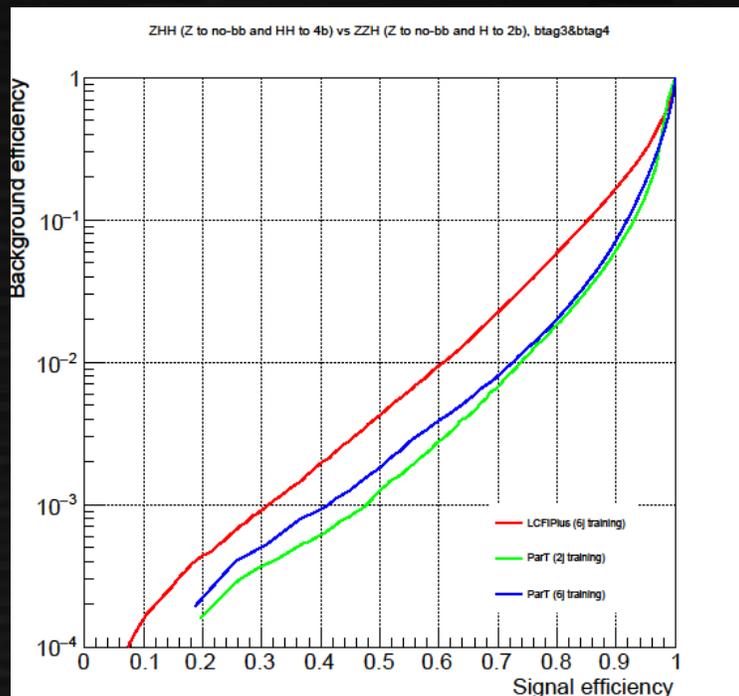


	b-tag 80% eff.		c-tag 50% eff.	
background	c jets	uds jets	b jets	uds jets
+LCFIPlus (BDT)	6.3%	0.79%	7.4%	1.2%
*ParT (initial)	1.3%	0.25%	1.0%	0.43%
**ParT (improved)	0.48%	0.14%	0.86%	0.34%

Signal: qqHH: qq→0b, HH→4b

Bkg: qqqqH: qqqq→0b, H→2b

# 性能向上の予測



LCFIPlus → ParTにより、qqHHモードで>30%の efficiency改善を予測 (15% → >20%?)

- ただし4b backgroundのcutを強化する必要あり
- 他の終状態にも効くと考えられる
- Full analysis to be done (in a few months?)

事象分類にもParTを使うことが可能

- Mis-jet clusteringの影響を低減したい
- 2月にDESYからのvisitorとやってみる予定

ZHH channel	$s$ ( $HH \rightarrow bbbb$ )	$b$	$\sigma_e$	eff.
$eeHH$	$3.9 \pm 0.03$ (2.6)	$7 \pm 0.6$	$1.29\sigma$	<b>59%</b>
$\mu\mu HH$	$5.1 \pm 0.03$ (2.8)	$9 \pm 0.5$	$1.48\sigma$	<b>55%</b>
$\nu\nu HH$	$5.6 \pm 0.04$ (5.5)	$7 \pm 1.0$	$1.78\sigma$	<b>19%</b>
$bbHH$	$8.5 \pm 0.10$ (8.0)	$22 \pm 1.3$	$1.75\sigma$	<b>29%</b>
$qqHH$	$12.6 \pm 0.1$ (10.9)	$55 \pm 2.0$	$1.65\sigma$	<b>15%</b>

Expected improvements  
(to be included in ECFA study)  
27% → **18%** (他の改善も含む)  
(preliminary)

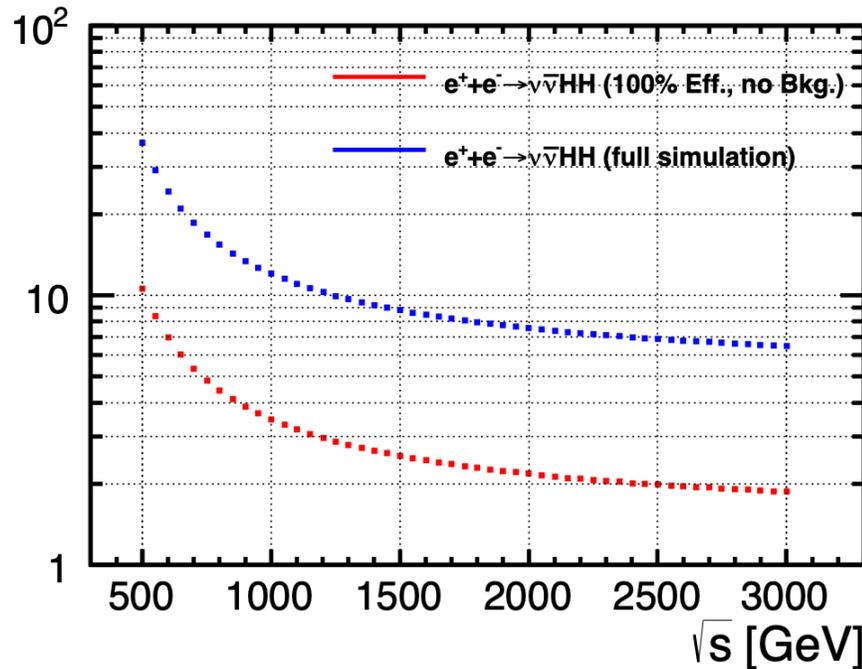
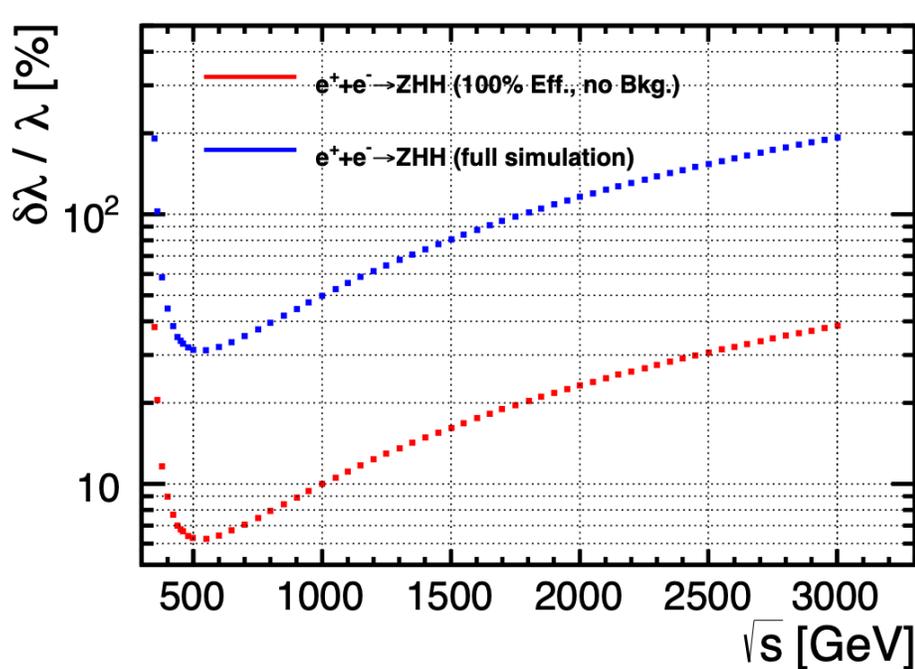
**Table 2:** Results of the event selection of ZHH with  $HH \rightarrow bbbb$  corresponding to an integrated luminosity of  $\mathcal{L} = 2 \text{ ab}^{-1}$  and a beam polarisation of  $P(e^+e^-) = (0.3, -0.8)$ .

# CM energyの効果 (500 → 550 GeV)

- 550 GeVでは $\nu\nu HH$ のcross sectionが大幅に上昇  
(ZHHは大きく変わらない) expected: 18% → 13% (preliminary)

ZHH

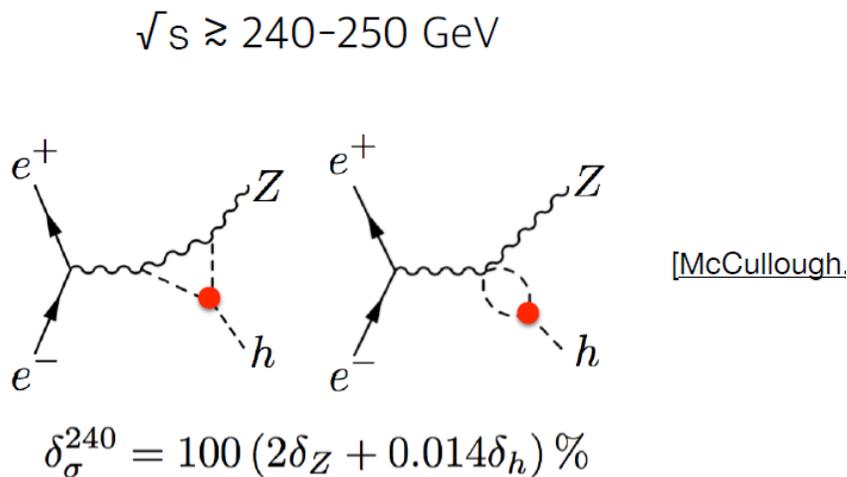
$\nu\nu HH$



optimal  $\sqrt{s}$  ~ 500-600 GeV

# おまけ: $\lambda$ by single Higgs

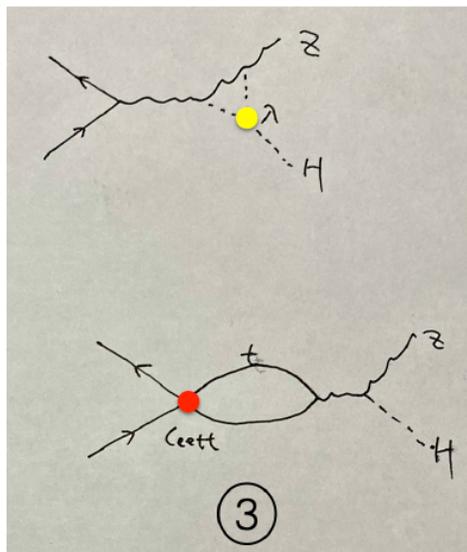
A new question:  $\lambda_{hhh}$  from Single-Higgs?



if **only**  $\lambda_{HHH}$  allowed to vary  $\rightarrow \delta\lambda_{hhh} \sim 20\%$  @ CEPC  
would that be a **discovery**?

first look at the global fit with NLO eett for  $\Delta\lambda_{HHH}$

[ongoing work by: Yong Du, Jiayin Gu, JT]



- based on a fitting program for last ESU: 23 (Higgs + WW + EWPO) + 5 (eett) operators
- take directly covariance matrix as eett bounds (preliminary, from Victor Miralles)
- reproduced (almost) the NLO calculation about eett in ZH

extra uncertainty induced by eett on  $\sigma_{ZH}$

$\delta\sigma_{ZH} \sim 0.3\%$  (1.5%) for 240 (365) GeV

a test fit for 5000 fb<sup>-1</sup> (240) + 1500 fb<sup>-1</sup> (365)

$\delta\lambda_{hhh}$  mildly increased from 57% to 77%

[warning: this is very preliminary, many things to be done, e.g. include NLO eett in other observables as well.]

25

最近FCC/CEPC界限で注目されている  
様々な測定結果を併せてglobal fitによりsingle Higgsのみで $\lambda$ を求める(有効場理論(EFT))  
他に影響するdiagramの不定性を考慮するとなかなか厳しいという印象。

# おまけのおまけ: 有効場理論

1. 標準模型のLagrangian + 保存則を破らずに入れられる低次元の補正項を新物理の影響として入れる係数をfreeにする
2. 様々な実験結果を集める
3. Global fitにより補正項を求める
4. 非SMの係数が0から有意にずれるか → 新物理の測定精度

- 様々な実験結果をsystematicに入れる
- 補正係数間の関係性を入れられる
- Kappa frameworkよりモデル依存性が弱い

## SMEFT: Higgs couplings are related to themselves

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{L}_h = & \frac{1}{2}\partial_\mu h\partial^\mu h - \frac{1}{2}m_h^2 h^2 - (1 + \eta_h)\bar{\lambda}vh^3 + \frac{\theta_h}{v}h\partial_\mu h\partial^\mu h \\ & + (1 + \eta_W)\frac{2m_W^2}{v}W_\mu^+W^{-\mu}h + (1 + \eta_{WW})\frac{m_W^2}{v^2}W_\mu^+W^{-\mu}h^2 \\ & + (1 + \eta_Z)\frac{m_Z^2}{v}Z_\mu Z^\mu h + \frac{1}{2}(1 + \eta_{ZZ})\frac{m_Z^2}{v^2}Z_\mu Z^\mu h^2 \\ & + \zeta_W \hat{W}_{\mu\nu}^+ \hat{W}^{-\mu\nu} \left(\frac{h}{v} + \frac{1}{2}\frac{h^2}{v^2}\right) + \frac{1}{2}\zeta_Z \hat{Z}_{\mu\nu} \hat{Z}^{\mu\nu} \left(\frac{h}{v} + \frac{1}{2}\frac{h^2}{v^2}\right) \\ & + \frac{1}{2}\zeta_A \hat{A}_{\mu\nu} \hat{A}^{\mu\nu} \left(\frac{h}{v} + \frac{1}{2}\frac{h^2}{v^2}\right) + \zeta_{AZ} \hat{A}_{\mu\nu} \hat{Z}^{\mu\nu} \left(\frac{h}{v} + \frac{1}{2}\frac{h^2}{v^2}\right). \end{aligned}$$

(SM structure: kappa like)

$$\begin{aligned} \eta_h &= \delta\bar{\lambda} + \delta v - \frac{3}{2}c_H + c_6 \\ \eta_W &= 2\delta m_W - \delta v - \frac{1}{2}c_H \\ \eta_{WW} &= 2\delta m_W - 2\delta v - c_H \\ \eta_Z &= 2\delta m_Z - \delta v - \frac{1}{2}c_H - c_T \\ \eta_{ZZ} &= 2\delta m_Z - 2\delta v - c_H - 5c_T \end{aligned}$$

(Anomalous: new Lorentz structure)

$$\begin{aligned} \theta_h &= c_H \\ \zeta_W &= \delta Z_W = (8c_{WW}) \\ \zeta_Z &= \delta Z_Z = c_w^2(8c_{WW}) + 2s_w^2(8c_{WB}) + s_w^4/c_w^2(8c_{BB}) \\ \zeta_A &= \delta Z_A = s_w^2((8c_{WW}) - 2(8c_{WB}) + (8c_{BB})) \\ \zeta_{AZ} &= \delta Z_{AZ} = s_w c_w((8c_{WW}) - (1 - \frac{s_w^2}{c_w^2})(8c_{WB}) - \frac{s_w^2}{c_w^2}(8c_{BB})) \end{aligned}$$

- hZZ/hWW/hγZ/hγγ highly related: SU(2)xU(1) gauge symmetries

EFTにはいろいろな条件のものがあるが、一般的に使われるものの一つ (SMEFT, 約30パラメータ)

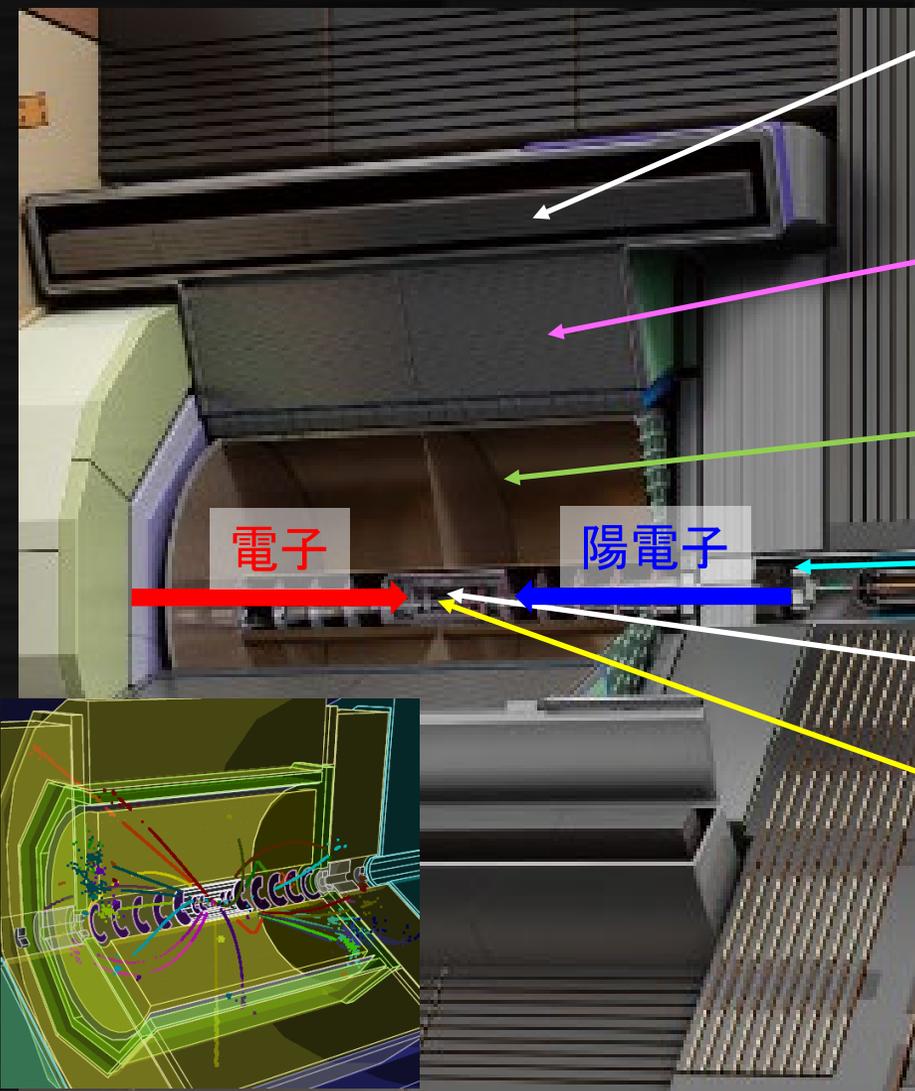
# 電子・陽電子 Target Energies



# Summary

- ILCの物理解析の例として、Higgs関連の物理を取り上げました
  - Motivation 1: 拡張ヒッグス/複合ヒッグスを通して新物理を探る
    - Higgs couplingの精密測定
  - Motivation 2: Higgsの崩壊を通して軽い新物理を探る
  - Motivation 3: Higgs自己結合の測定
    - Cross sectionが小さく非常に困難だが重要な解析チャンネル
    - 500 (hopefully 550) GeVが必要 (ILC upgrade? LC@CERN?)
    - 深層学習で結果の大幅な改善が期待され、現在取り組んでいます
- BSM直接探索、EW/top精密測定もいろいろな話題がありますが、今回は省略しました
- 今年の夏にHiggs factory夏合宿を計画しています。興味ある方はぜひ検討してください





超伝導電磁石 (3.5 Tesla)  
強力な磁場で荷電粒子を曲げる

カロリメータ  
中性粒子の位置、エネルギーを測定

ガス検出器(TPC)  
荷電粒子の運動量を正確に測定

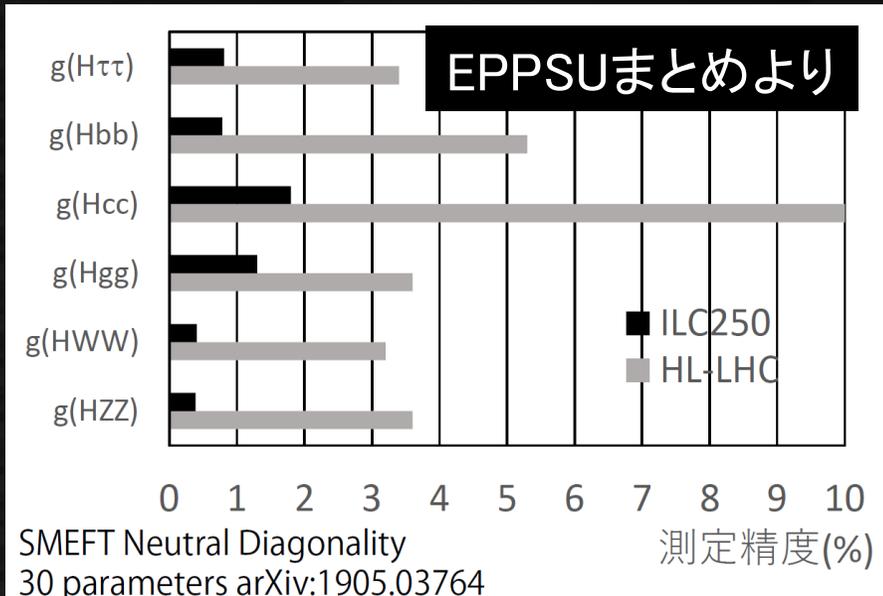
ビームパイプ  
シリコン崩壊点検出器・飛跡検出器  
荷電粒子の位置を精密に測定する

衝突点

内側に荷電粒子の検出器、  
外側にカロリメータがある  
得られた粒子の情報から  
元の反応を再構成していく

# Higgs結合の精密測定

## Higgs崩壊モードの分類



ざっくり一桁の精度向上が期待される

## 全崩壊幅の決定方法

Recoil mass

$Y_n = \text{測定値}$   $F_n = \text{定数 (理論計算可)}$

$$Y_1 = \sigma_{ZH} = F_1 \cdot g_{HZZ}^2$$

ZH→Zbb

$$Y_2 = \sigma_{ZH} \times \text{Br}(H \rightarrow b\bar{b}) = F_2 \cdot \frac{g_{HZZ}^2 g_{Hb\bar{b}}^2}{\Gamma_T}$$

ννH→ννbb

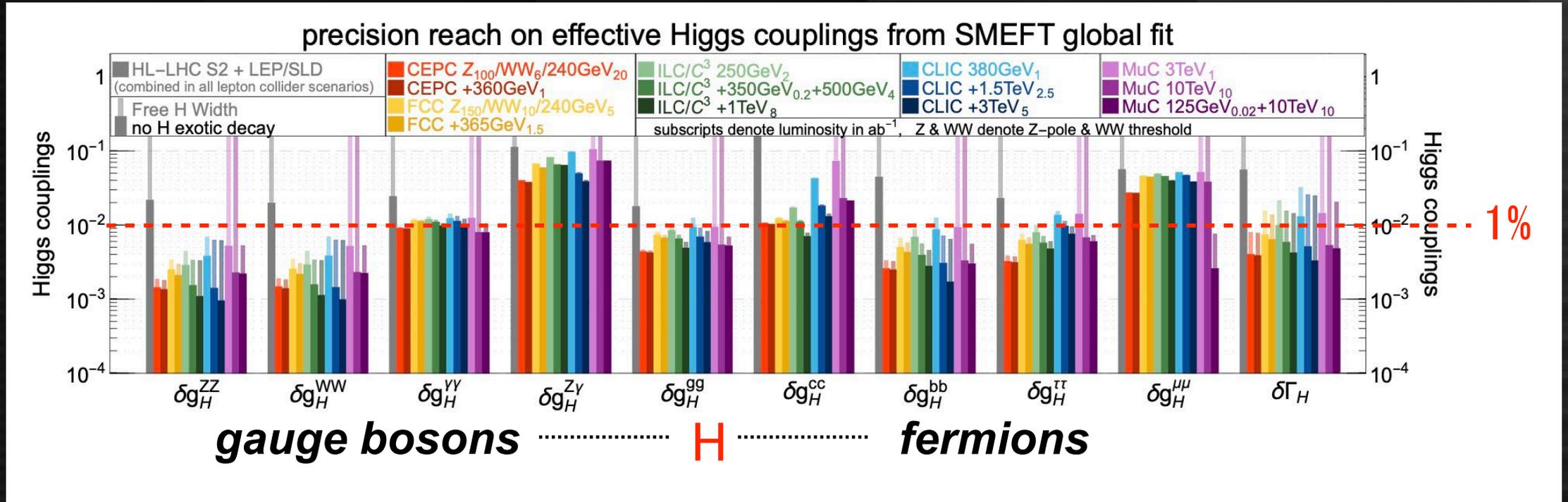
$$Y_3 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \times \text{Br}(H \rightarrow b\bar{b}) = F_3 \cdot \frac{g_{HWW}^2 g_{Hb\bar{b}}^2}{\Gamma_T}$$

ννH→ννWW\*

$$Y_4 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \times \text{Br}(H \rightarrow WW^*) = F_4 \cdot \frac{g_{HWW}^4}{\Gamma_T}$$

1.  $Y_1$  から  $g_{HZZ}$  を導出
2.  $Y_1 \times Y_3 / Y_2$  と  $g_{HZZ}$  から  $g_{HWW}$  を導出
3.  $Y_4$  と  $g_{HWW}$  から  $\Gamma_T$  (ヒッグス全崩壊幅) を導出
4.  $Y_2 / Y_3$  と  $g_{HZZ} / g_{HWW}$ ,  $\Gamma_T$  から  $g_{Hb\bar{b}}$  を導出

# Higgs BR measurements

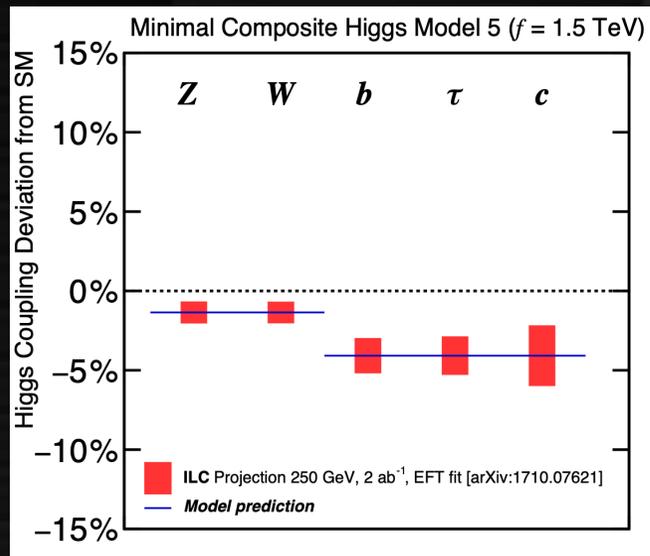
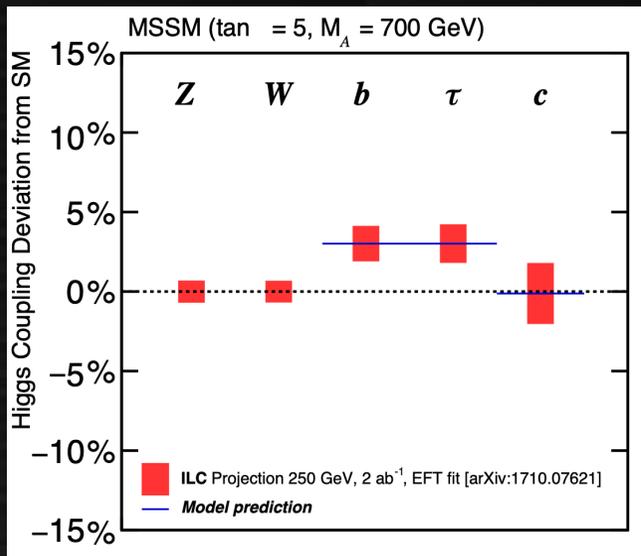


Any HFs: ~1% (or less depending decay channels) BR of dominant decays

- Factor 5-10 improvements from HL-LHC (except  $\mu\mu$  and  $\gamma\gamma$ )  
→ fingerprinting BSM models

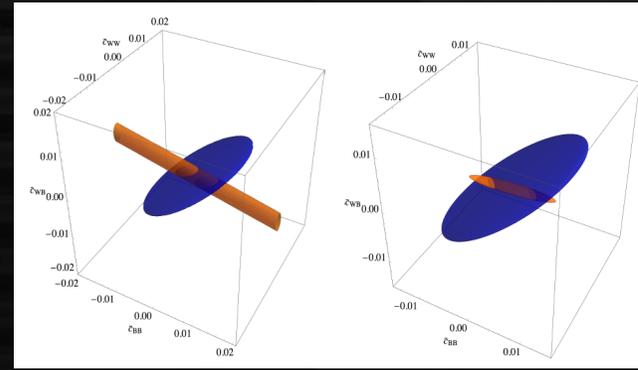
Much more model independent: total cross section, total width,  
30-param SMEFT with various electroweak precision measurements

# Higgs結合によるBSMの識別



## HiggsのCP property測定

Higgsの崩壊角分布からCP mixtureを検証。様々なモードで異なった感度がある  
HL-LHCと $e^+e^-$ は相補的な感度



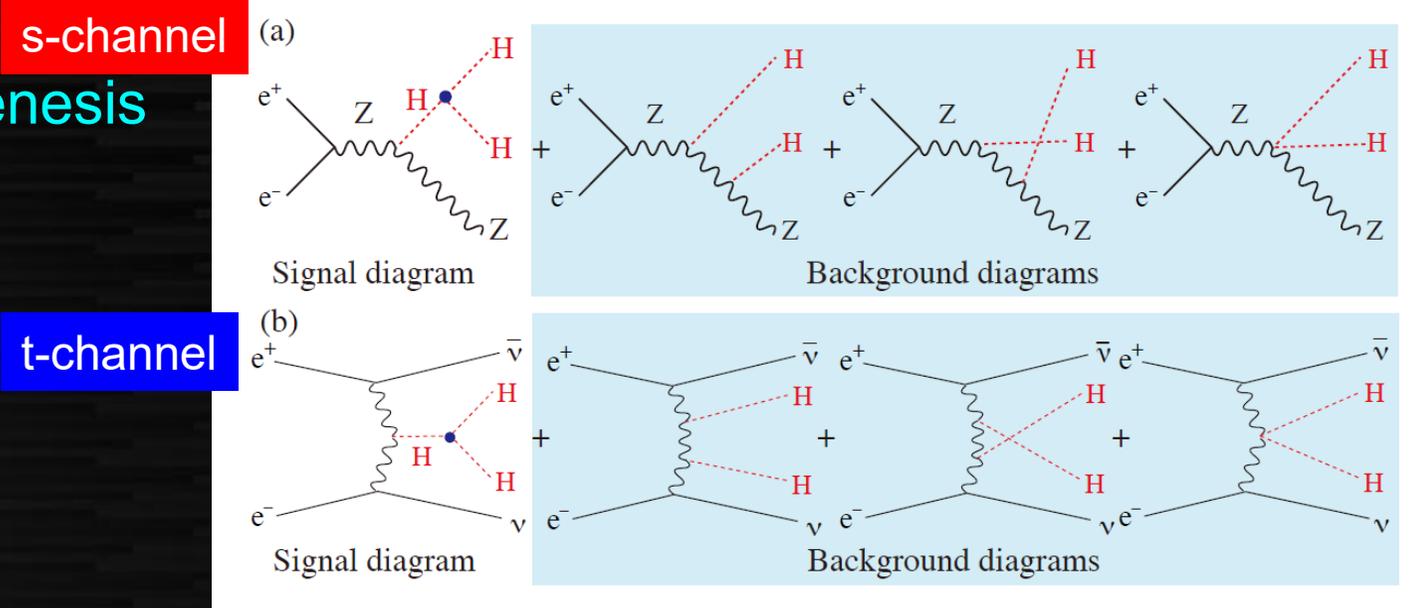
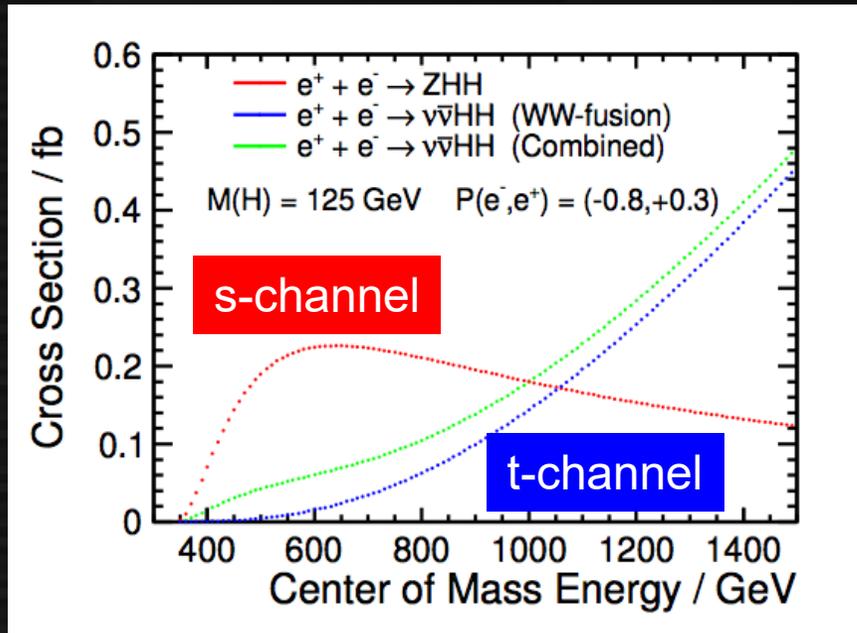
SMEFTによるCPV operatorの感度。青がHL-LHC, オレンジがILC250

EPPSU Physics bookの議論では、Higgsの量子補正  $\Delta m_H$  とHiggs結合定数について  $m_H^2/\Delta m_H^2 \sim \delta g_h/g_h$  という関係が期待されるとしている。  
 $\Delta m_H$  が新物理スケールだと思えば、1%のcoupling測定が $\sim 1(.25)$  TeVの新物理に対応  
つまり0(%)の結合定数測定は1 TeVの新物理の間接探索になる。

# Higgs self coupling

$$V(\eta_H) = \frac{1}{2} m_H^2 \eta_H^2 + \lambda v \eta_H^3 + \frac{1}{4} \lambda \eta_H^4$$

Direct probe of Higgs potential  
 Essential for electroweak baryogenesis  
 (1<sup>st</sup> order phase transition  
 requires >10% more I)



Effect of insensitive diagram → next page

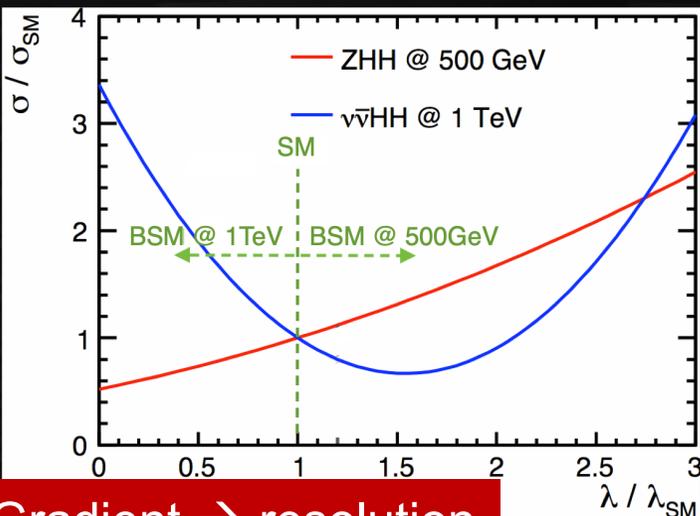
channel	$\sqrt{s}$ [GeV]	L [ab <sup>-1</sup> ]	$\lambda$ precision
s-channel	500	4	27%
t-channel	1000	4	10%

Extremely small cross section:  
 O(100) events / ab<sup>-1</sup>

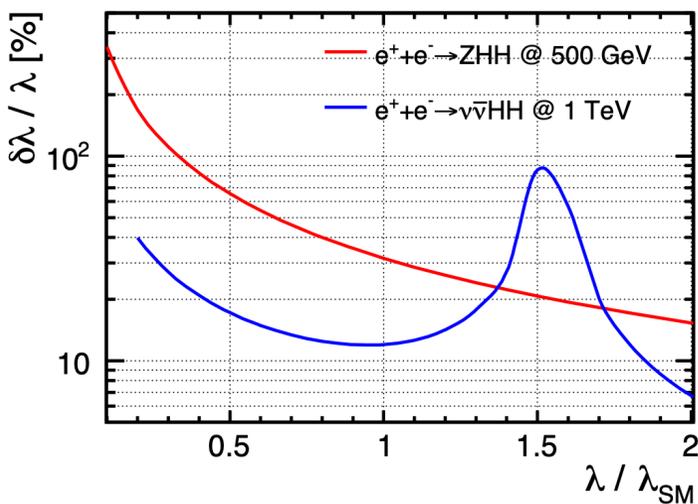
Ultimate precision at linear collider: ~5% at 2-3 TeV

# Higgs self coupling (cont.)

## Effect of interference

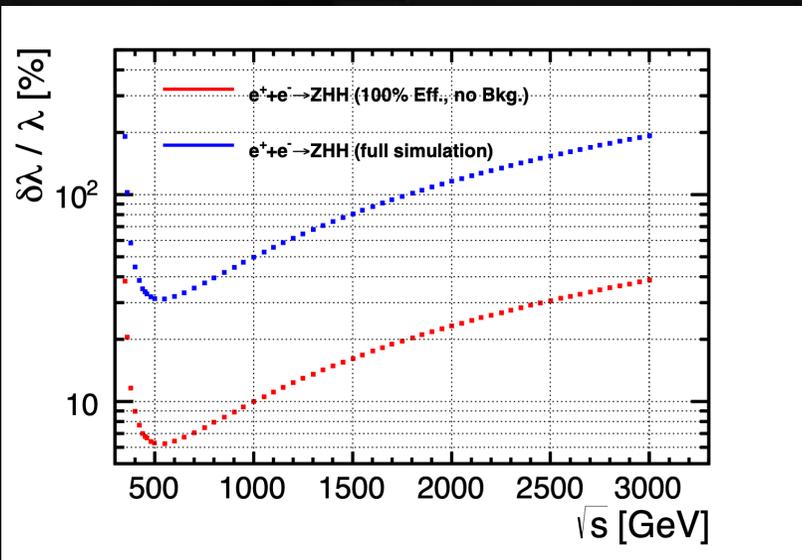


## Gradient $\rightarrow$ resolution



500 GeV: better at higher  $\lambda$  (20% @  $\lambda \sim 1.5$ )  
 1 TeV: best at  $0.8 < \lambda < 1.2$ , insensitive at  $\lambda \sim 1.5$

## Possibility for improvements



Reconstruction of multi-jet environments  
 (Jet energy resolution, flavor tagging)  
 $\rightarrow$  Deep learning based reconstruction  
 Improvements possible but not easy

Self coupling from  
 NLO ZH cross section

$$\sigma_{i,NLO} = Z_H \sigma_{i,LO} (1 + \kappa_\lambda C_{1,i})$$

Considered in FCC context  
 (since  $> 500 \text{ GeV}$  impossible)

- Loop contribution
- Assuming no BSM loop (qualitatively different from double-Higgs search)

$\rightarrow$   $\sim 30\%$  resolution feasible  
 at 250 GeV (FCCee study)  
 (to be investigated for LC)

# 新物理直接探索

- Compressed spectrum

- 最も軽い新粒子と次に軽い新粒子の質量が縮退するシナリオ

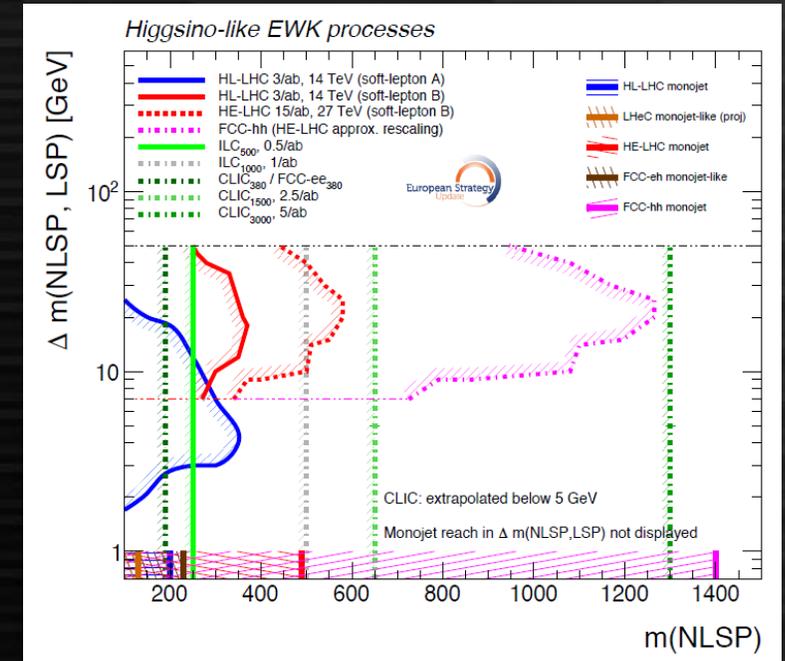
- SUSYではHiggsino, Winoが縮退するため  
他がdecoupleしていると自動的に縮退

- LHCではdisappearing trackなどを使うため寿命に下限(質量差に上限)がつく

- $e^+e^-$ ではsub-GeVのsoft trackをtagできるため  
質量差のギャップを完全に埋められる

- ほぼ $\sqrt{s}/2$ までカバーする

- Naturalnessから要請される100 GeV程度のHiggsinoは250-500 GeVでカバー
- 2-3 TeV LCで1 TeV Higgsino DMを網羅的に探索



Mass splittingが1桁GeV (soft pion) はHadron colliderは苦手

# DM探索など

- 暗黒物質対生成

- ISR photonでtag

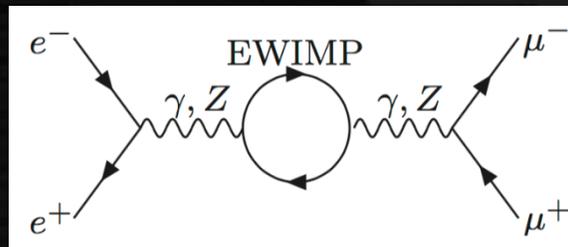
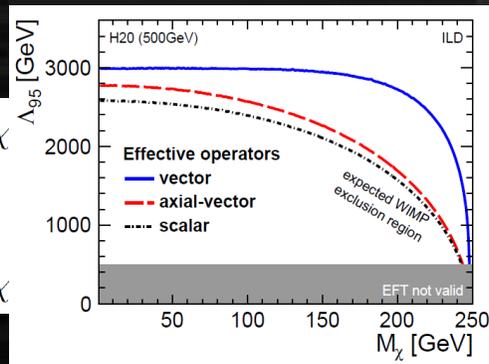
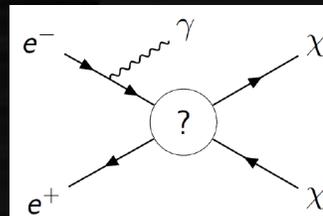
- LHCとは見ている結合が異なる
    - Messenger scaleで数TeVまで探索可能 ( $m_\chi$  はほぼ  $\sqrt{s}/2$  まで)

- 2f精密測定による間接探索

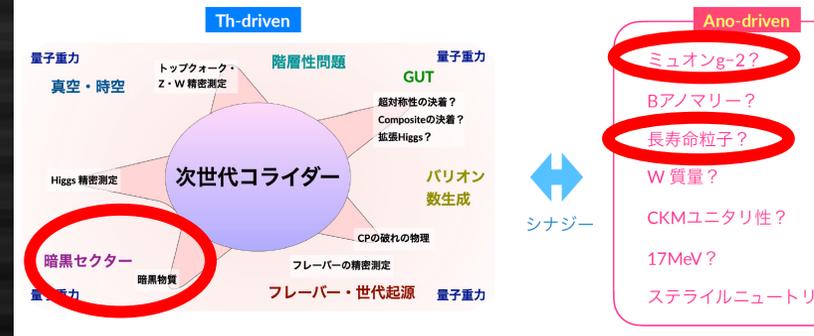
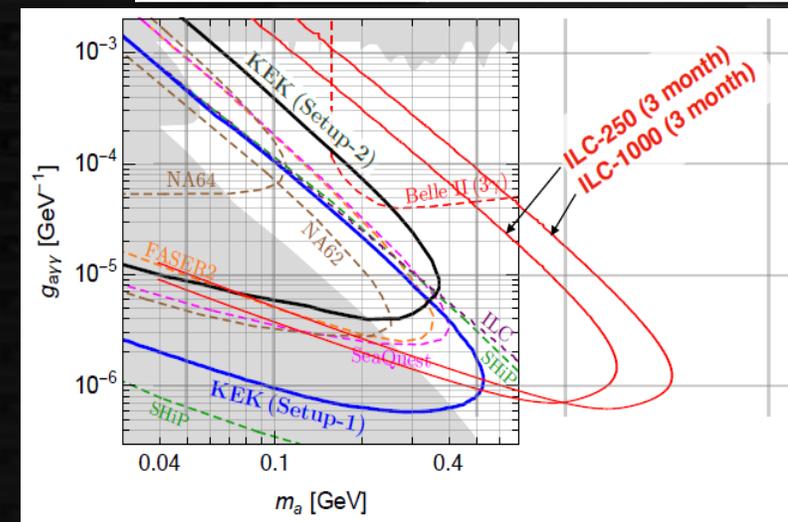
- WIMPがループで入る
  - 直接探索よりやや高い質量まで感度

- 固定標的実験

- 軽いDM探索など



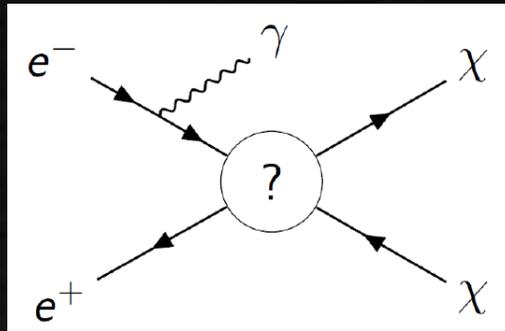
ILC 250 GeV	mass reach (3σ)
Higgsino	150 GeV
MDM	330 GeV
Wino	190 GeV



# Mono-photon search

arXiv:2001.03011

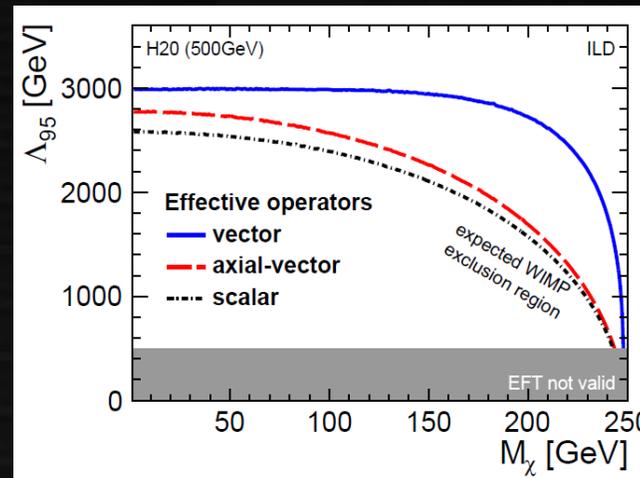
モデル非依存に  $m < \sqrt{s}/2$  の  
暗黒物質を直接探索



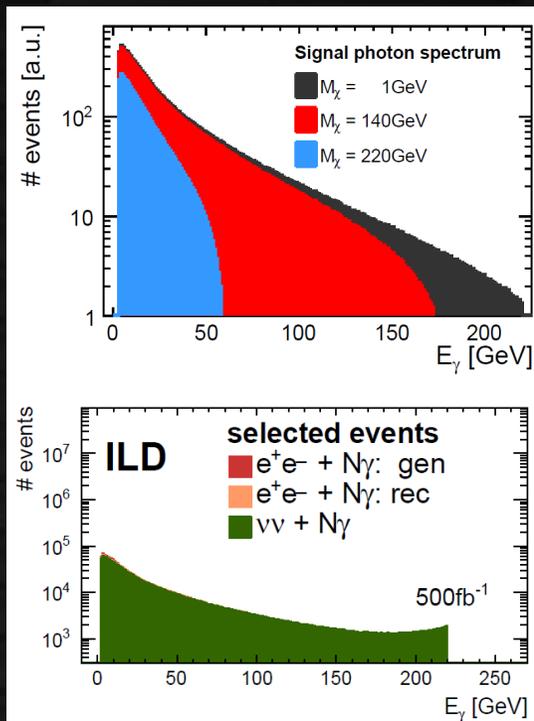
偏極を用いて暗黒物質のスピン情報が得られる

	four-fermion operator	$\sigma(e_L^-, e_R^+) = \sigma(e_R^-, e_L^+)$	$\sigma(e_L^-, e_L^+) = \sigma(e_R^-, e_R^+)$
vector	$(\bar{f}\gamma^\mu f)(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)$	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$	0
axial-vector	$(\bar{f}\gamma^\mu\gamma^5 f)(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)$	0	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$
scalar	$(\bar{\chi}\chi)(\bar{f}f)$	0	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$

$\Lambda$ は新物理のエネルギースケール

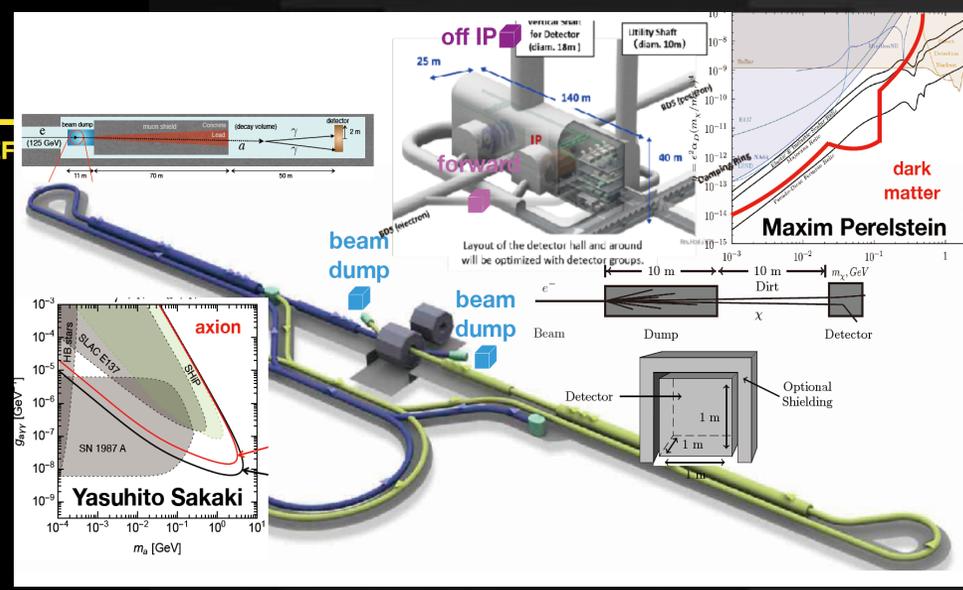
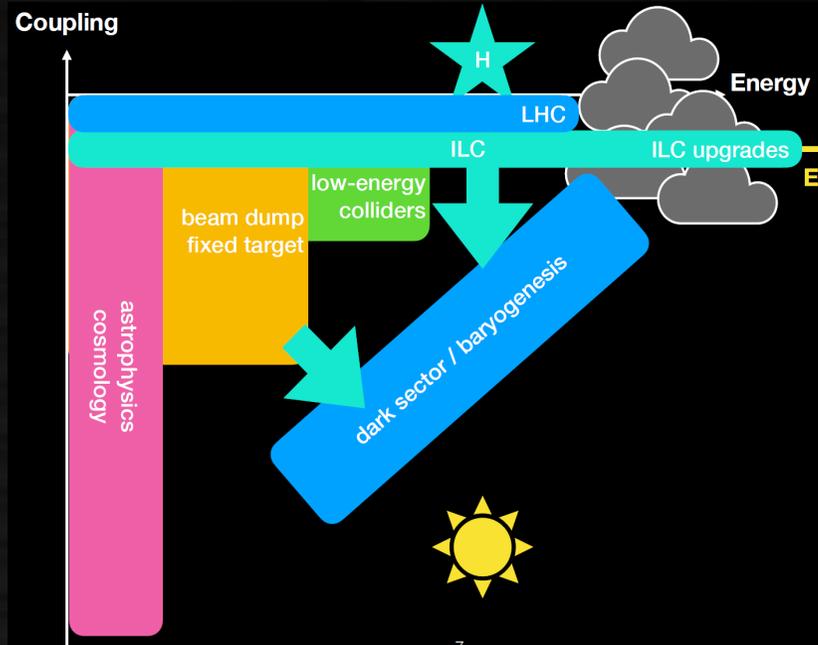


複数の  
衝突エネルギー  
での測定により  
スピン・質量を  
さらに感度よく  
決定できる



単一光子信号  $\sim 3\text{ TeV}$ スケールの新物理に感度  
とバックグラウンド

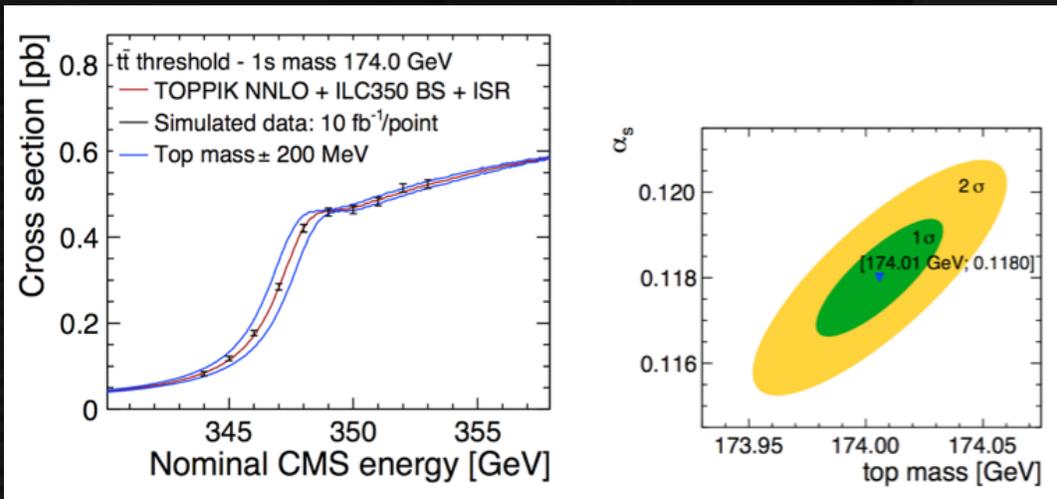
# 固定標的実験@ILC



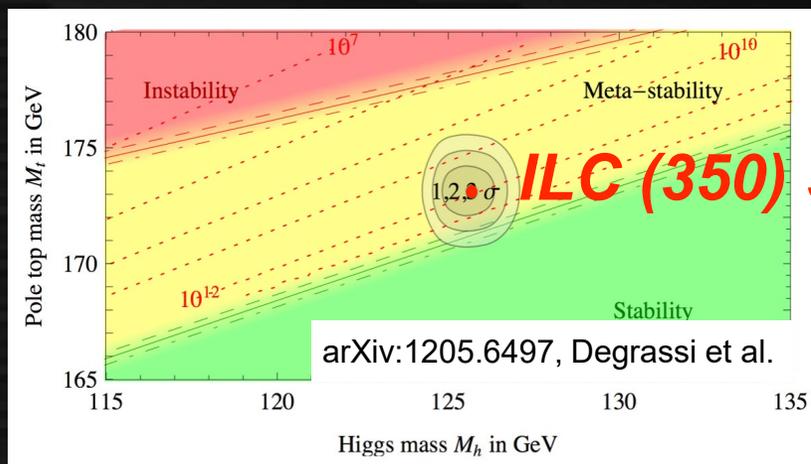
エネルギーは高いが結合が大きい  
 → コライダーでの新物理探索  
 エネルギーが低く結合が小さい  
 → 固定標的実験

ILCでもビームダンプや  
 取り出しラインを用いて  
 様々な実験が可能  
 現在検討中

# Top 質量/結合 精密測定



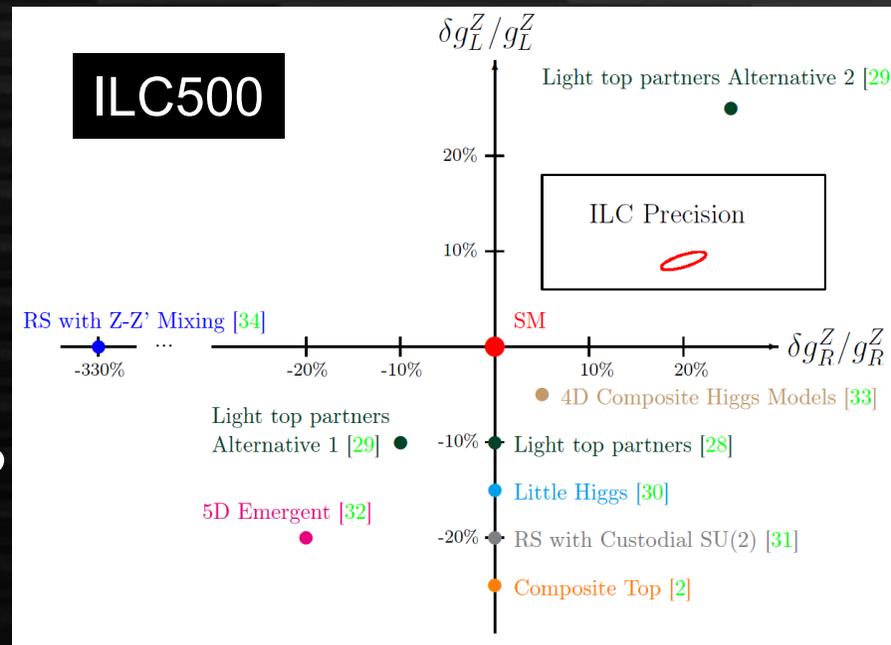
Threshold scanによるtopの精密測定 MSbarに直接変換できる「理論的に扱いやすい」質量を直接求められる



$$\Delta m_t(\overline{MS}) \lesssim 50 \text{ MeV}$$

$$\Delta m_h \simeq 14 \text{ MeV}$$

$\alpha_s$  や崩壊幅にも感度あり



偏極を用いて左巻き、右巻きの結合定数を求め、Topが関係する新物理の探索・モデル識別が可能

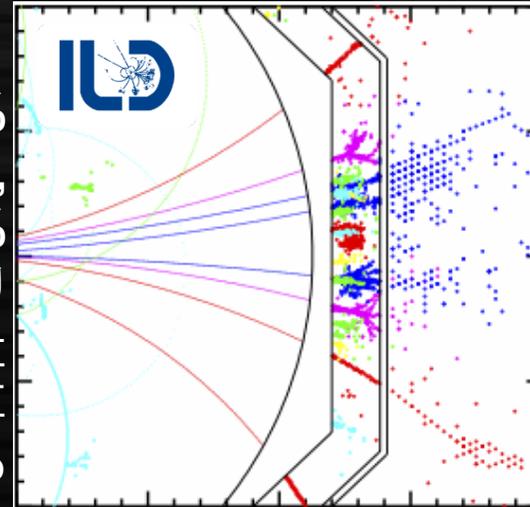
# Particle flow concept

Separating particles inside jets to do track-cluster matching

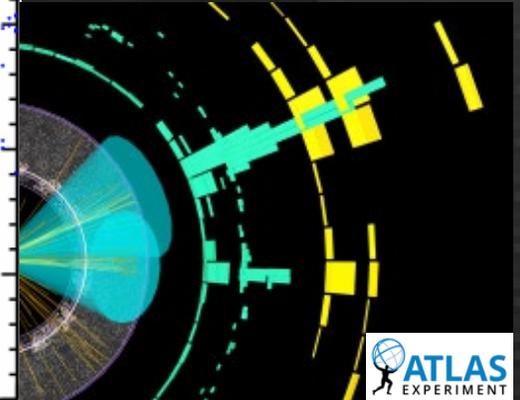
Requiring

- Highly-granular calorimeters
- Intelligent pattern recognition

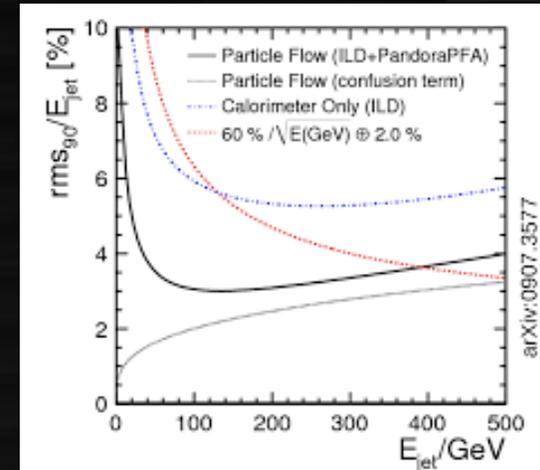
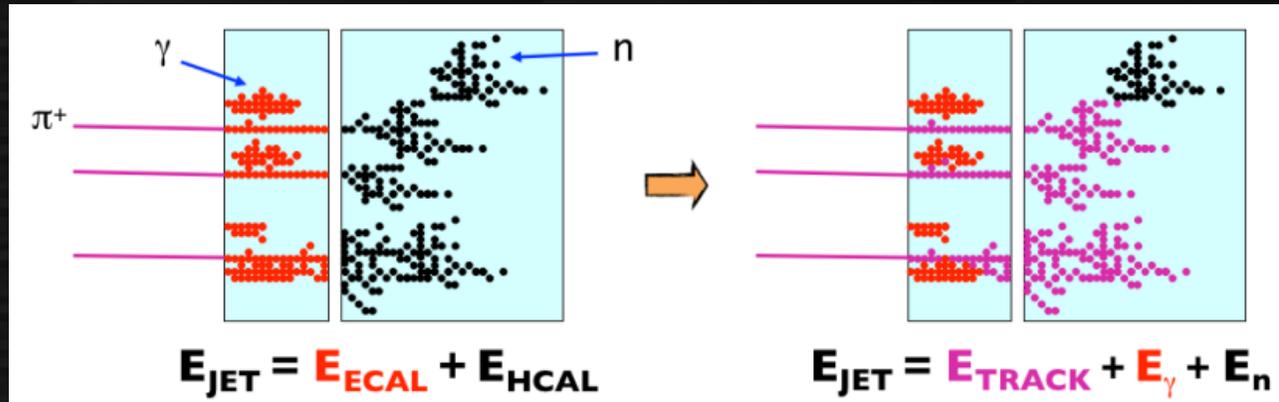
荷電粒子~60%  
光子~30%  
中性ハドロン~10%  
粒子分離により  
荷電粒子の運動量  
をエネルギー計算  
に使える



Different granularity on ILD - ATLAS



Developed in ILC, first full application in CMS HGCAL at HL-LHC (partial use already in ATLAS/CMS)



Possible to obtain jet energy resolution of

$$\frac{\delta E_{jet}}{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet} [GeV]}}$$

~2 times better than calo-only

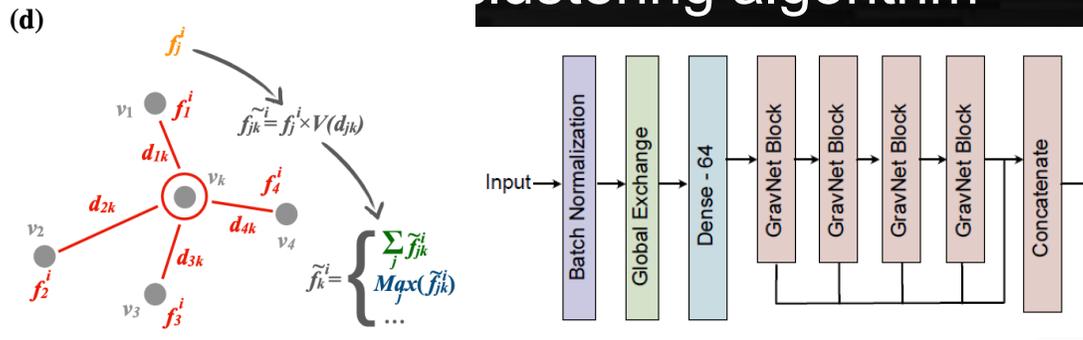
# Resent focus: applying deep learning

Particle flow with Graph Neural Network

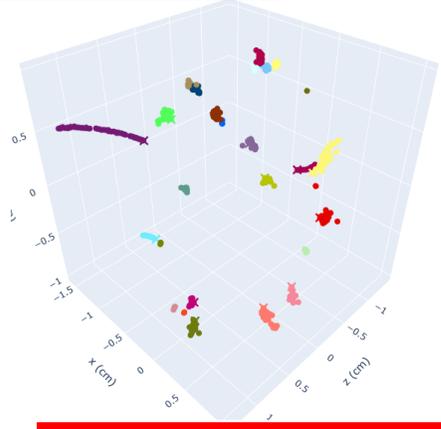
Flavor tagging with GNN/Transformer

Adding track-cluster matching to HGCAL clustering algorithm

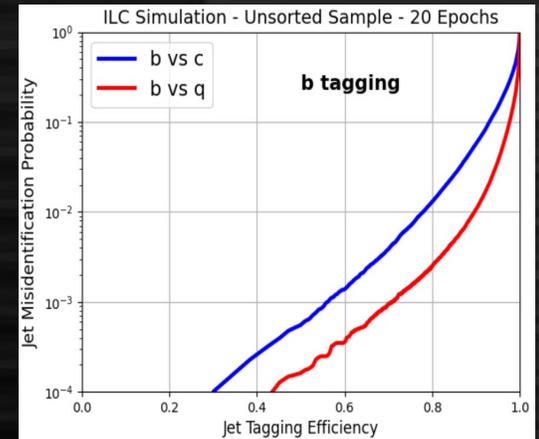
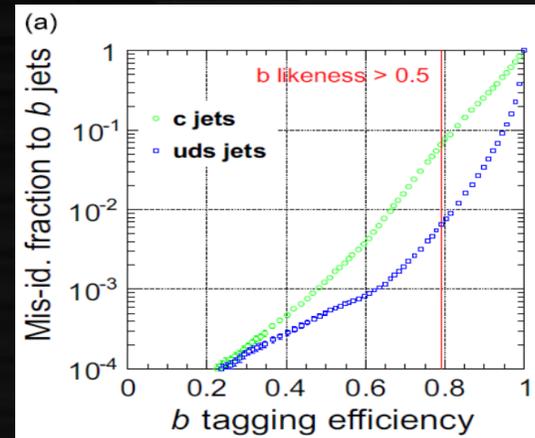
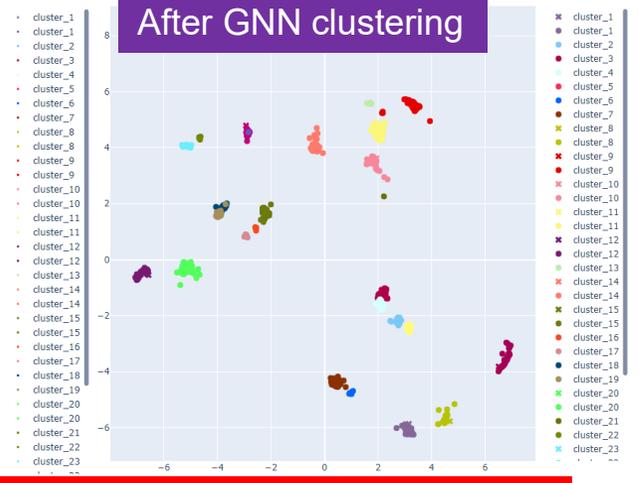
Applying algorithm developed at CMS flavor tagging: 5-10 better rejection than old (BDT) method



Real coordinate



After GNN clustering



Method	b-tag 80% eff.		c-tag 50% eff.	
	c-bkg acceptance	uds-bkg acceptance	c-bkg acceptance	uds-bkg acceptance
LCFIPlus	10%	1%	10%	2%
ParT	1.29%	0.25%	1.02%	0.43%

Good synergy with hadron colliders

# Strange tagging

- High-momentum kaon in jet is a clue to strange jets
  - Contamination from  $g \rightarrow ss$  give relatively low momentum
- $dE/dx$  is essential for Particle ID in ILD
  - As well as ToF, but only effective in low energy tracks (which are less important in strange tagging)
- Using newly-developed **comprehensive PID**
  - Giving much better separation than previous PID

Fraction of true particles

True particle

	K	$\pi$	p	e	$\mu$
K	0.65	0.04	0.20	0.04	0.10
$\pi$	0.08	0.90	0.04	0.32	0.28
p	0.26	0.04	0.76	0.09	0.08
e	0.00	0.00	0.00	0.53	0.01
$\mu$	0.01	0.02	0.00	0.01	0.53

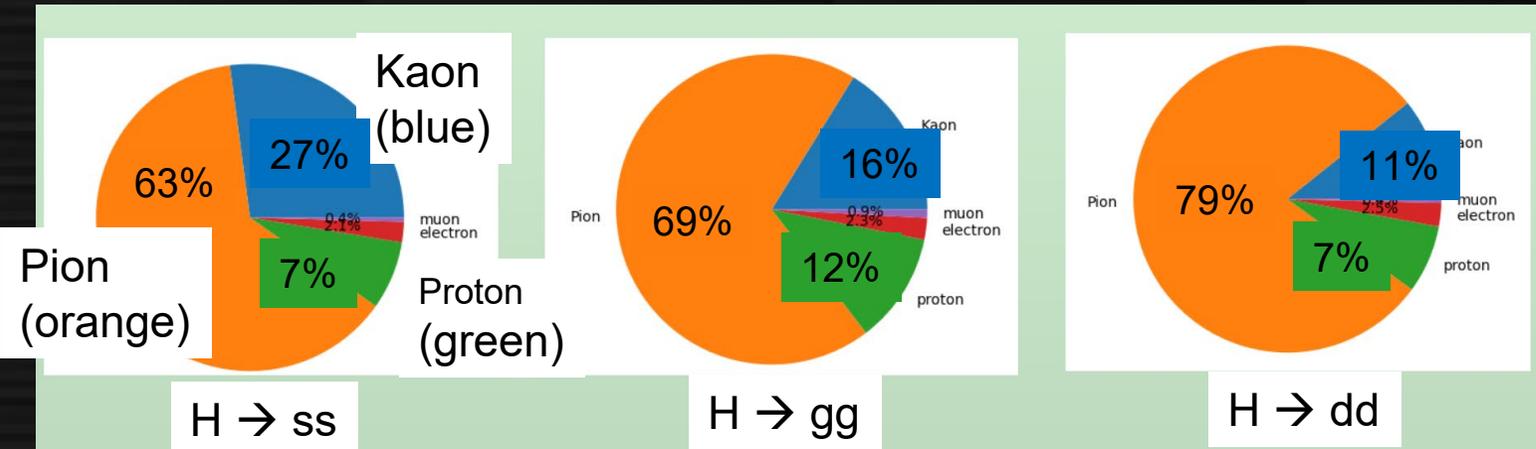
CPID prediction

$\uparrow 3 < p < 5 \text{ GeV}$

	K	$\pi$	p	e	$\mu$
K	0.74	0.07	0.20	0.13	0.16
$\pi$	0.07	0.89	0.03	0.40	0.37
p	0.18	0.03	0.76	0.09	0.06
e	0.00	0.00	0.00	0.38	0.01
$\mu$	0.01	0.01	0.00	0.01	0.40

$\uparrow p > 5 \text{ GeV}$

More Kaons in ss  
More protons in gg



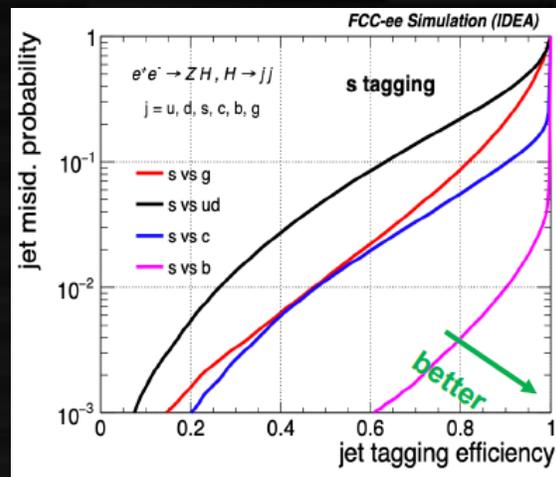
Fractions of tracks having  $> 5 \text{ GeV}$

# Strange tagging: initial results

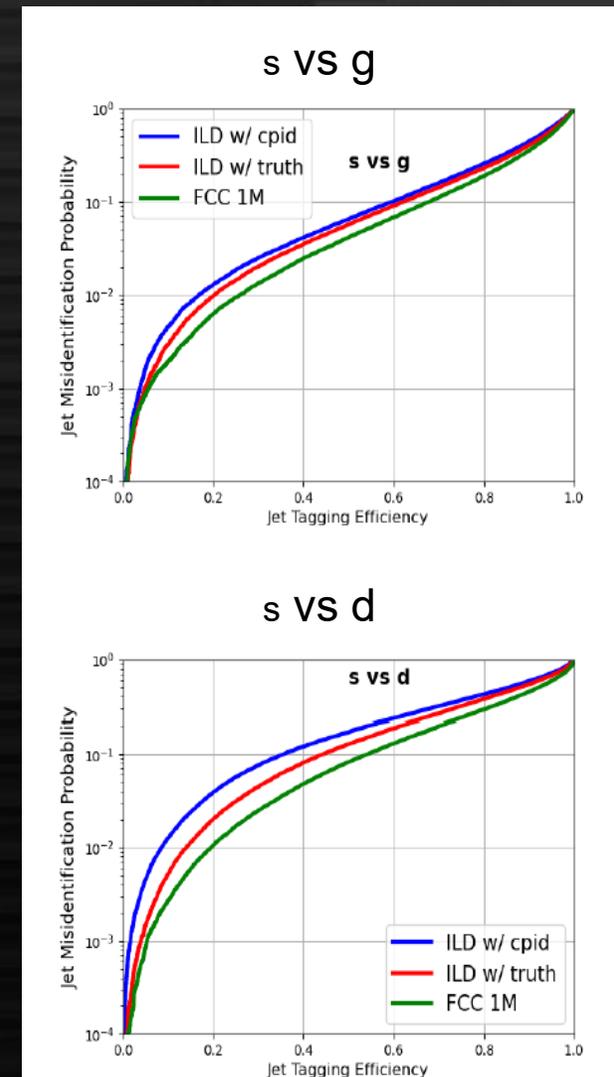
- First results obtained with CPID
  - No significant improvements from old PID: investigating
    - Compared with truth PID: some difference
      - FCC (1M) better than ILD Truth PID
        - Reason needs to be investigated (maybe non-perfect assignment of truth PID)
          - Still needs study

s-tag 80% eff.		
Method	g-bkg acceptance (%)	d-bkg acceptance (%)
ILD full sim. CPID	25.7	42.7
ILD full sim. Truth PID	23.2	38.0
FCC 1M (PID+tof)	20.3	29.6

Strange tagging performance



FCCee plot (in their study)



# Summary

- 世界には様々なHiggs factory計画がある
  - どれか一つ実現したい
  - 線形はエネルギー拡張性とコスト、円形はハドロンへの転換が売り
  - ILCは日本にとってよいオプション
- 各エネルギーで見たい物理のターゲットがある
  - Higgs/電弱精密測定による新物理探索
  - トップ精密測定、Higgs自己結合、Top Yukawa
  - 新物理直接探索 (1 TeV Higgsinoが最終ターゲット)
- 革新的な測定器開発へさまざまな努力が続く
  - 共同研究の種を探したい