

ILC / Higgs factory の概要と物理

末原 大幹 (東大ICEPP)
for ILC-Japan 物理ワーキンググループ

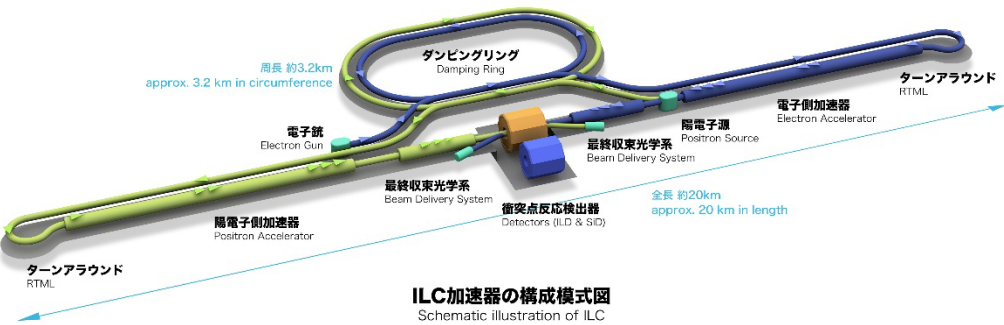
LC Vision report: <https://arxiv.org/abs/2503.19983>

ILC IDT report: https://indico.cern.ch/event/1439855/contributions/6461661/attachments/3046041/5382025/IDT_submission.pdf

Contents

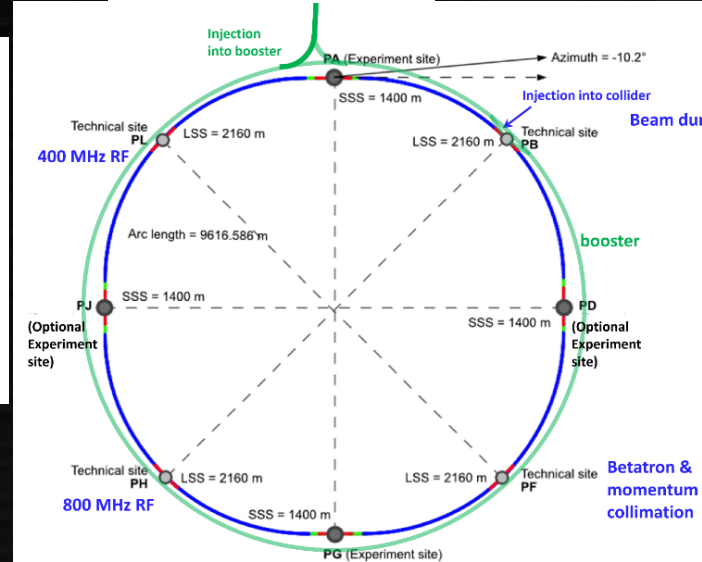
- ILC/Higgs factoryの概要
 - (HL-)LHCとHiggs factoryの違い
 - 線形コライダーと円形コライダーの違い
- ヒッグスの物理
 - なぜヒッグスを調べたいのか
 - Naturalness問題、拡張ヒッグスセクター、ヒッグスポータル、真空の問題
 - ヒッグスの結合定数測定、BSM崩壊探索
 - ヒッグス自己結合 (少し詳しく取り上げます)
- その他の物理: top測定、新物理直接探索

ヒッグスファクトリー

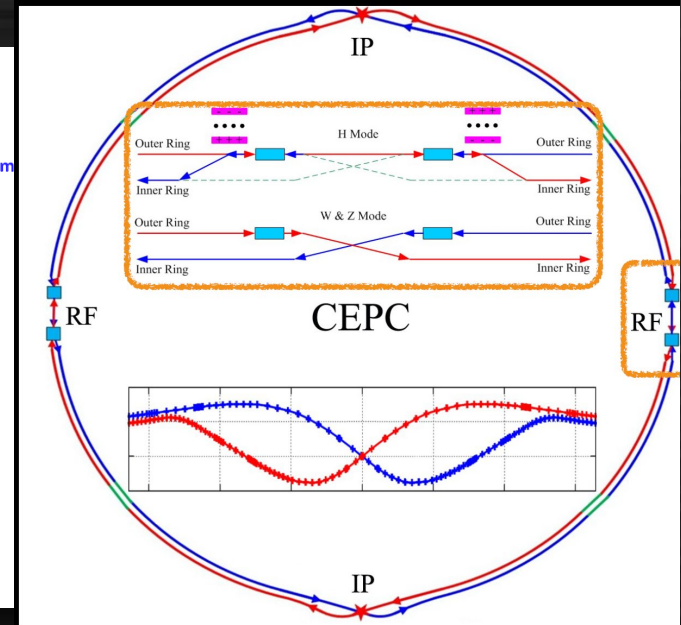


グローバルプロジェクトとして
(できれば日本で)実現を目指す
線形コライダー計画
250 – a few TeVのエネルギーを視野

CERNでの実装(LCF@CERN)
も最近提案された



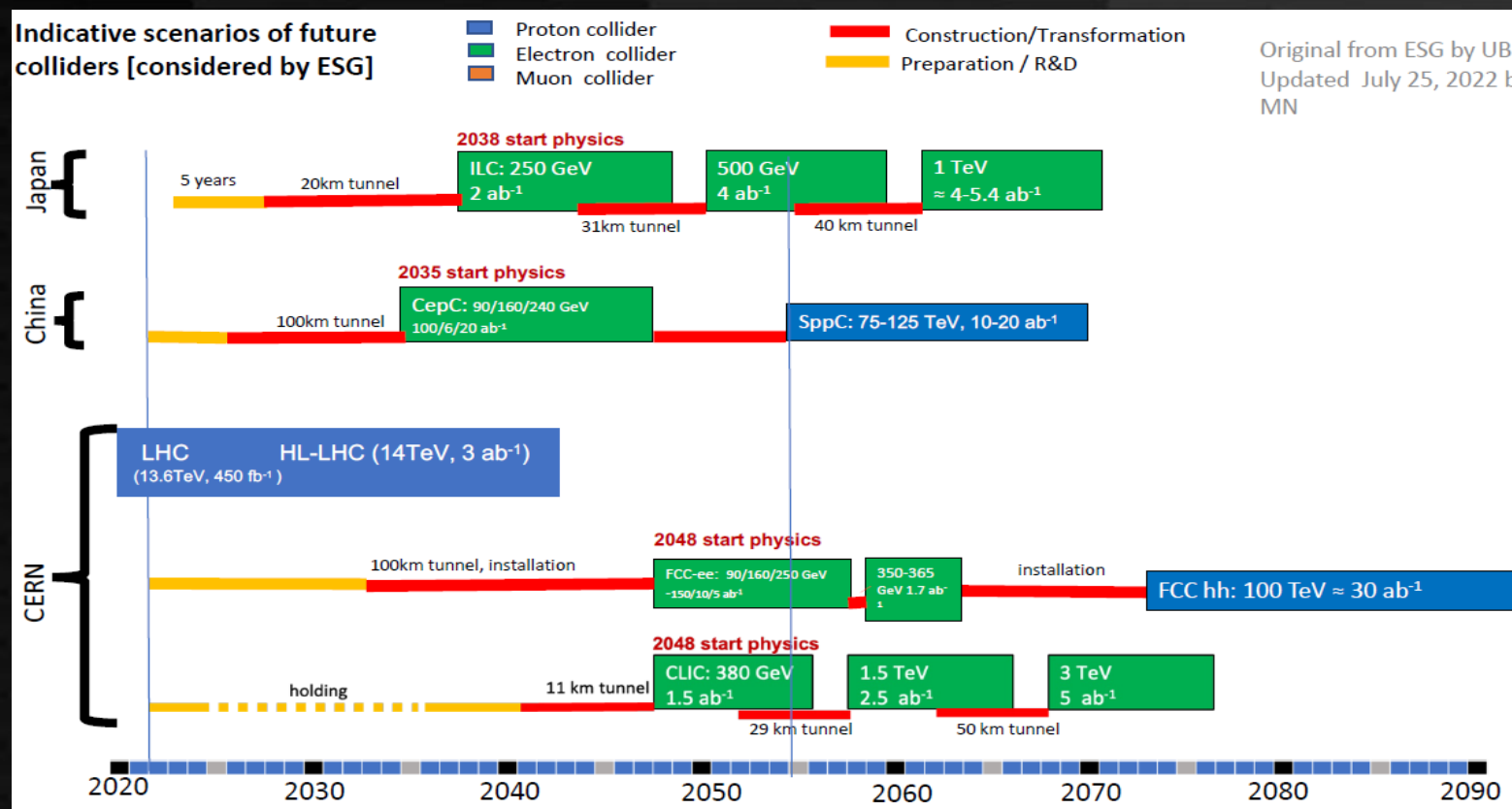
周長91 / 100 kmの円形コライダー計画
FCC@CERNとCEPC@Chinaは技術的には類似



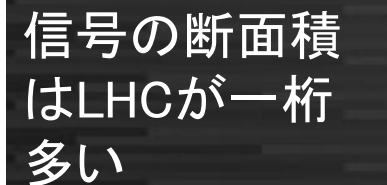
e⁺e⁻ colliderとしては365 GeVまで、その後はpp
Taikan Suehara, ILC-Japan 大学訪問シリーズ, 9 Apr. 2025, page 3

タイムライン

- HL-LHC: ~2041まで
- ILC: 2038?- (TDR)
 - 建設開始から10年
- LCF@CERN
 - 欧州戦略へ提案
 - HL-LHC後速やかに
- CEPC: 2035?- (TDR)
 - 「次期5カ年計画」に入るか1年程度で判明
- FCC: 2048- (FS)
 - 欧州戦略(~来年前半)の主要テーマ
 - 2028年頃計画決定を目指す



ハドロンコライダー



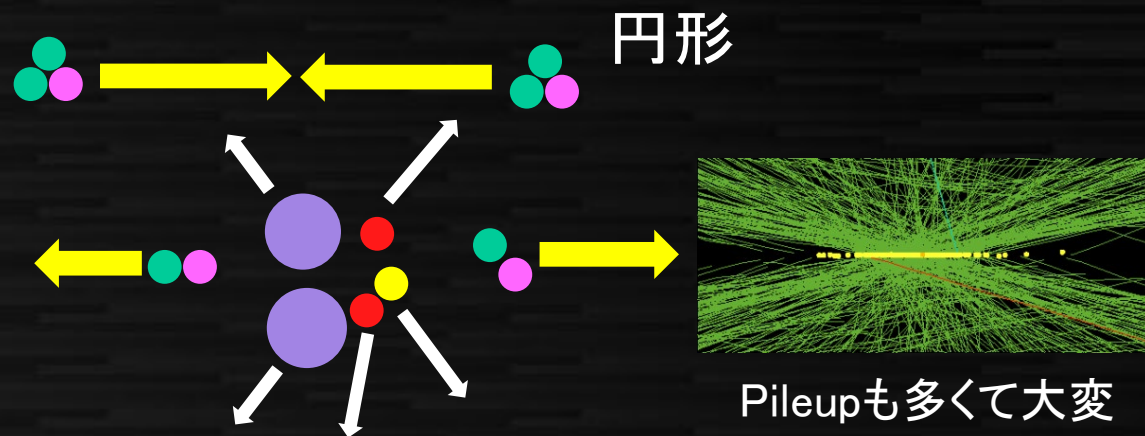
背景事象は
LHCが圧倒的に
多い

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)

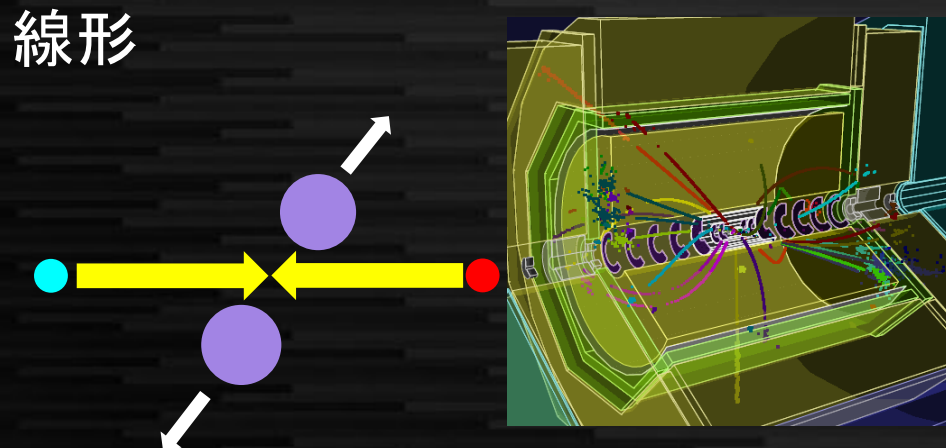
陽子・陽子衝突 14000 GeV



- 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 p_T 保存のみ (単純にcutに使える変数が一つ多い)
- 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 factory (ILC, FCCee, ...)

電子・陽電子衝突 240- GeV



電子・陽電子 Target Energies

91~250 GeV

Oblique parameter決定, W/Z mass, b/ τ の精密測定

250 GeV

Higgs 結合定数測定 ($\sim 1\%$), Higgs稀崩壊 (軽い新物理)
(TeV新物理間接探索)

350 GeV

Top質量の精密測定 → 真空の安定性

500–550 GeV

Higgs自己結合 (20–30%), ttH結合

1 TeV

Higgs自己結合 (10%) → 物質生成

250 GeV – a few TeV

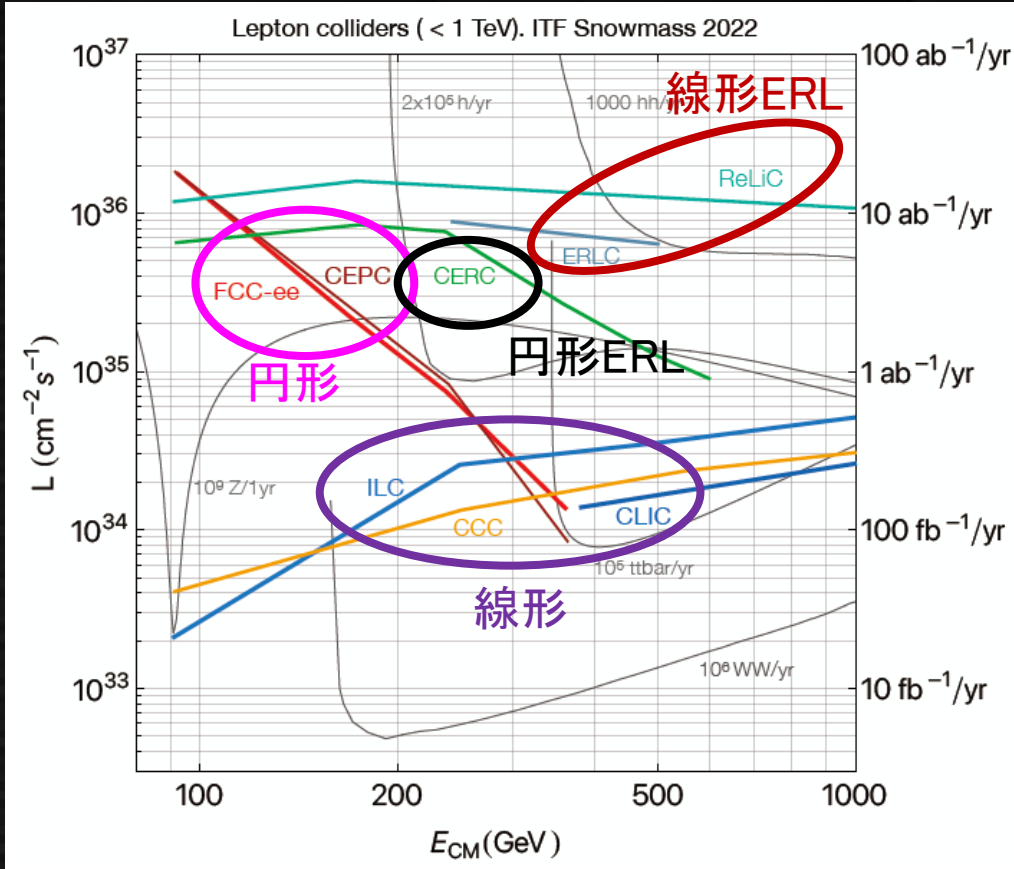
TeV新物理直接探索

Natural SUSY (250 GeV – 1 TeV)

1 TeV Higgsino

3 TeV Wino

線形コライダーと円形コライダー



- 91–160 GeV
円形コライダーが有利
(線形ERLでは円形に近いluminosityに到達可)
- 250 GeV
円形コライダーがやや高いluminosity
線形コライダーの偏極により物理reachは同等
- 350 GeV
円形コライダーでも可能だが線形が有利
- > 500 GeV
線形コライダーでのみ実現可能
(円形ERLで550 GeVはぎりぎり到達可能)

Note: FCCeeの建設費はILC500と1000の間くらい **ppにしないとコスト的にunreasonable**
円形 > 250 GeVは電力消費が非常に大きい(現実的にはERLが必要か)
ERL技術は原理的実証はされているが実装には多くの課題がある

Higgsは新物理の窓

GeV world
SMが有効理論

湯川力
Fermionの質量生成

Electroweak
symmetry breaking

標準理論の最後の
本質的要素



Higgs boson

ヒッグス力
ヒッグス真空凝縮
の直接的な証拠

TeV world
SM相互作用は
 E^{-2} で減少
新物理が本質

Higgsへの疑問

- Naturalness
- Composite Higgs?
- Multiple Higgs?

Dark
Matter?

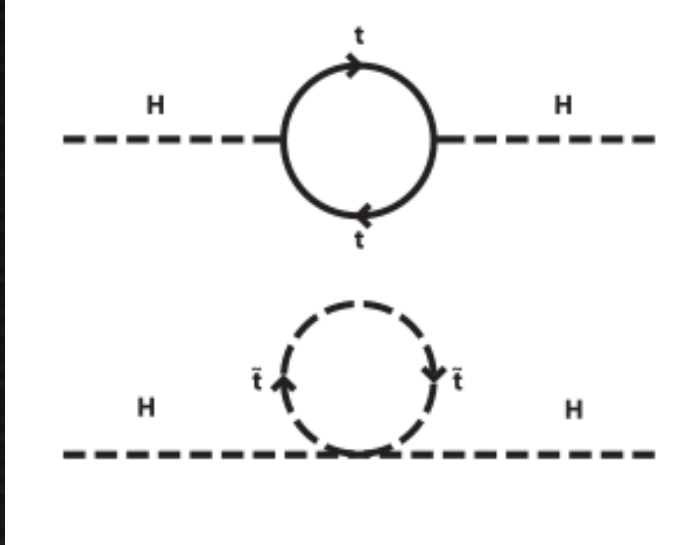
BSM
(SUSY?)

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う

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)
- 2nd 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)

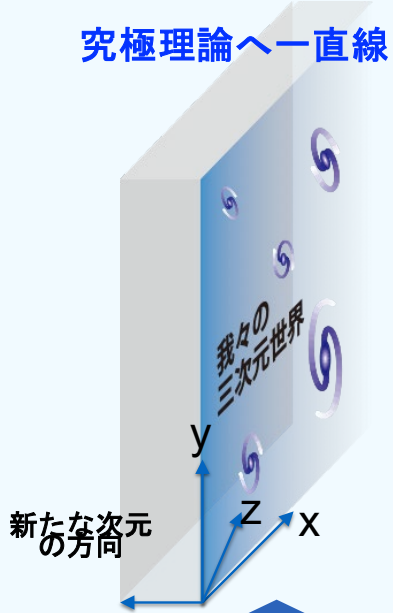
複合ヒッグス

- 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

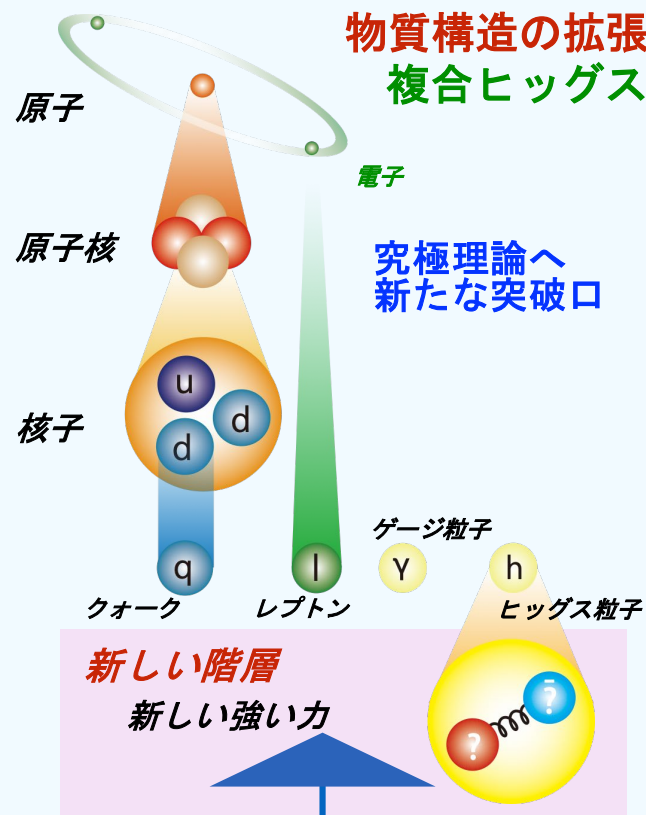
Technicolor, Little Higgsなどの模型がある。Little Higgsはtop partnerが重要な新粒子となる

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)

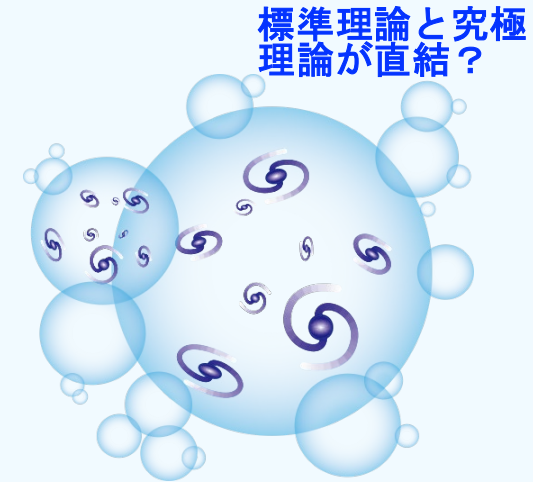
時空概念の拡張 超対称性または余剰次元



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)

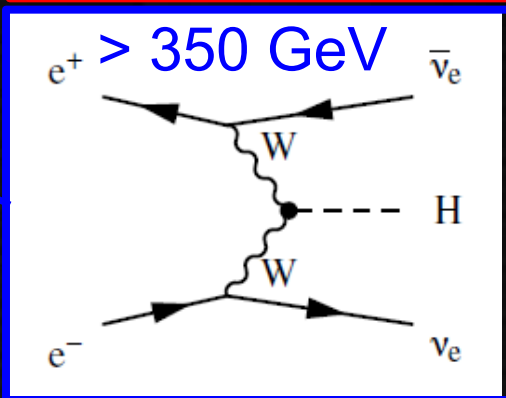
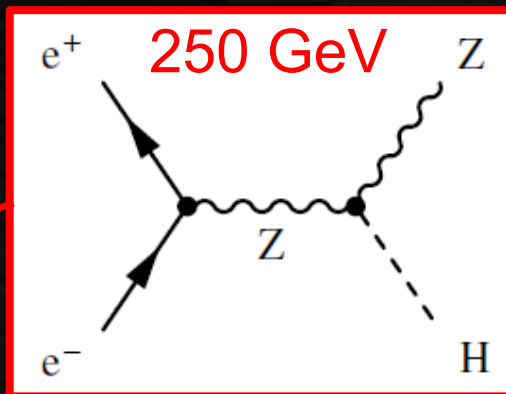
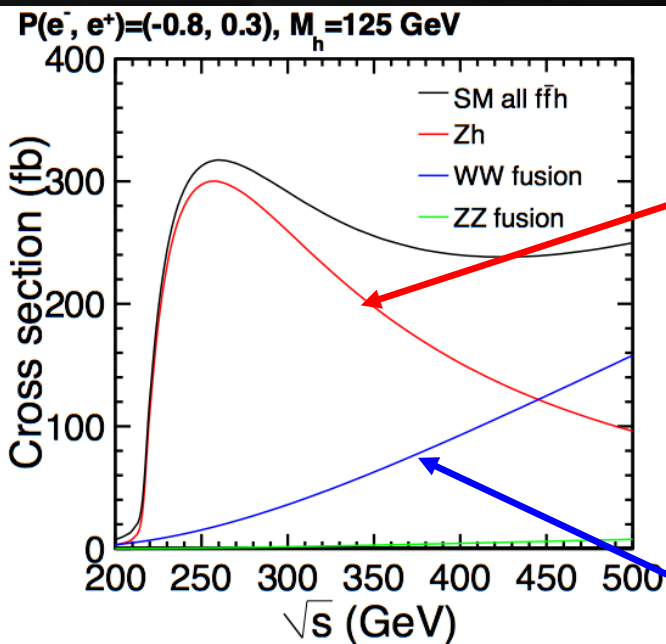
第三の道：「複数字宙？」

標準理論からの
ズレが見られな
かった場合

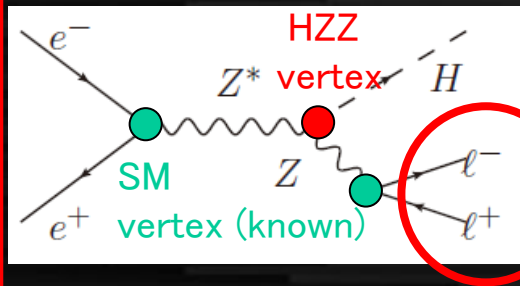
※: 超対称性 = 物質粒子と力の粒子を入れ換える新しいタイプの次元

13

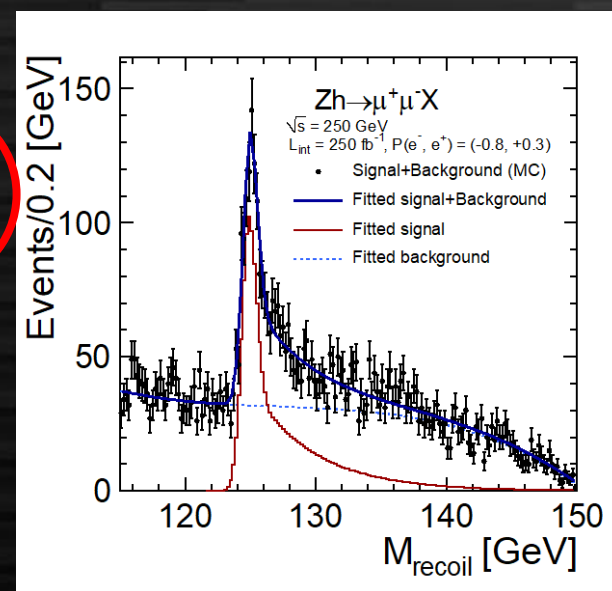
Higgsの生成過程と全断面積・質量測定



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

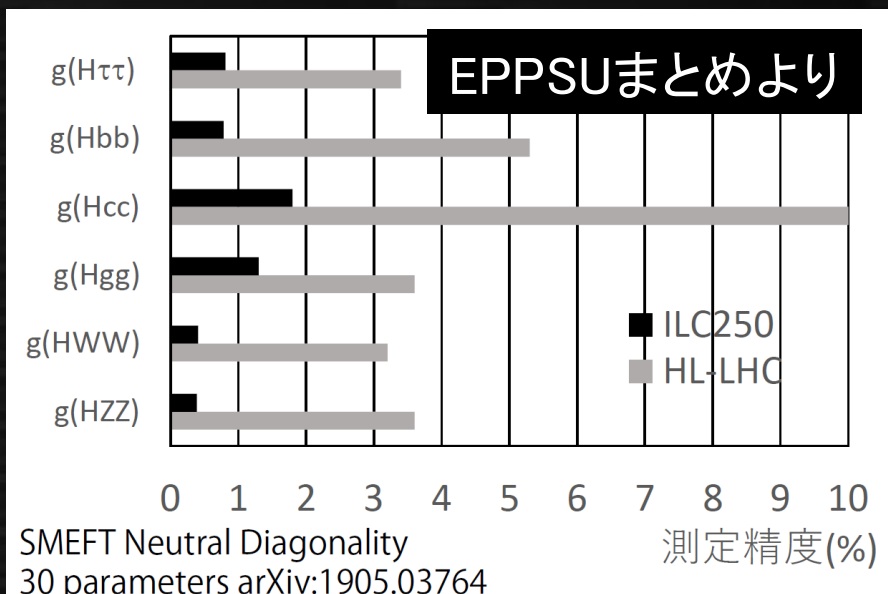
Higgs結合の精密測定

SUSY

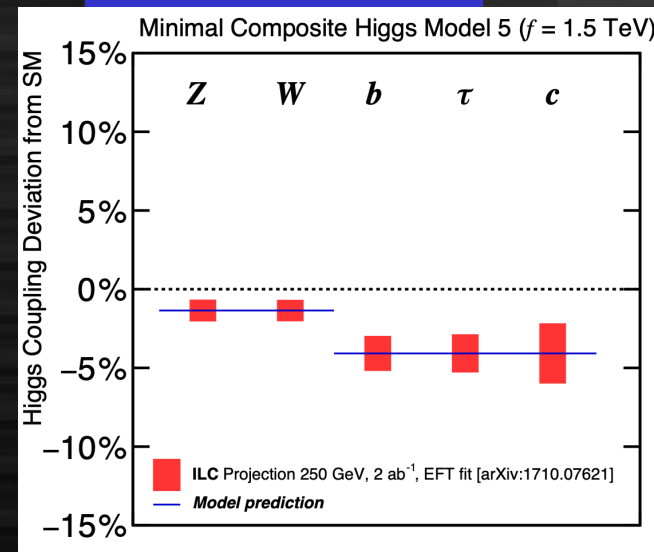
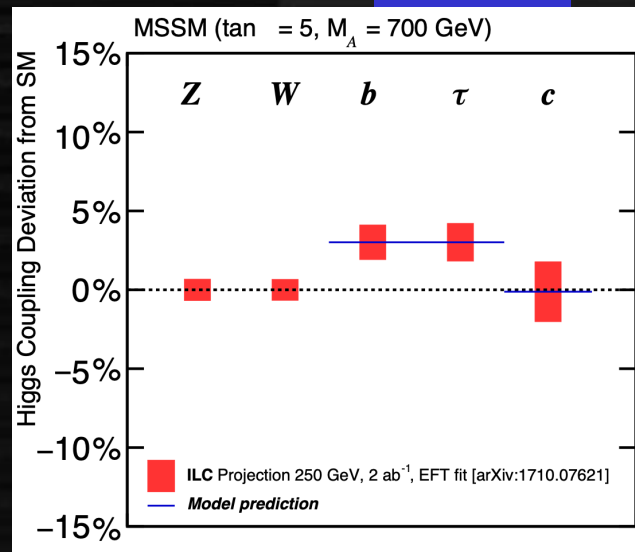
複合ヒッグス

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 Δm_H と Higgs結合定数について
という関係が期待される。

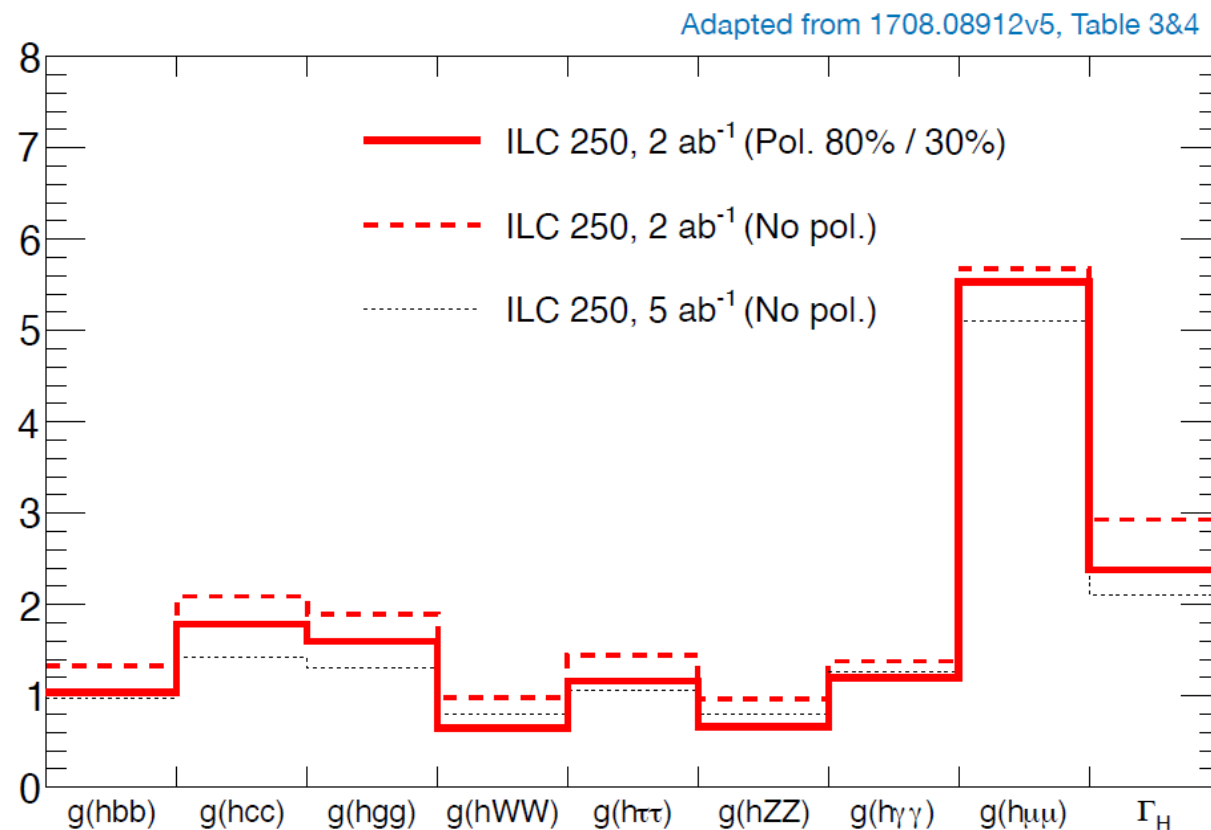
$$m_H^2 / \Delta m_H^2 \sim \delta g_h / g_h$$

Δm_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精密測定: 偏極の効果

Precision in [%]	ILC no pol. 2 ab ⁻¹	ILC 80/30 2 ab ⁻¹	no pol. 5 ab ⁻¹
$g(hb\bar{b})$	1.33	1.04	0.98
$g(hc\bar{c})$	2.09	1.79	1.42
$g(hgg)$	1.90	1.60	1.31
$g(hWW)$	0.98	0.65	0.80
$g(h\tau\tau)$	1.45	1.16	1.06
$g(hZZ)$	0.97	0.66	0.80
$g(h\gamma\gamma)$	1.38	1.20	1.26
$g(h\mu\mu)$	5.67	5.53	5.10
$g(hb\bar{b})/g(hWW)$	0.91	0.82	0.58
$g(hWW)/g(hZZ)$	0.07	0.07	0.07
Γ_h	2.93	2.38	2.11
$\sigma(e^+e^- \rightarrow Zh)$	0.78	0.70	0.50
$BR(h \rightarrow inv)$	0.36	0.30	0.30
$BR(h \rightarrow other)$	1.68	1.50	1.09

Precision [%]



Adapted from 1708.08912v5, Table 3&4

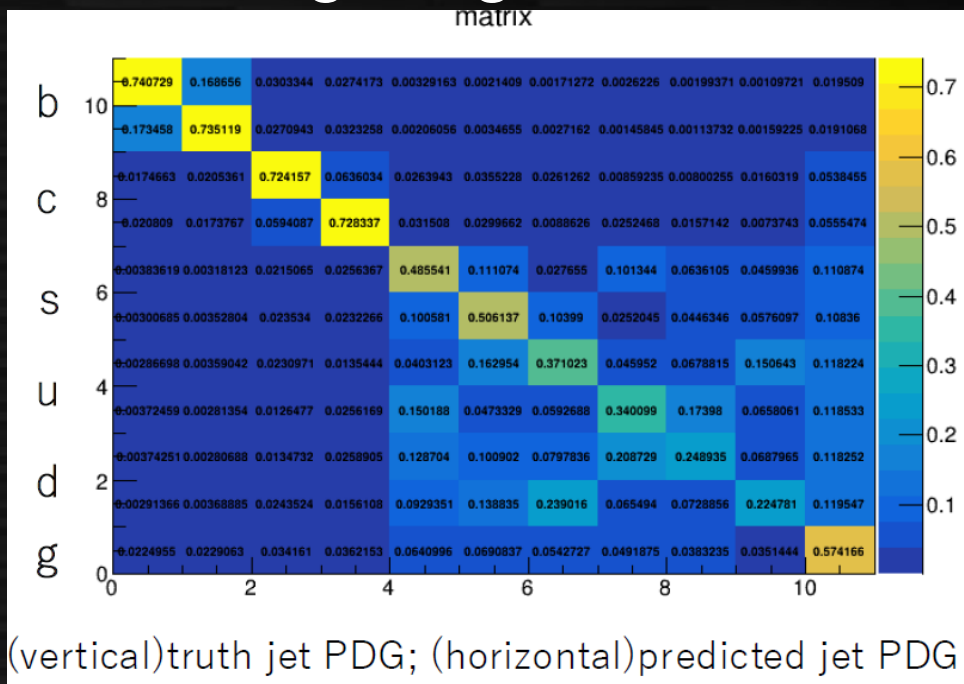
おおまかに、ILCでは偏極の導入で20-30%程度精度が向上(*)。

偏極衝突は、ラフにはルミノシティを稼ぐことと釣り合うほどの効果がある。

(*) Also a general stress is present that the beam polarization is useful for systematics control.

H → ss探索

- H → ss: 崩壊分岐比0.02%
 - 250 GeV, 2ab^{-1} で約20イベントしかない
 - ZH → $\nu\nu\text{ss}$ チャンネルをひとまず解析 (他のモードは現在解析中)
- Strange tag: dE/dxやTOF(100ps x 10点)の情報を利用



11カテゴリジェット識別 (ParT)

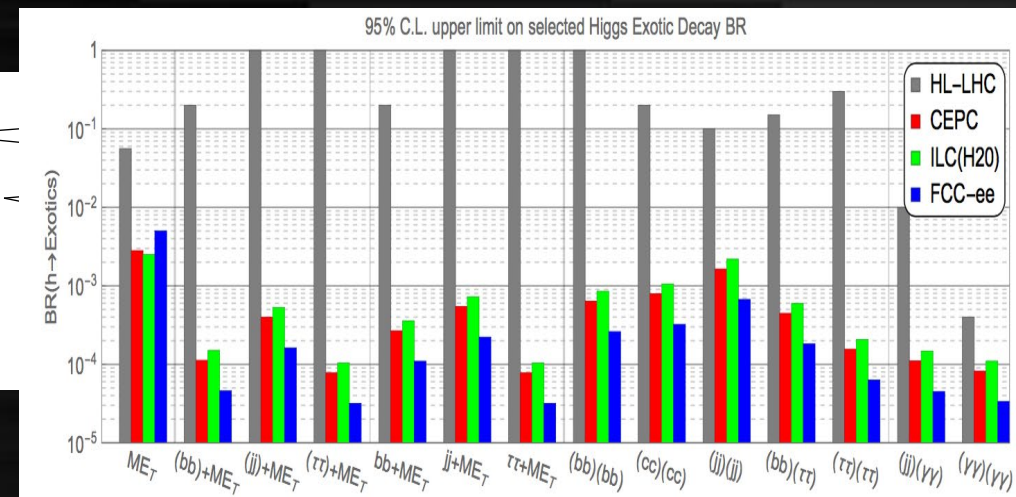
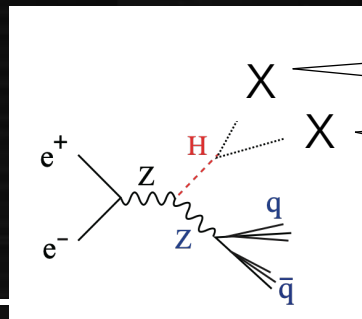
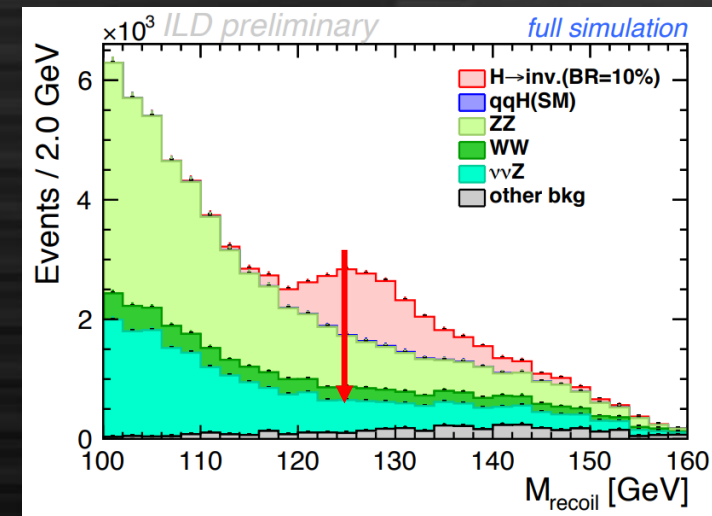
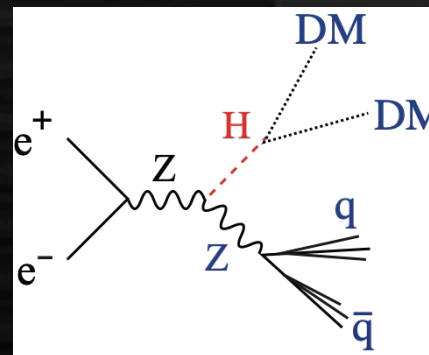
(e+, p-)

cut: dijetmass>=0	cut: BDT>0.215
signal: 6.4092, bg: 280854	signal: 2.19684, bg: 196.929
mixlep 1427.13	mixlep 0.334923
4fwwsemilep 238880	4fwwsemilep 18.7894
4fzzsemilep 11593.9	4fzzsemilep 93.2334
4fznusl 6225.61	4fznusl 46.0663
htautau 36.1652	htautau 0.0143811
hww 2590.46	hww 2.20851
hzz 304.46	hzz 1.26987
nnbb 16648.1	nnbb 0
nncc 908.705	nncc 4.60964
nngg 2239.34	nngg 30.4023
efficiency : 1	efficiency : 0.342763
Significance : 0.0120937	Significance : 0.15568

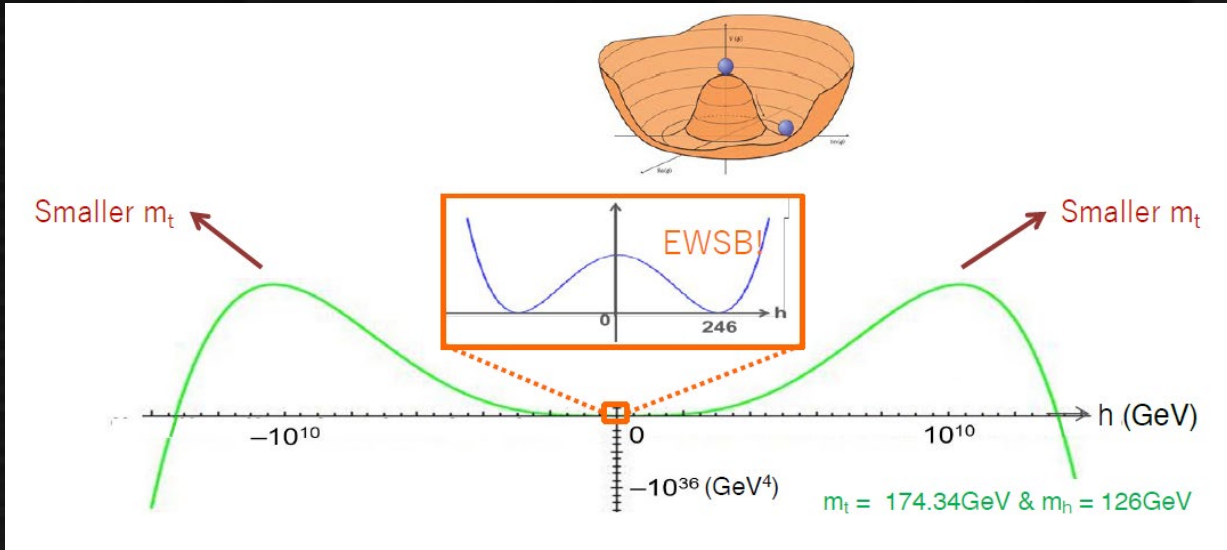
左巻き、右巻き両方合わせて精度は約500%

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

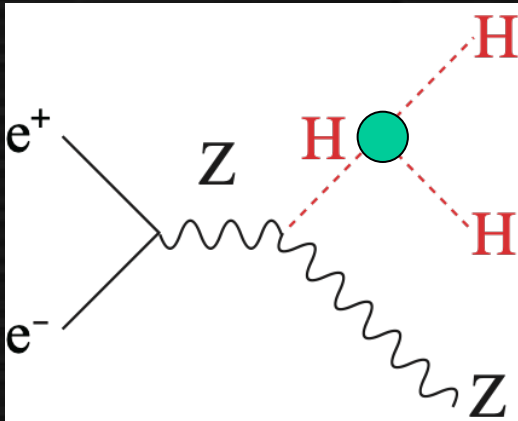


ヒッグスに関する相互作用

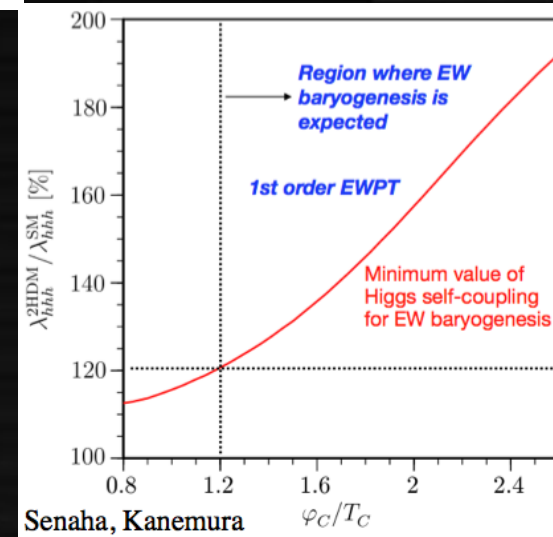
- ゲージ相互作用 (ヒッグス機構)
- 湯川相互作用 (フェルミオン結合)
- 自己相互作用

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

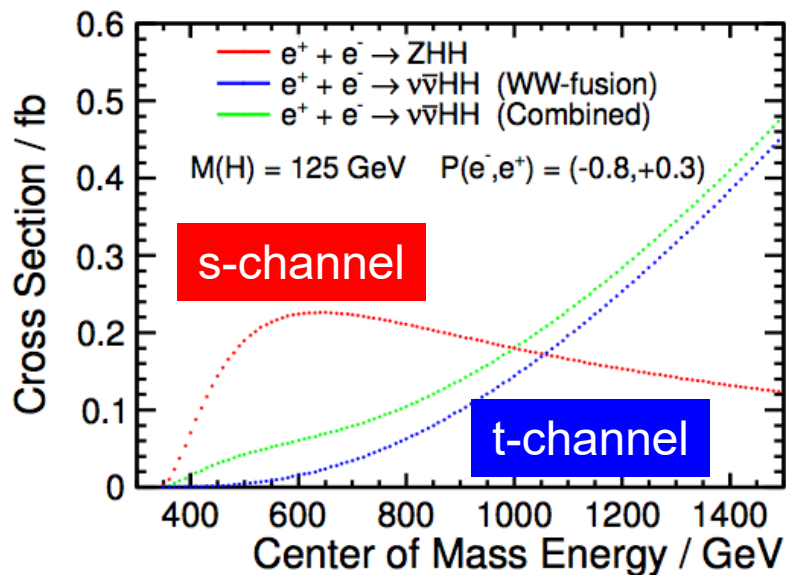


自己結合が大きいことは
電弱バリオジェネシスが
起きる条件の一つ

宇宙の物質生成にも
関係する

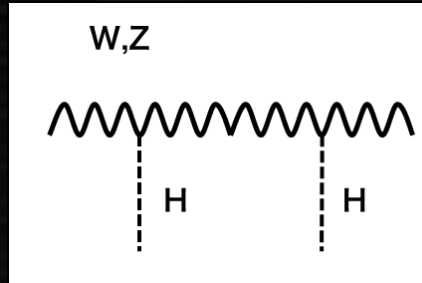
Higgs 自己結合の解析

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

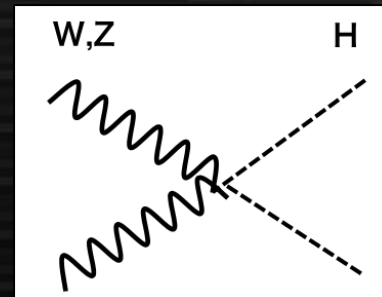


$O(100) \text{ events / ab}^{-1}$

干渉するダイアグラム



ゲージ結合 $\times 2$



ゲージ4点結合

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

S-channel (ZHH)
信号の内訳

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

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

従来の結果: **27% @ 500 GeV, 10% @ 1 TeV (4ab^{-1})**

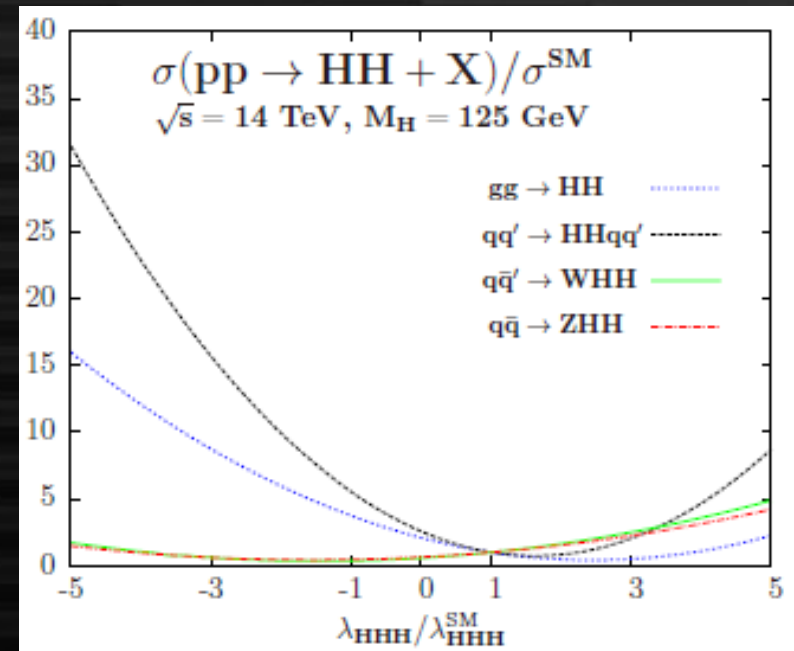
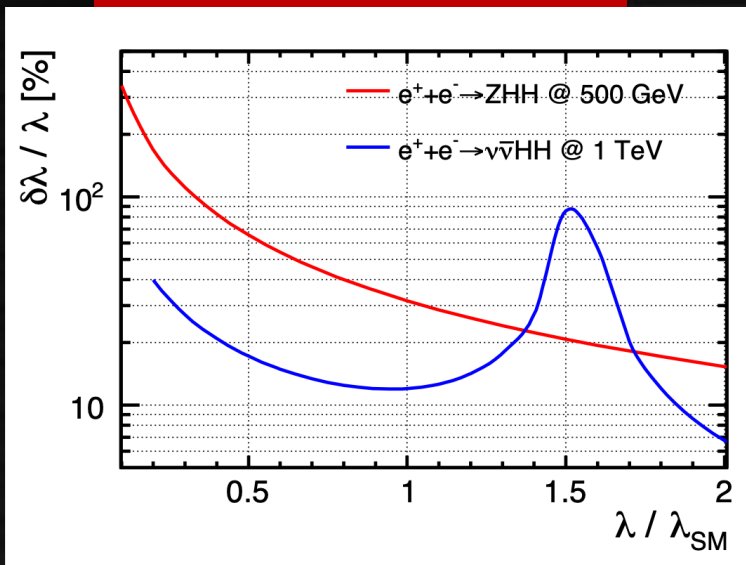
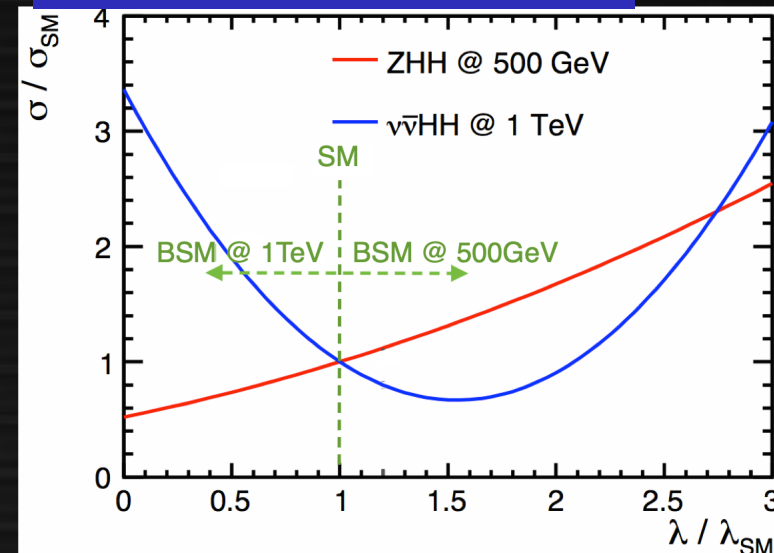
干渉の効果と $\delta\lambda$

ILC (500 & 1000 GeV)

HL-LHC

Effect of interference

Gradient $\rightarrow$ resolution



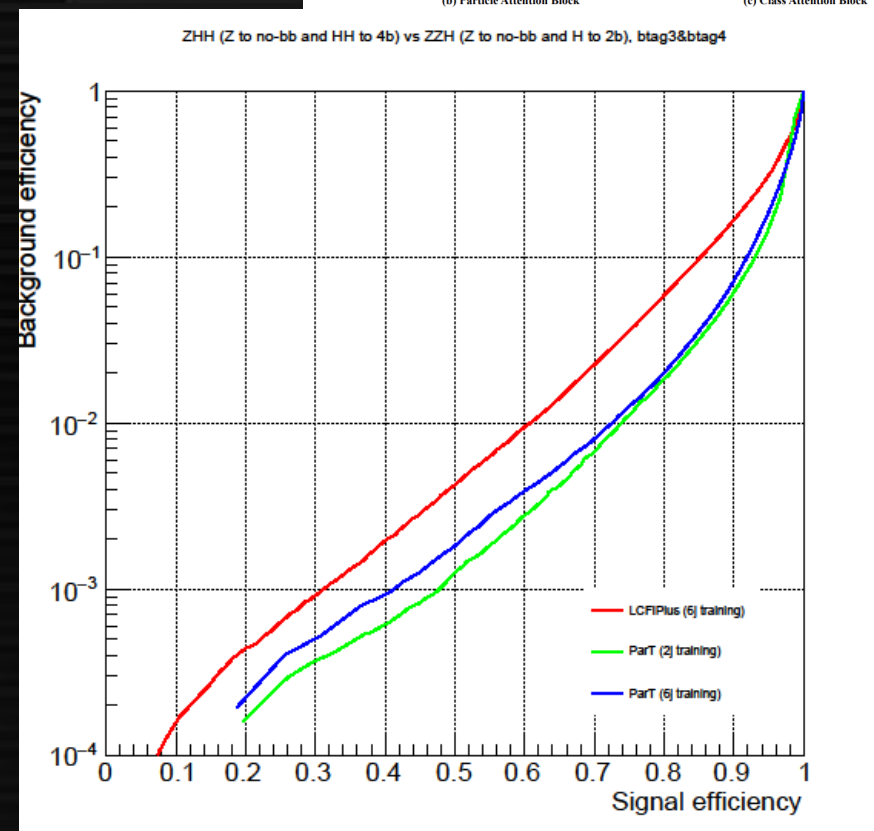
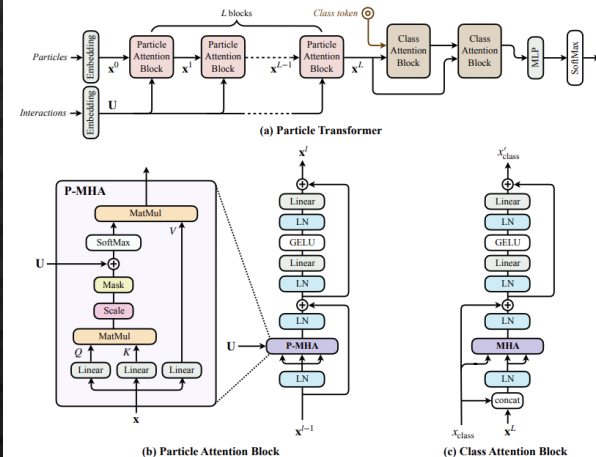
干渉がなければ λ の精度は σ の精度の半分 ($\delta\lambda/\lambda = 1/2.0 \times \delta\sigma/\sigma$)

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

λ が大きいとZHHは精度が向上(σ が増えるため), $\nu\nu\text{HH}$ 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

性能向上の予測

- Transformer: 自然言語処理で開発された深層ネットワーク (e.g. ChatGPT)
 - 2つのオブジェクト間の関係を学習する
- Particle Transformer (ParT): 粒子間の相関を取り入れたtransformer
 - ParticleNetを上回る性能を発揮し、次期CMS flavor taggingのベースライン
- ParTによる性能向上
 - qqHH終状態で>30%の収率向上の予想
 - 他の改善とあわせて自己結合精度で **27% → 18%**へ



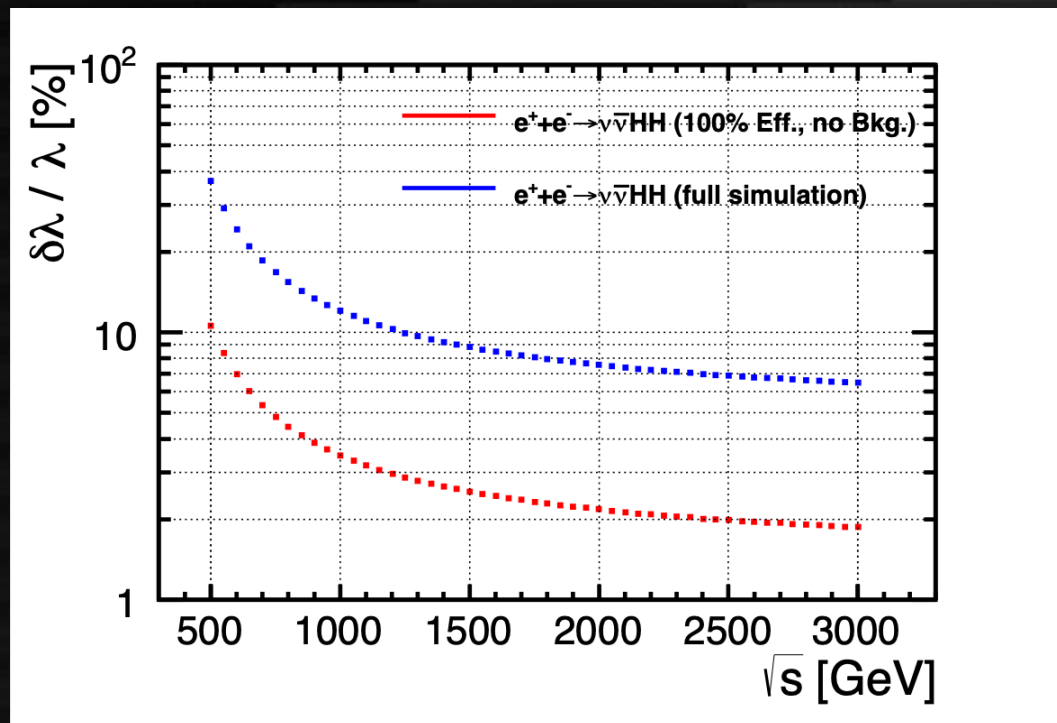
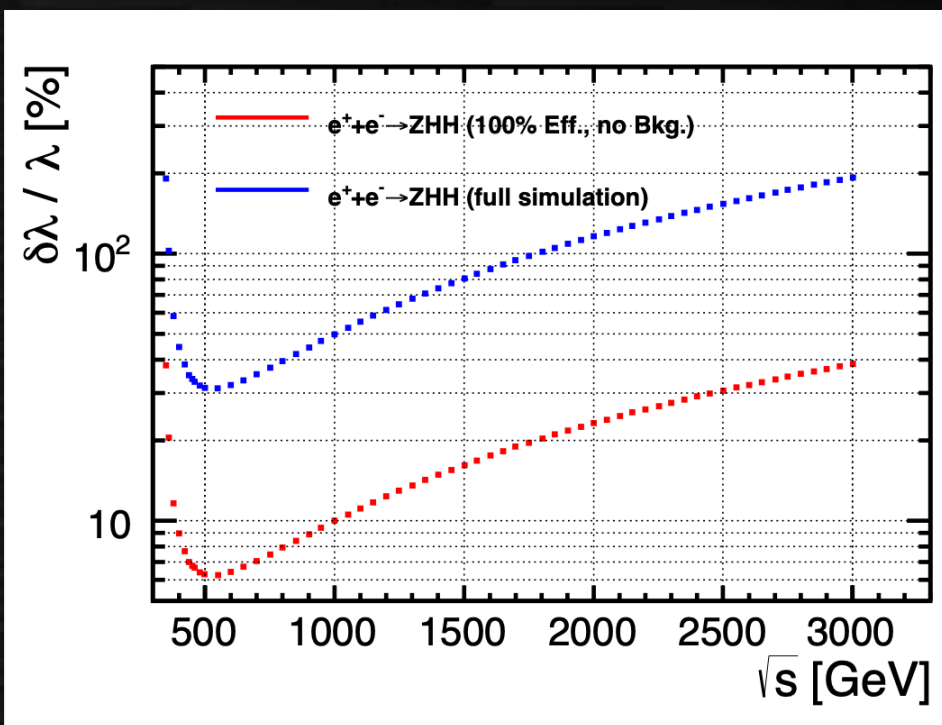
CM energyの効果 (500 → 550 GeV)

- 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% → 15% (preliminary)

- LCF@CERNでは8 ab⁻¹を想定し、11%の精度予想

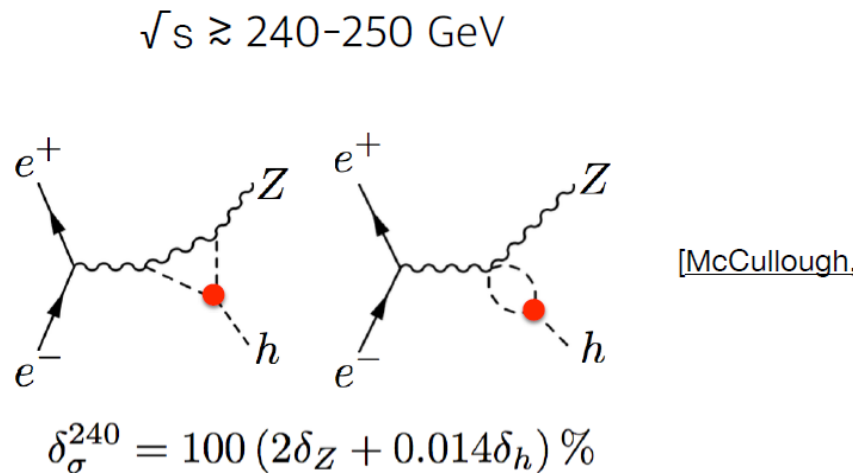
ZHH

$\nu\nu HH$



λ by single Higgs

A new question: λ_{hhh} from Single-Higgs?

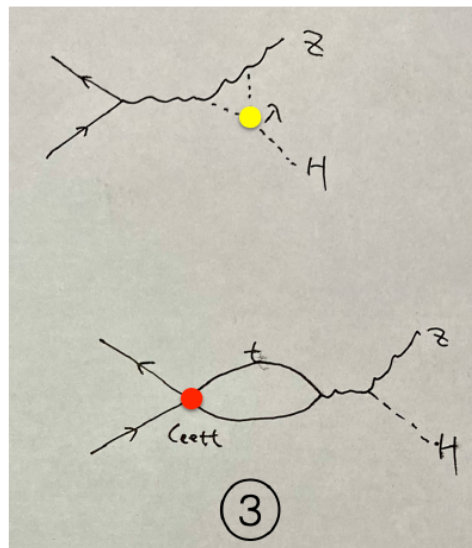


if **only** λ_{HHH} allowed to vary $\rightarrow \delta\lambda_{hhh} \sim 20\%$ @ CEPC
would that be a **discovery**?

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 λ 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。

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 σ_{ZH}

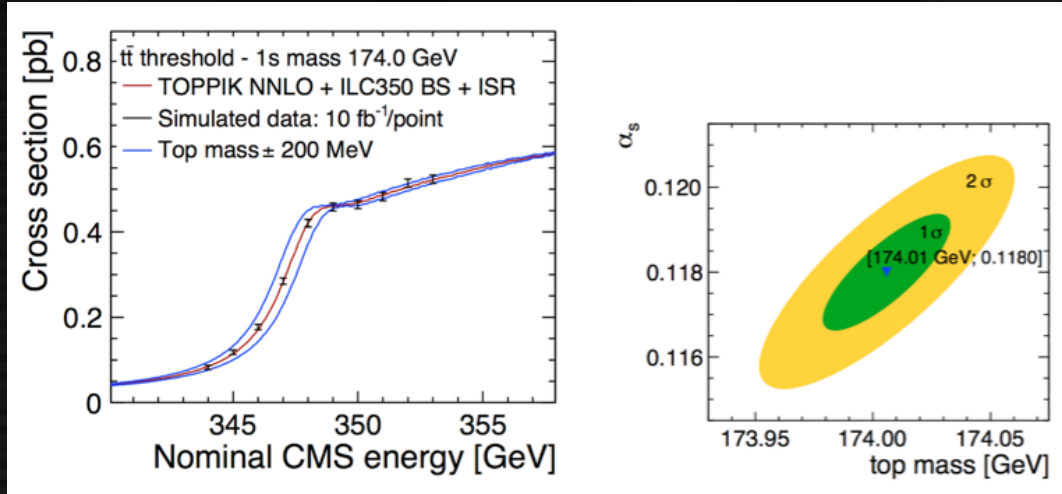
$\delta\sigma_{ZH} \sim 0.3\%$ (1.5%) for 240 (365) GeV

a test fit for 5000 fb⁻¹ (240) + 1500 fb⁻¹ (365)

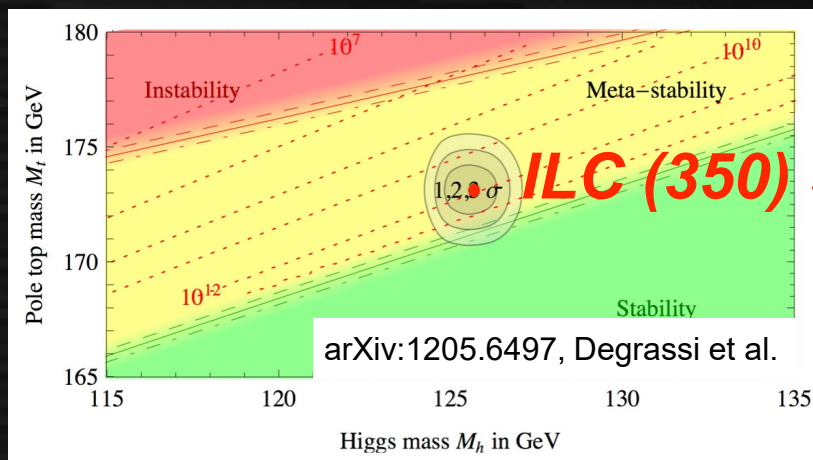
$\delta\lambda_{hhh}$ mildly increased from 57% to 77%

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

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



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

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

α_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

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

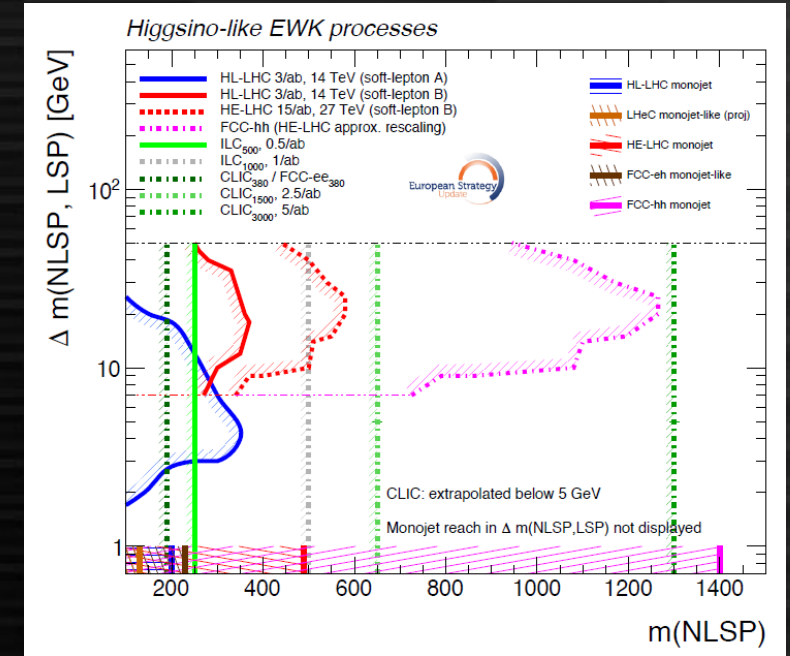
- SUSYではHiggsino, Winoが縮退するため
他がdecoupleしていると自動的に縮退

- 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

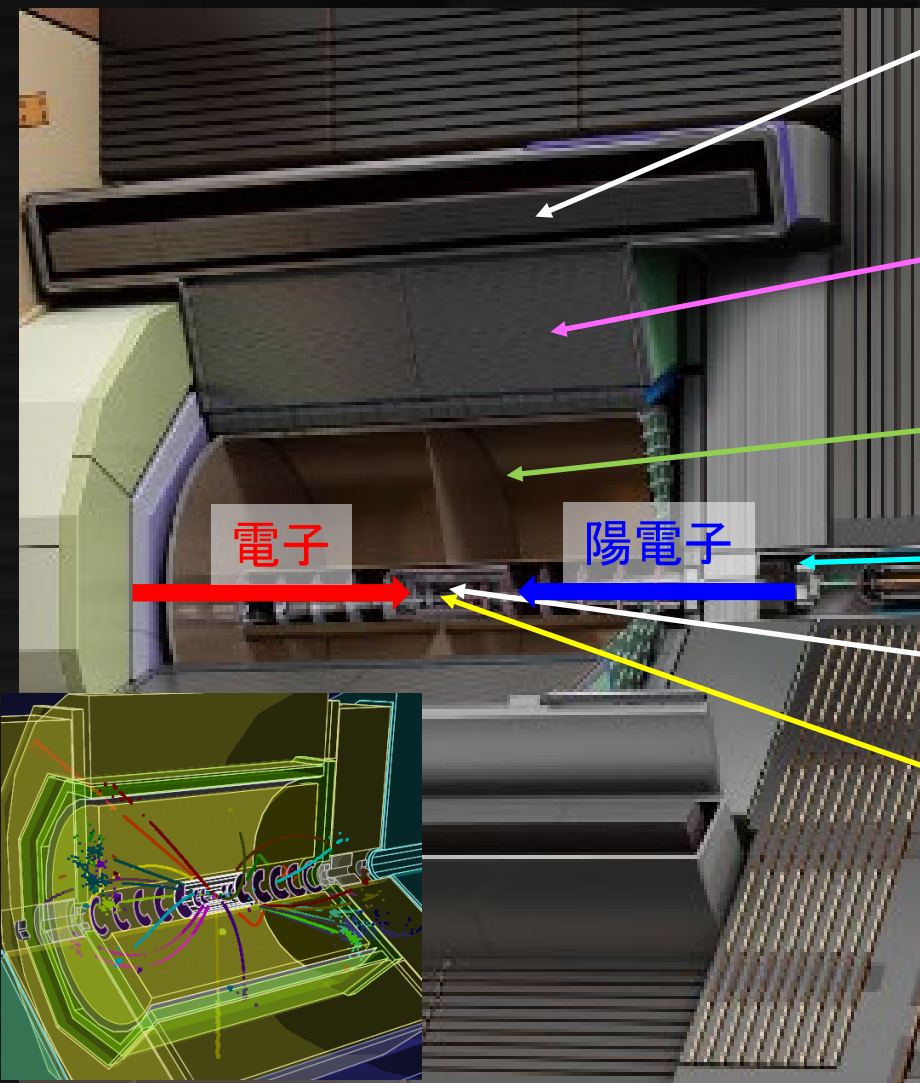


Mass splittingが1桁GeV (soft pion)
はHadron colliderは苦手

Summary

- HL-LHC後の次期コライダーとして、Higgs factoryは最有力
 - CEPCの進展(今年・来年)と欧州戦略(FCC, LC@CERN)に注目
 - ILCの加速器開発(ITN)および物理・測定器開発も着実に進展
- ヒッグスは新物理への窓、精密探索により新物理の扉を開く
 - ヒッグスの結合定数測定、BSM崩壊探索
 - ヒッグス自己結合: 20%を切る精度を実現、物質生成の謎にもつながる
- Top/新物理直接探索もユニークな機会
- 本年8/29-31で、ヒッグスファクトリー夏の学校を行います。ぜひご参加ください。
(詳細はまもなくお知らせします)





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

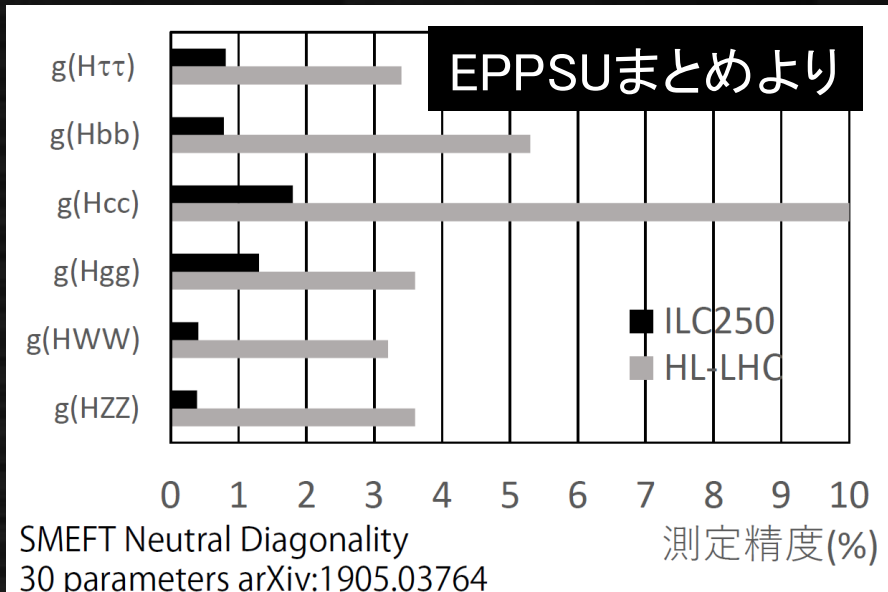
ビームパイプ
シリコン崩壊点検出器・飛跡検出器
荷電粒子の位置を精密に測定する

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

$Y_n =$ 測定値 $F_n =$ 定数 (理論計算可)

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

ZH→Zbb

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

$\nu\bar{\nu}H \rightarrow \nu\bar{\nu}bb$

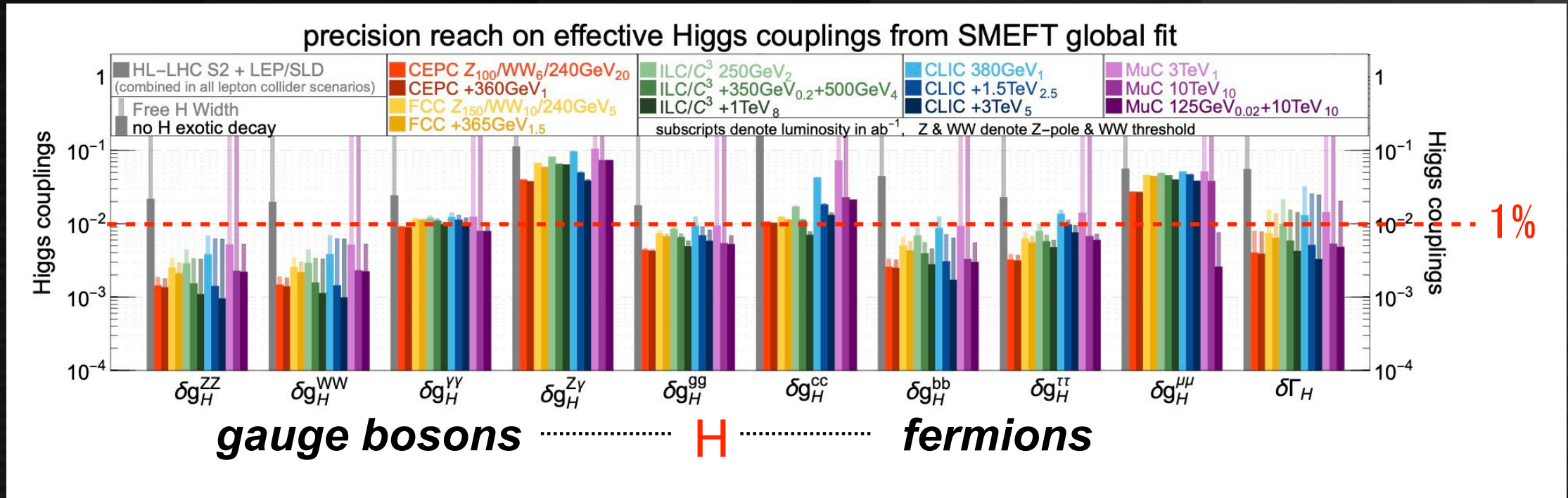
$$Y_3 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \times \text{Br}(H \rightarrow b\bar{b}) = F_3 \cdot \frac{g_{HWW}^2 g_{Hb\bar{b}}^2}{\Gamma_T}$$

$\nu\bar{\nu}H \rightarrow \nu\bar{\nu}WW^*$

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

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 Γ_T (ヒッグス全崩壊幅) を導出
4. Y_2/Y_3 と g_{HZZ}/g_{HWW} , Γ_T から $g_{Hb\bar{b}}$ を導出

Higgs BR measurements

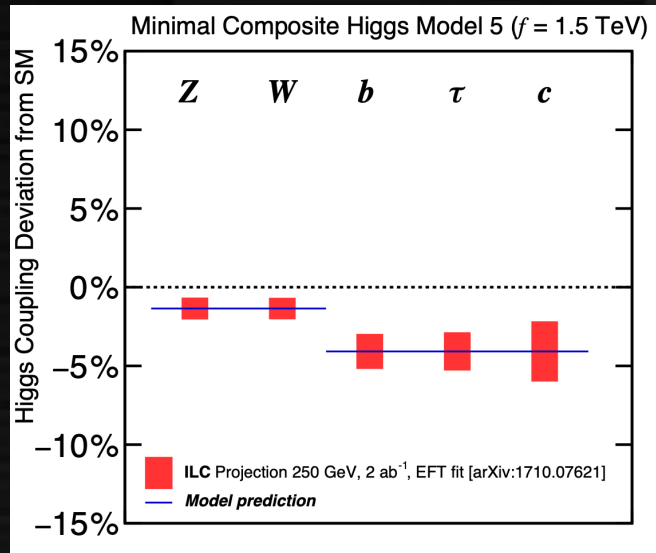
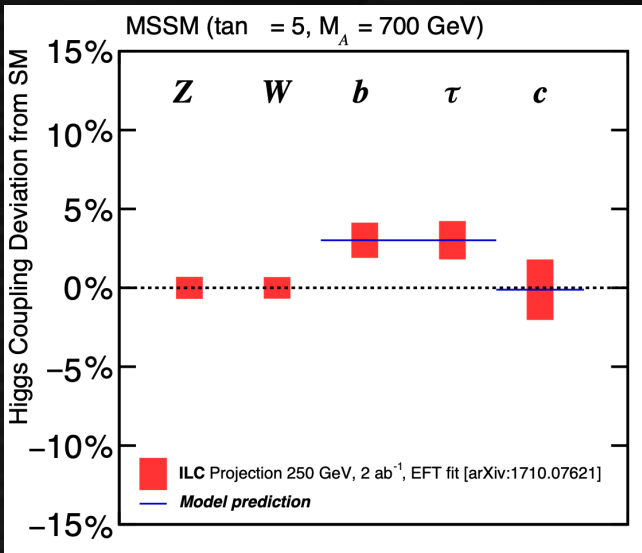


Any HFs: $\sim 1\%$ (or less depending decay channels) BR of dominant decays

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

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

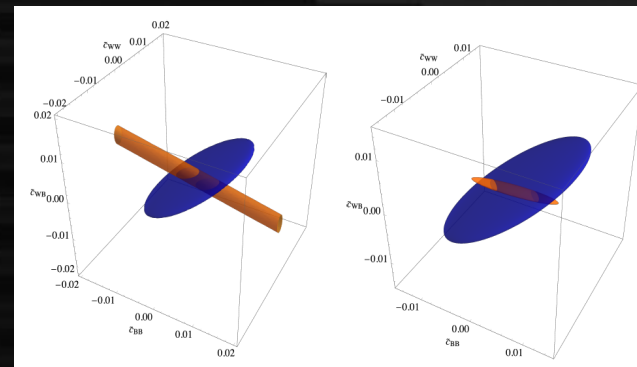
Higgs結合によるBSMの識別



EPPSU Physics bookの議論では、Higgsの量子補正 Δm_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。
 Δm_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O(%)の結合定数測定は1 TeVの新物理の間接探索になる。

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

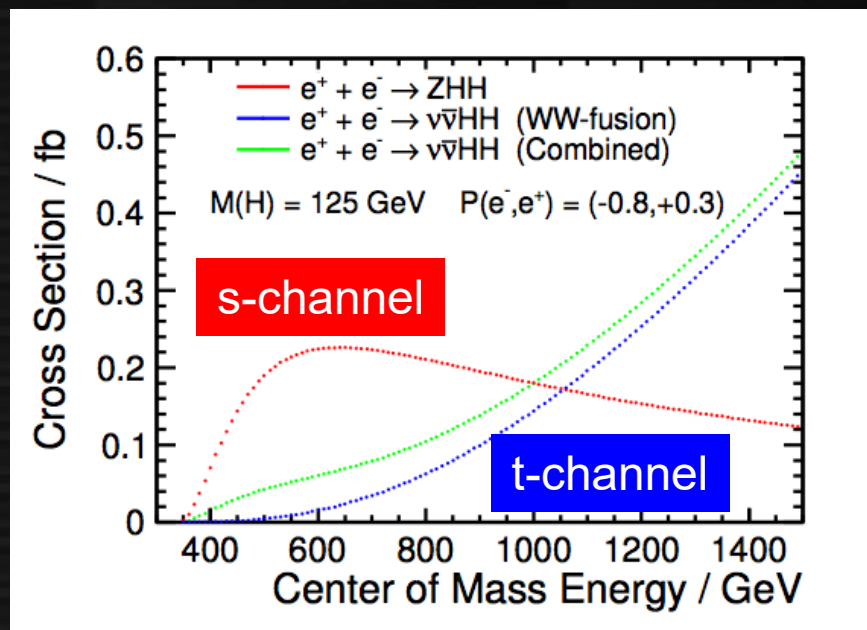


SMEFTによるCPV operatorの感度。
青がHL-LHC, オレンジがILC250

Higgs self coupling

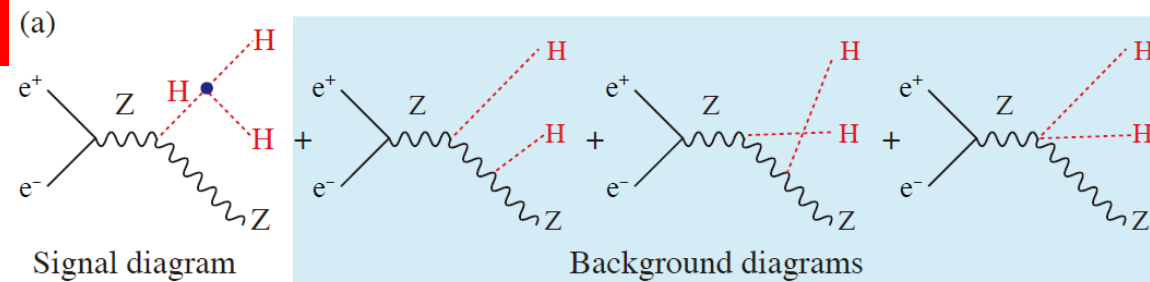
$$V(\eta_H) = \frac{1}{2}m_H^2\eta_H^2 + \lambda v\eta_H^3 + \frac{1}{4}\lambda\eta_H^4$$

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

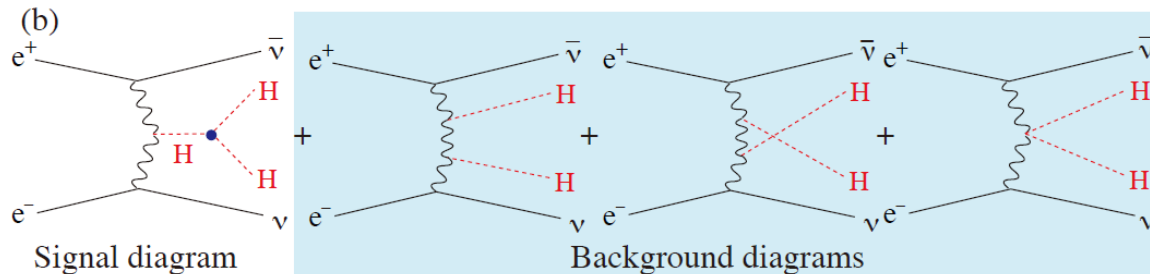


Extremely small cross section:
O(100) events / ab^{-1}

s-channel



t-channel



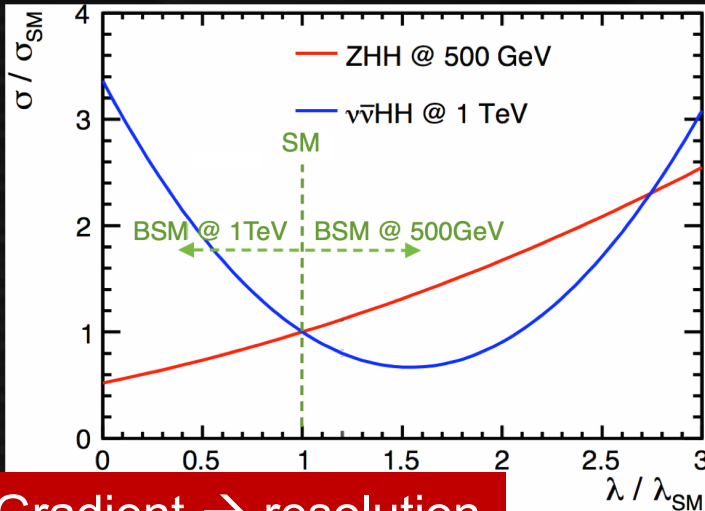
Effect of insensitive diagram → next page

channel	$\sqrt{s}[\text{GeV}]$	L [ab^{-1}]	λ precision
s-channel	500	4	27%
t-channel	1000	4	10%

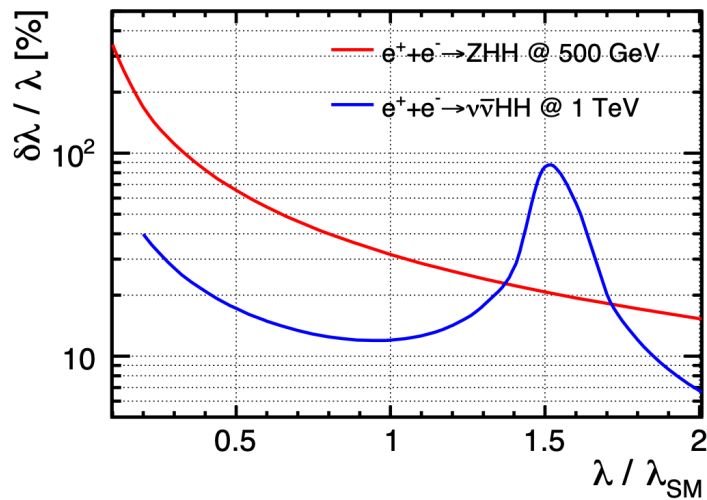
Ultimate precision at linear collider: ~5% at 2-3 TeV

Higgs self coupling (cont.)

Effect of interference

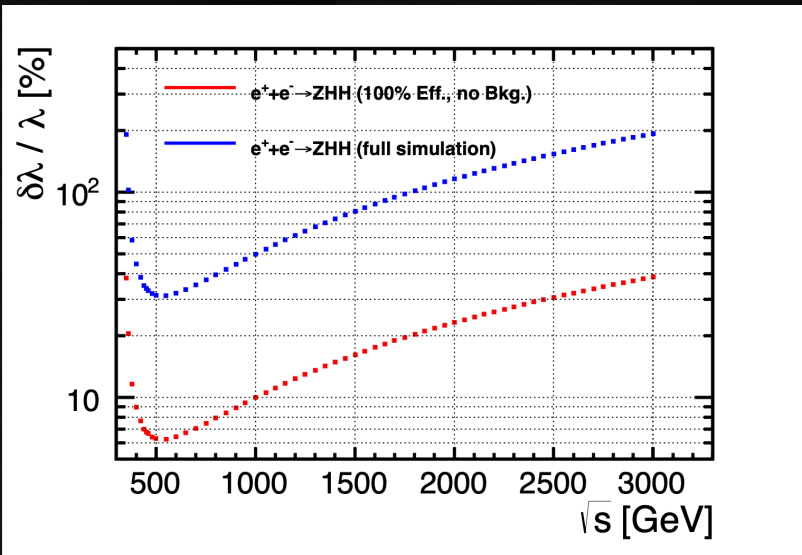


Gradient $\rightarrow$ resolution



500 GeV: better at higher λ (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

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

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)

DM探索など

• 暗黒物質対生成

– ISR photonでtag

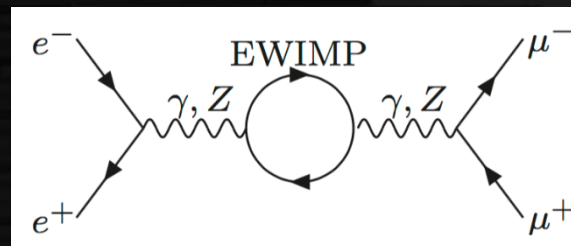
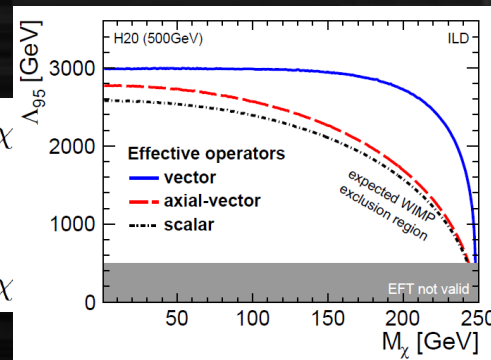
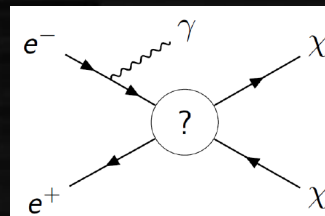
- LHCとは見ている結合が異なる
- Messenger scaleで数TeVまで探索可能 (m_χ はほぼ $\sqrt{s}/2$ まで)

• 2f精密測定による間接探索

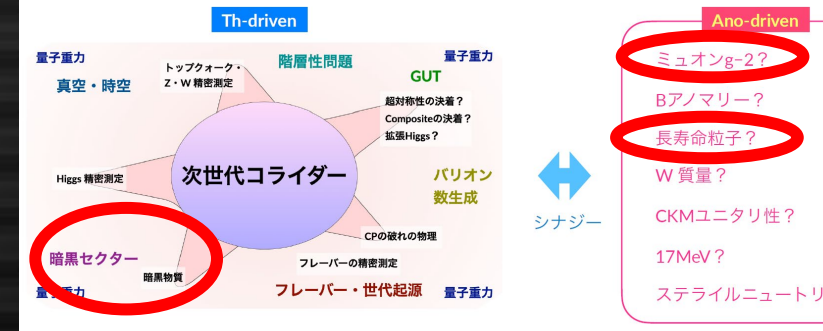
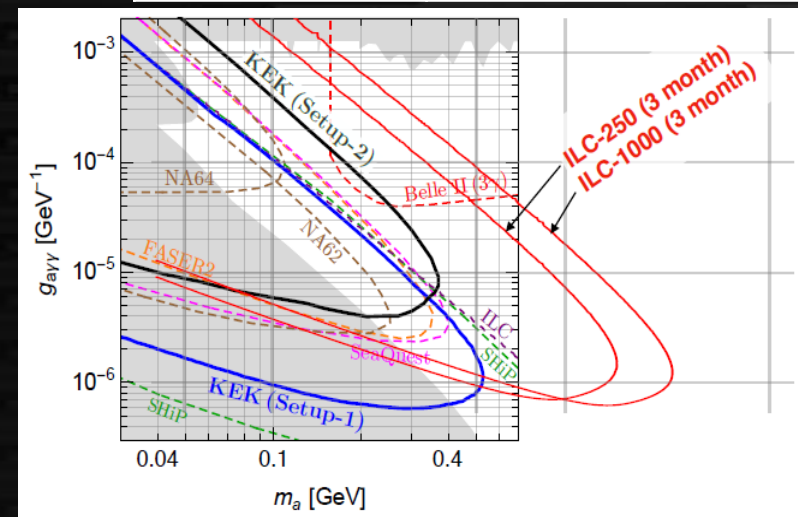
- WIMPがループで入る
- 直接探索よりやや高い質量まで感度

• 固定標的実験

- 軽いDM探索など



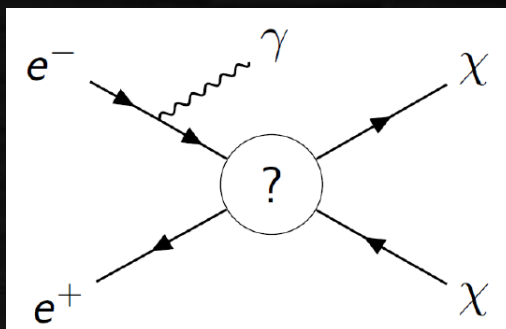
ILC 250 GeV	mass reach (3 σ)
Higgsino	150 GeV
MDM	330 GeV
Wino	190 GeV



Mono-photon search

arXiv:2001.03011

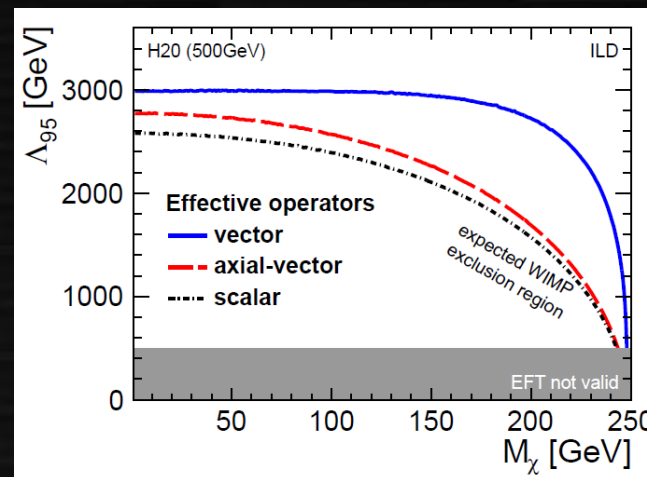
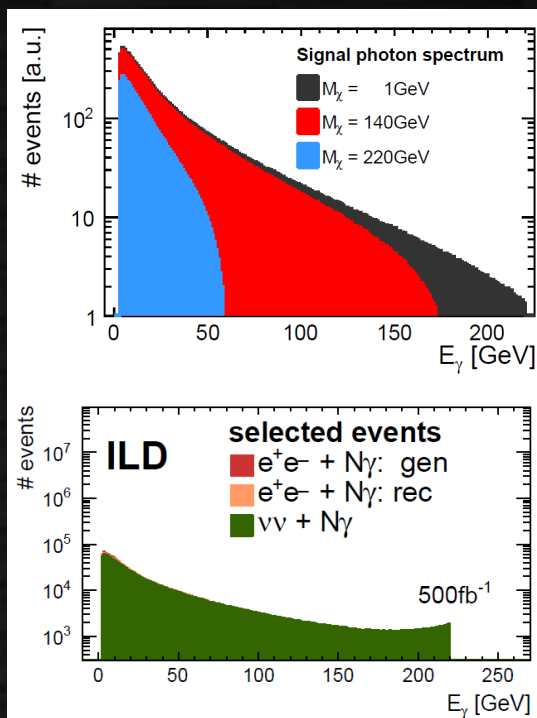
モデル非依存に $m < \sqrt{s}/2$ の
暗黒物質を直接探索



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	$\sigma \propto 1/\Lambda^4$

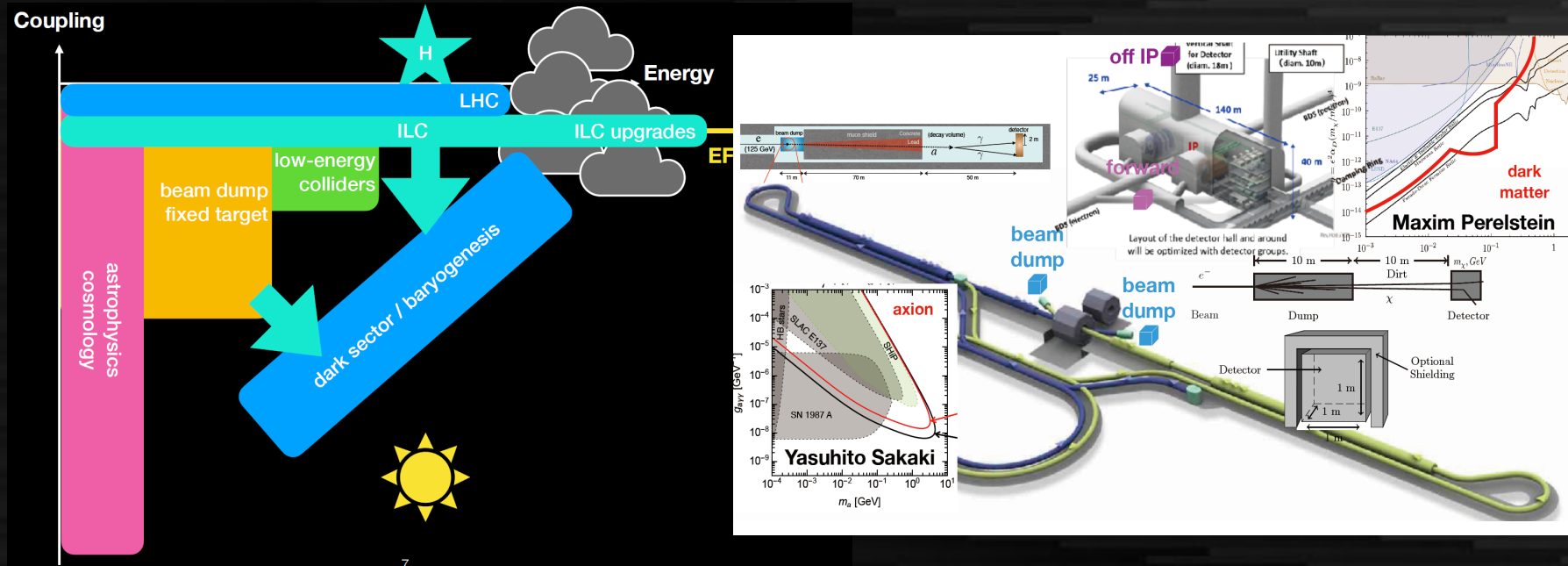
Λ は新物理のエネルギースケール



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 ~ 3 TeVスケールの新物理に感度
とバックグラウンド

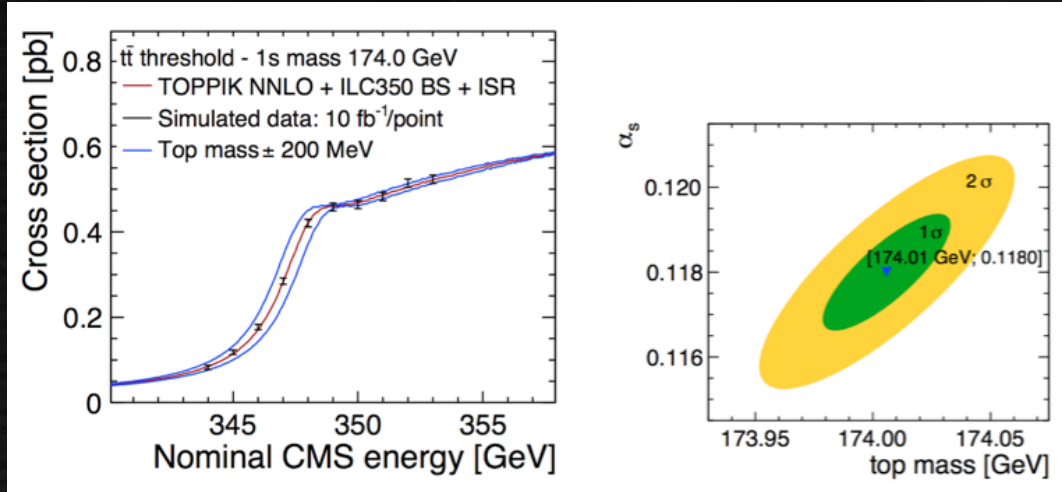
固定標的実験@ILC



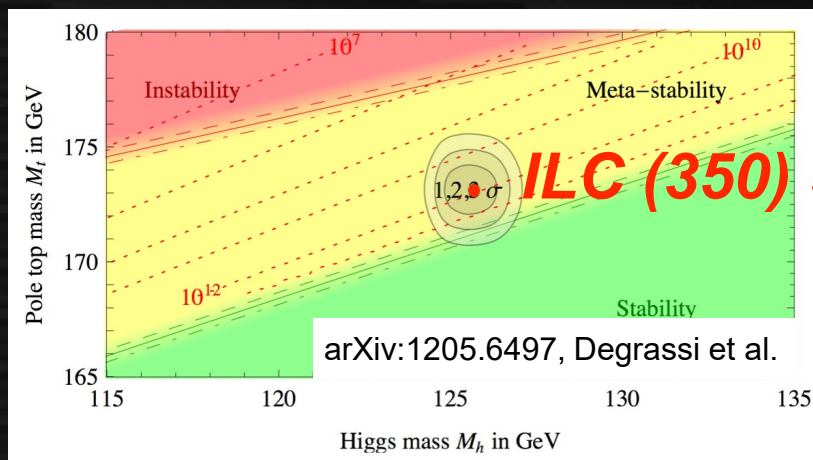
エネルギーは高いが結合が大きい
 → コライダーでの新物理探索
 エネルギーが低く結合が小さい
 → 固定標的実験

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



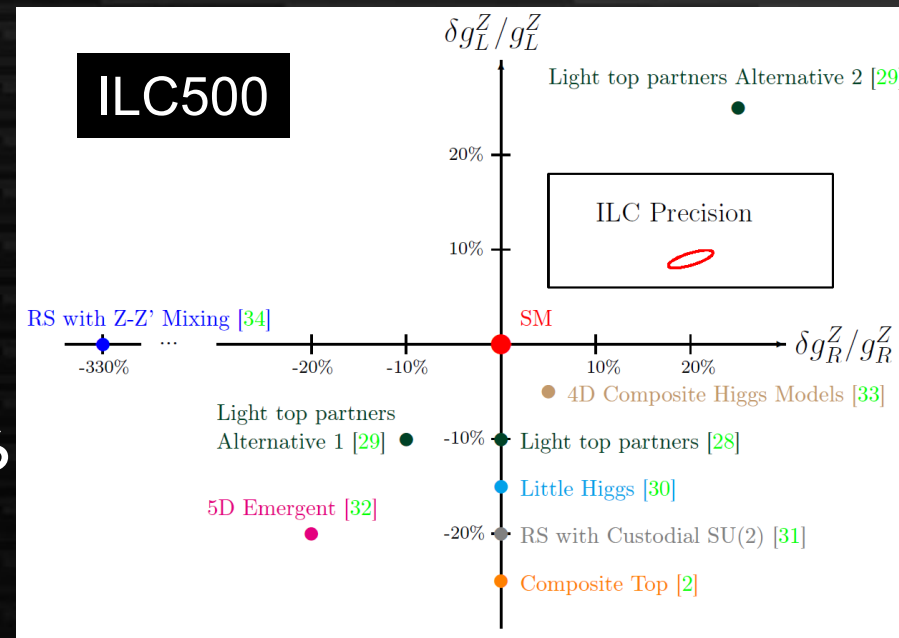
Threshold scanによるtopの精密測定 MSbarに直接変換できる「理論的に扱いやすい」質量を直接求められる



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

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

α_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

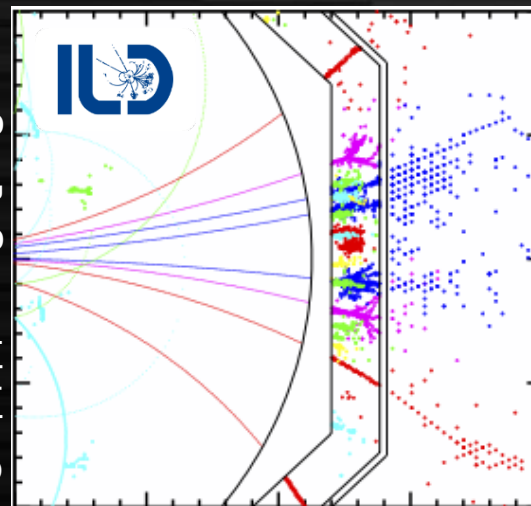
Particle flow concept

Separating particles inside jets to do track-cluster matching

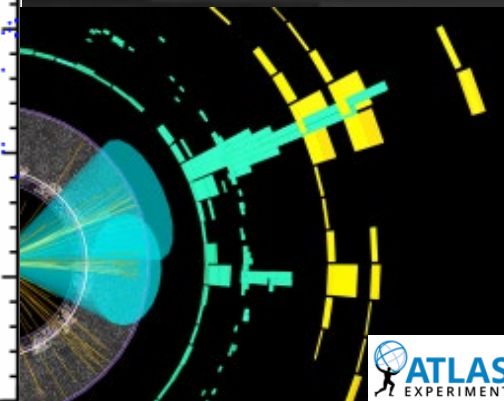
Requiring

- Highly-granular calorimeters
- Intelligent pattern recognition

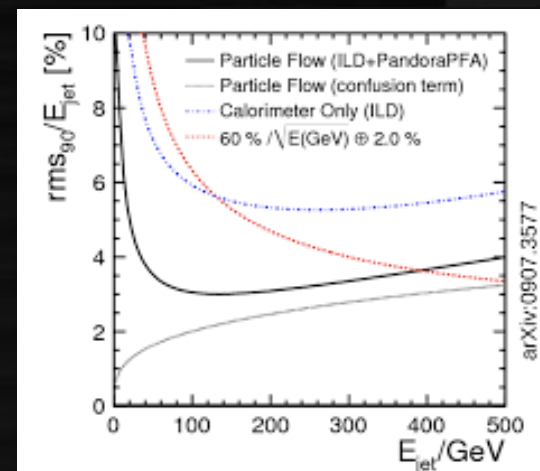
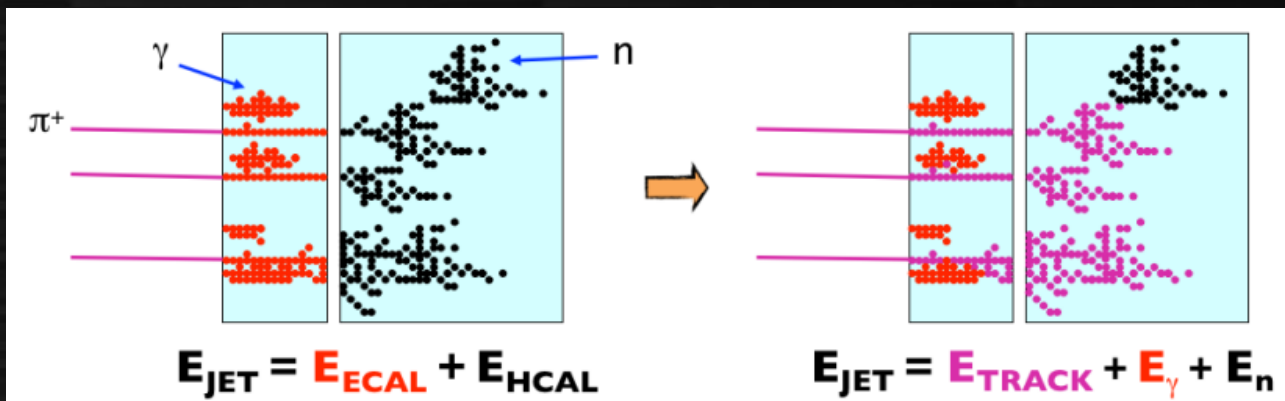
荷電粒子~60%
光子~30%,
中性ハドロン~10%
粒子分離により
荷電粒子の運動量
をエネルギー計算
に使える



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

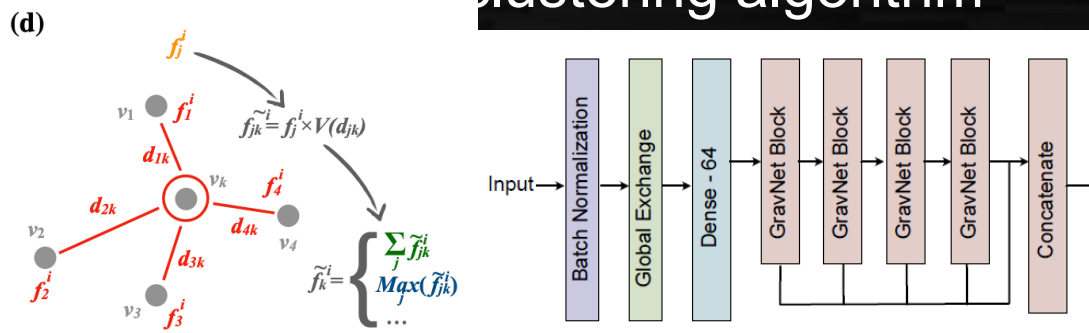
$$\frac{\delta E_{jet}}{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}[\text{GeV}]}}$$

~2 times better than calo-only

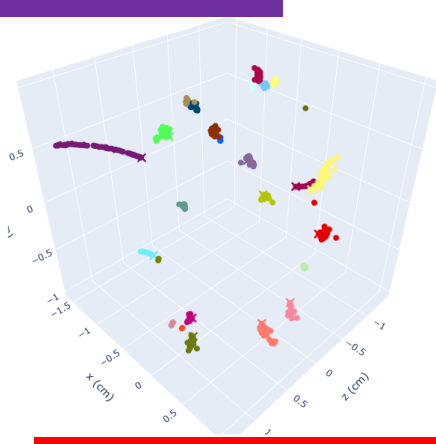
Resent focus: applying deep learning

Particle flow with Graph Neural Network

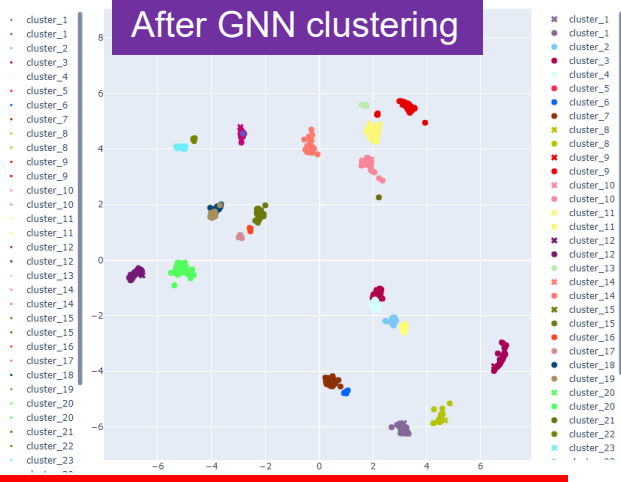
Adding track-cluster matching to HGICAL clustering algorithm



Real coordinate

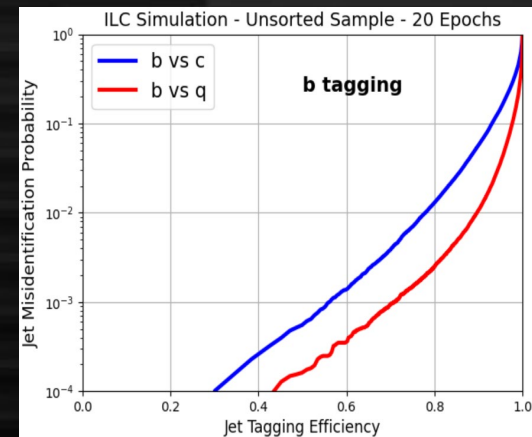
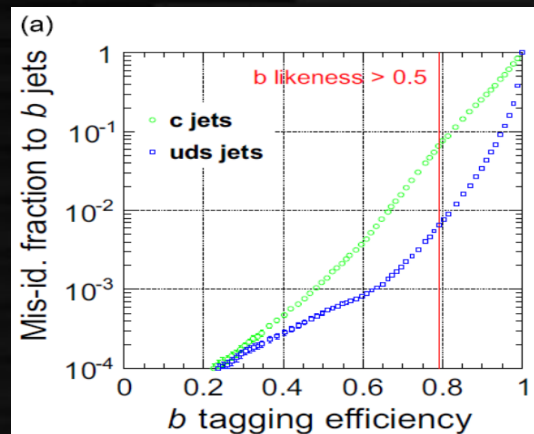


After GNN clustering



Flavor tagging with GNN/Transformer

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

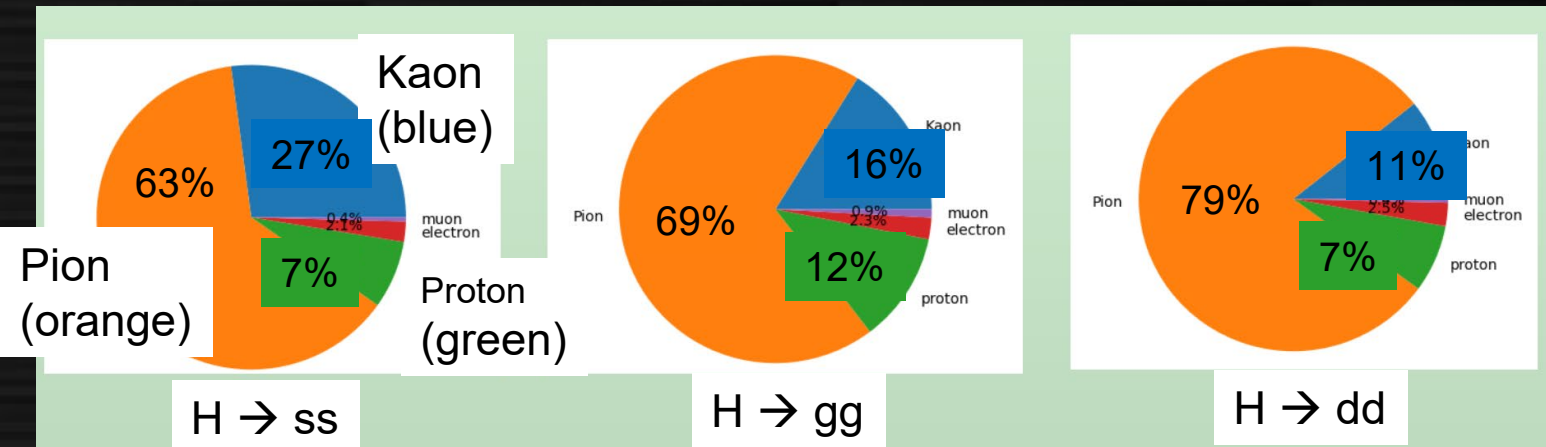


	b-tag 80% eff.		c-tag 50% eff.	
Method	c-bkg acceptance	uds-bkg acceptance	c-bkg acceptance	uds-bkg acceptance
LCFIPlus	10%	1%	10%	2%
ParT	1.29%	0.25%	1.02%	0.43%

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



Fractions of tracks having > 5 GeV

Fraction of true particles

True particle

	K	π	p	e	μ
K	0.65	0.04	0.20	0.04	0.10
π	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
μ	0.01	0.02	0.00	0.01	0.53

$\uparrow 3 < p < 5$ GeV

	K	π	p	e	μ
K	0.74	0.07	0.20	0.13	0.16
π	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
μ	0.01	0.01	0.00	0.01	0.40

$\uparrow p > 5$ GeV

CPID prediction

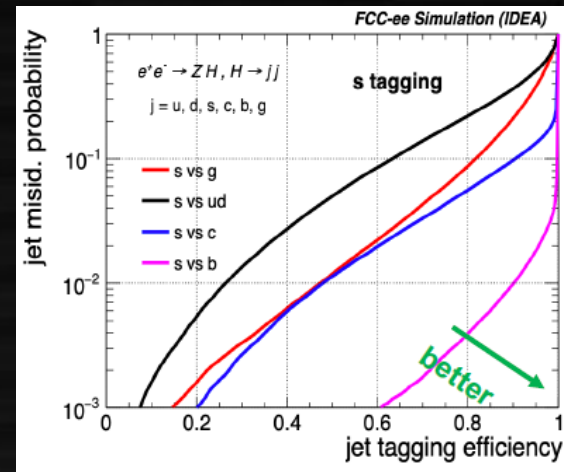
More Kaons in ss
More protons in gg

Strange tagging: initial results

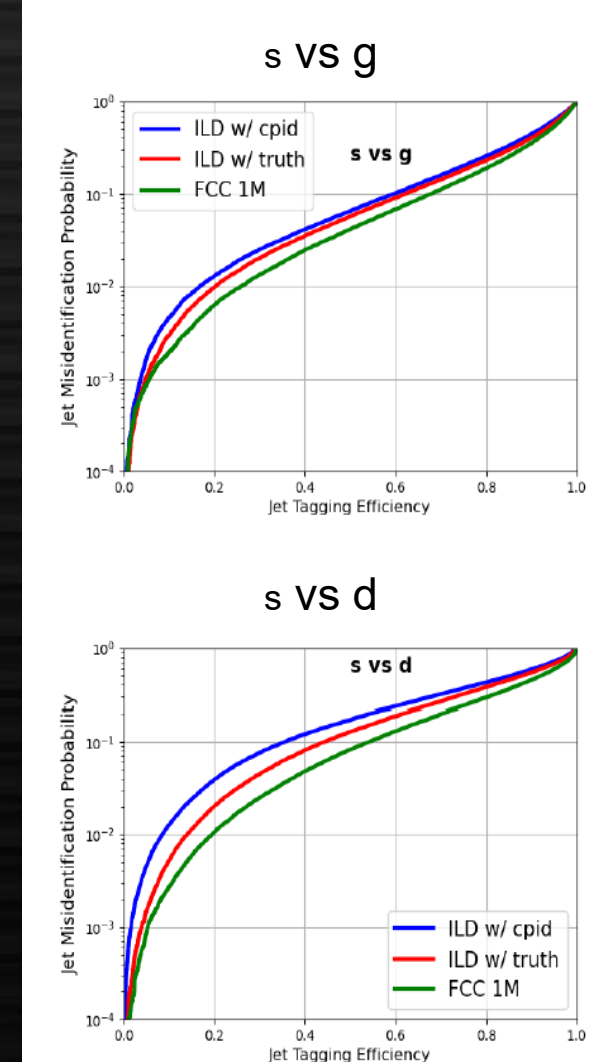
- First results obtained with CPID
 - No significant improvements from old PID: investigating
 - Compared with truth PID: some difference
 - FCC (1M) better than ILD Truth PID
 - Reason needs to be investigated (maybe non-perfect assignment of truth PID)
 - Still needs study

	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

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	σ_e	eff.
$eeHH$	3.9 ± 0.03 (2.6)	7 ± 0.6	1.29σ	59%
$\mu\mu HH$	5.1 ± 0.03 (2.8)	9 ± 0.5	1.48σ	55%
$\nu\nu HH$	5.6 ± 0.04 (5.5)	7 ± 1.0	1.78σ	19%
$bbHH$	8.5 ± 0.10 (8.0)	22 ± 1.3	1.75σ	29%
$qqHH$	12.6 ± 0.1 (10.9)	55 ± 2.0	1.65σ	15%

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 ab^{-1} (*)	17%	27%
$\nu \nu$ HH @ 1 TeV	4 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?)

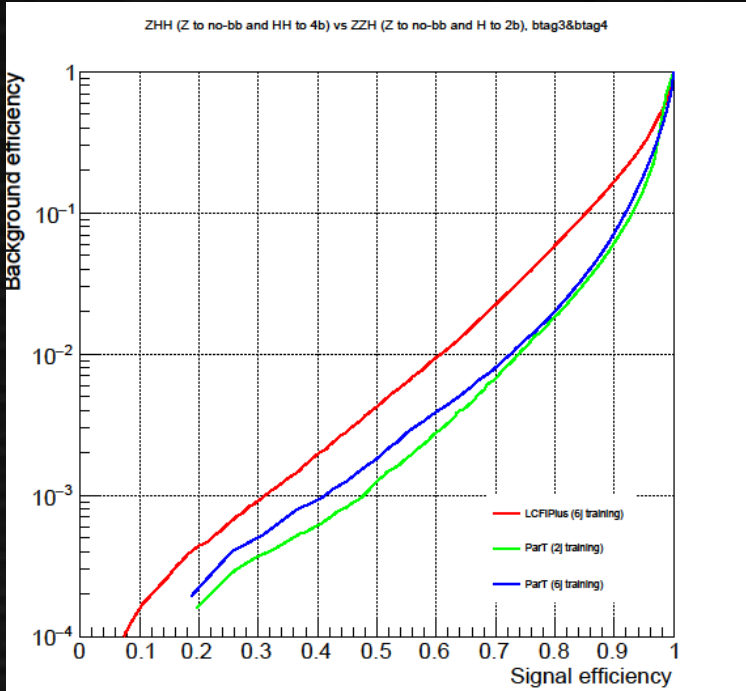
- 古いFlavor識別 (LCFIPlus)
- BDT-based analysis
- 干渉diagramの影響は Higgs mass分布を使って 低減している (青→赤の変換で考慮)

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 (こちらもDNNで改善?)

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	σ_e
$eeHH$	3.9 ± 0.03 (2.6)	7 ± 0.6	1.29σ
$\mu\mu HH$	5.1 ± 0.03 (2.8)	9 ± 0.5	1.48σ
$\nu\nu HH$	5.6 ± 0.04 (5.5)	7 ± 1.0	1.78σ
$bbHH$	8.5 ± 0.10 (8.0)	22 ± 1.3	1.75σ
$qqHH$	12.6 ± 0.1 (10.9)	55 ± 2.0	1.65σ

eff.
59%
55%
19%
29%
15%

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 → bbbb corresponding to an integrated luminosity of $\mathcal{L} = 2 \text{ ab}^{-1}$ and a beam polarisation of $P(e^+e^-) = (0.3, -0.8)$.

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

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

(SM structure: kappa like)

$$\eta_h = \delta\bar{\lambda} + \delta v - \frac{3}{2}c_H + c_6$$

$$\eta_W = 2\delta m_W - \delta v - \frac{1}{2}c_H$$

$$\eta_{WW} = 2\delta m_W - 2\delta v - c_H$$

$$\eta_Z = 2\delta m_Z - \delta v - \frac{1}{2}c_H - c_T$$

$$\eta_{ZZ} = 2\delta m_Z - 2\delta v - c_H - 5c_T$$

(Anomalous: new Lorentz structure)

$$\theta_h = c_H$$

$$\zeta_W = \delta Z_W = (8c_{WW})$$

$$\zeta_Z = \delta Z_Z = c_w^2(8c_{WW}) + 2s_w^2(8c_{WB}) + s_w^4/c_w^2(8c_{BB})$$

$$\zeta_A = \delta Z_A = s_w^2((8c_{WW}) - 2(8c_{WB}) + (8c_{BB}))$$

$$\zeta_{AZ} = \delta Z_{AZ} = s_w c_w((8c_{WW}) - (1 - \frac{s_w^2}{c_w^2})(8c_{WB}) - \frac{s_w^2}{c_w^2}(8c_{BB}))$$

- 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)