将来電子・陽電子コライダーの物理

愛甲　将司（都城工業高等専門学校）

LCWSプリスクール「将来電子・陽電子コライダーの物理と技術」（2026/11/08 東京）

独立行政法人国立高等専門学校機構
都城工業高等専門学校
National Institute of Technology(KOSEN), Miyakonojo College

講義の内容

・将来電子・陽電子コライダーはHiggs factory

・Higgsの精密測定によって、新物理に迫ることができる

Higgs factoryとは？

Higgs factory

1 language

Article Talk Read Edit View history

From Wikipedia, the free encyclopedia

A **Higgs factory** is a particle accelerator designed to produce Higgs bosons at a very high rate, allowing precision studies of this particle. A Higgs factory was identified as the highest future priority of particle physics in the 2020 European Strategy Report.[1] This view was reaffirmed in 2022 by the International Committee on Future Accelerators.[2]

The Higgs boson, discovered in 2012, was the final missing particle of the Standard Model of particle physics. However, unexplained phenomena such as dark matter lead physicists to think that the Standard Model is an incomplete theory and that new particles may exist. Physicists can search for evidence of new particles in two ways. The first is through direct production, which requires sufficient energy, high production rate, and sensitive detector design. Alternatively, the search can focus on careful measurements of properties of known particles, like the Higgs, that may be affected by interactions with the new particles that are not directly observed. This second approach is the goal of a Higgs factory.[3]

Two potential linear accelerator designs for a Higgs factory are the International Linear Collider (ILC) proposed in Japan at present and the Compact Linear Collider (CLIC) at CERN. Because the Higgs boson has a relatively light mass of 125 GeV, circular electron-positron collider designs can be applied for the construction of a Higgs factory as well. Two circular designs under consideration are the Future Circular Collider (FCC-ee) at CERN and the Circular Electron Positron Collider (CEPC) in China.[4]

See also [edit]

- B-factory
- Neutrino Factory

Higgs factory

Higgs factory

1 language

Article Talk Read Edit View history

From Wikipedia, the free encyclopedia

A **Higgs factory** is a particle accelerator designed to produce Higgs bosons at a very high rate, allowing precision studies of this particle. A Higgs factory was identified as the highest future priority of particle physics in the 2020 European Strategy Report.[1] This view was reaffirmed in 2022 by the International Committee on Future Accelerators.[2]

The Higgs boson, discovered in 2012, was the final missing particle of the Standard Model of particle physics. However, unexplained phenomena such as dark matter lead physicists to think that the Standard Model is an incomplete theory and that new particles may exist. Physicists can search for evidence of new particles in two ways. The first is through direct production, which requires sufficient energy, high production rate, and sensitive detector design. Alternatively, the search can focus on careful measurements of properties of known particles, like the Higgs, that may be affected by interactions with the new particles that are not directly observed. This second approach is the goal of a Higgs factory.[3]

Two potential linear accelerator designs for a Higgs factory are the International Linear Collider (ILC) proposed in Japan at present and the Compact Linear Collider (CLIC) at CERN. Because the Higgs boson has a relatively light mass of 125 GeV, circular electron-positron collider designs can be applied for the construction of a Higgs factory as well. Two circular designs under consideration are the Future Circular Collider (FCC-ee) at CERN and the Circular Electron Positron Collider (CEPC) in China.[4]

See also [edit]

- B-factory
- Neutrino Factory

ヒッグス粒子を大量生成し、精密測定を行う

高エネルギー物理の優先課題に位置付けられている。

Higgs factory

Higgs factory

1 language

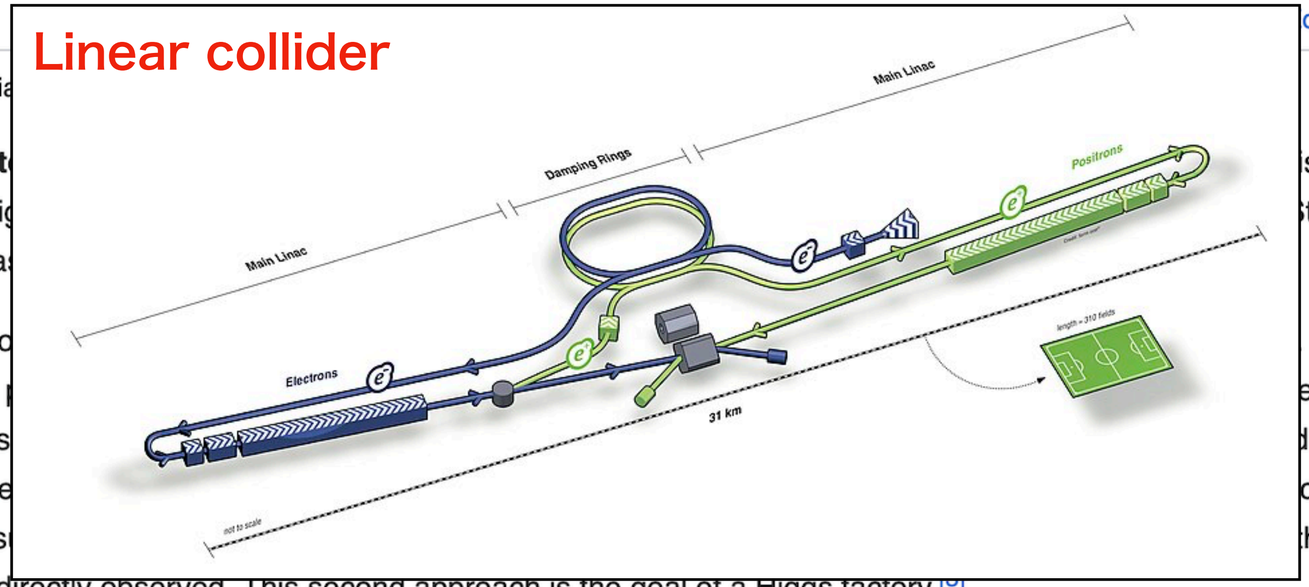
Article Talk dit View history

From Wikipedia

A **Higgs fact** ision studies of this particle. A Hig Strategy Report.[1] This view wa

The Higgs bo However, unexplained p e theory and that new particles direct production, which require can focus on careful meas h the new particles that are not directly observed. This second approach is the goal of a Higgs factory.[2]

Linear collider



Two potential linear accelerator designs for a Higgs factory are the International Linear Collider (ILC) proposed in Japan at present and the Compact Linear Collider (CLIC) at CERN. Because the Higgs boson has a relatively light mass of 125 GeV, circular electron-positron collider designs can be applied for the construction of a Higgs factory as well. Two circular designs under consideration are the Future Circular Collider (FCC-ee) at CERN and the Circular Electron Positron Collider (CEPC) in China.[4]

See also [edit]

- B-factory
- Neutrino Factory

ヒッグス粒子を大量生成し、
精密測定を行う

高エネルギー物理の優先課題
に位置付けられている。

線形加速器の候補
ILC（日本）CLIC（CERN）

Higgs factory

Higgs factory

1 language

Article Talk dit View history

From Wikipedia

A **Higgs fact** ision studies of this particle. A Hig
This view wa

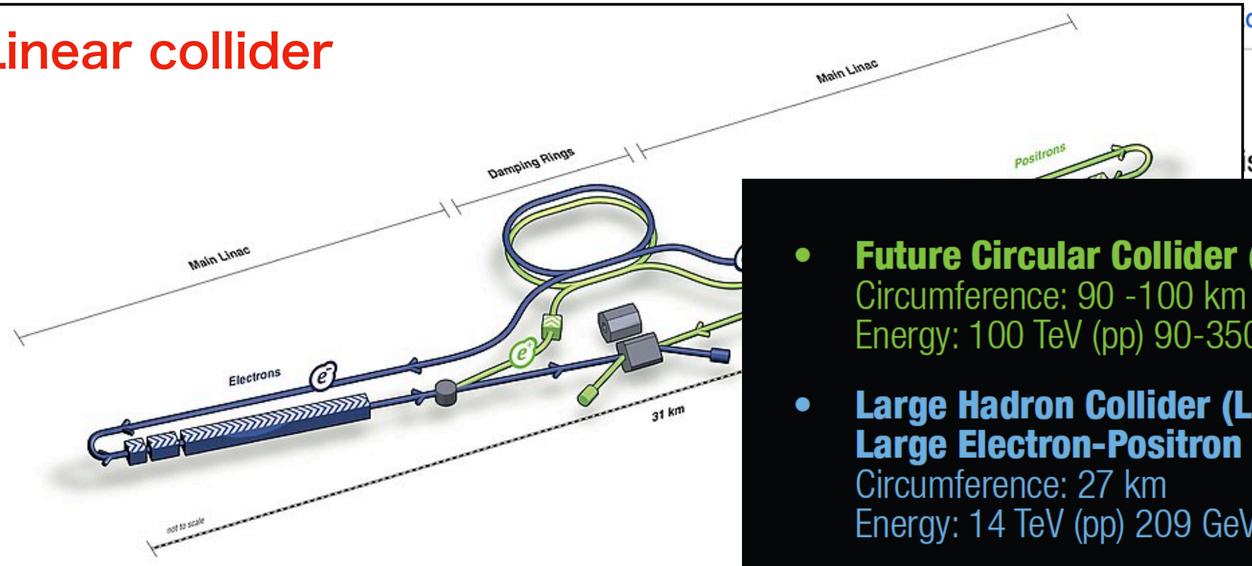
The Higgs bo
unexplained
new particles
which require
careful meas
that are not directly observed. This second approach is the goal of a Hig

Two potential linear accelerator designs for a Higgs factory are the Inter present and the Compact Linear Collider (CLIC) at CERN. Because the circular electron-positron collider designs can be applied for the construction of a Higgs factory as well. Two circular designs under consideration are the Future Circular Collider (FCC-ee) at CERN and the Circular Electron Positron Collider (CEPC) in China.[4]

See also [edit]

- B-factory
- Neutrino Factory

Linear collider



- **Future Circular Collider (FCC)**
  Circumference: 90 -100 km
  Energy: 100 TeV (pp) 90-350 GeV (e^+e^-)
- **Large Hadron Collider (LHC)**
  Large Electron-Positron Collider (LEP)
  Circumference: 27 km
  Energy: 14 TeV (pp) 209 GeV (e^+e^-)
- **Tevatron**
  Circumference: 6.2 km
  Energy: 2 TeV ($p\bar{p}$)

Circular collider

ヒッグス粒子を大量生成し、
精密測定を行う

円形加速器の候補
FCC-ee（CERN）CEPC（中国）

Higgs factory

Higgs factory

1 language

Article Talk dit View history

From Wikipedia

A **Higgs fact** ision studies of this particle. A Hig
This view was

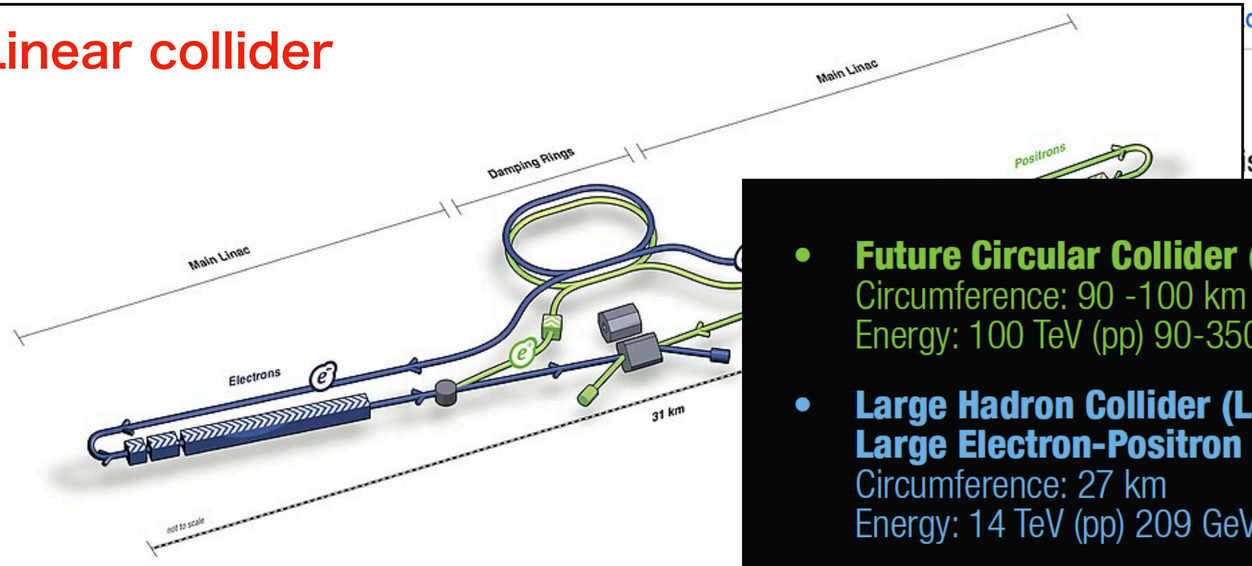
The Higgs bo
unexplained p
new particles
which require
careful meas
that are not directly observed. This second approach is the goal of a Hig

Two potential linear accelerator designs for a Higgs factory are the Inter present and the Compact Linear Collider (CLIC) at CERN. Because the circular electron-positron collider designs can be applied for the construction of a Higgs factory as well. Two circular designs under consideration are the Future Circular Collider (FCC-ee) at CERN and the Circular Electron Positron Collider (CEPC) in China.[4]

See also [edit]

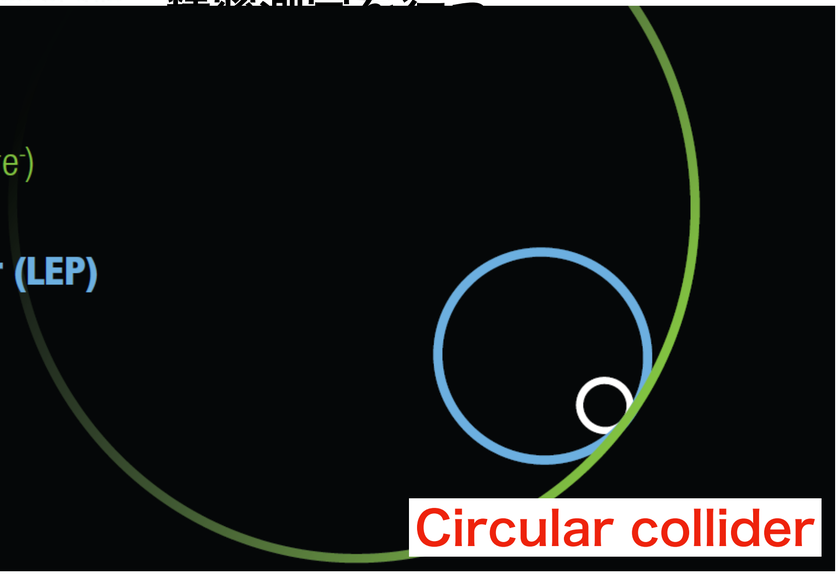
- B-factory
- Neutrino Factory

Linear collider



ヒッグス粒子を大量生成し、
精密測定を行う

- **Future Circular Collider (FCC)**
  Circumference: 90 -100 km
  Energy: 100 TeV (pp) 90-350 GeV (e^+e^-)
- **Large Hadron Collider (LHC)**
  Large Electron-Positron Collider (LEP)
  Circumference: 27 km
  Energy: 14 TeV (pp) 209 GeV (e^+e^-)
- **Tevatron**
  Circumference: 6.2 km
  Energy: 2 TeV ($p\bar{p}$)



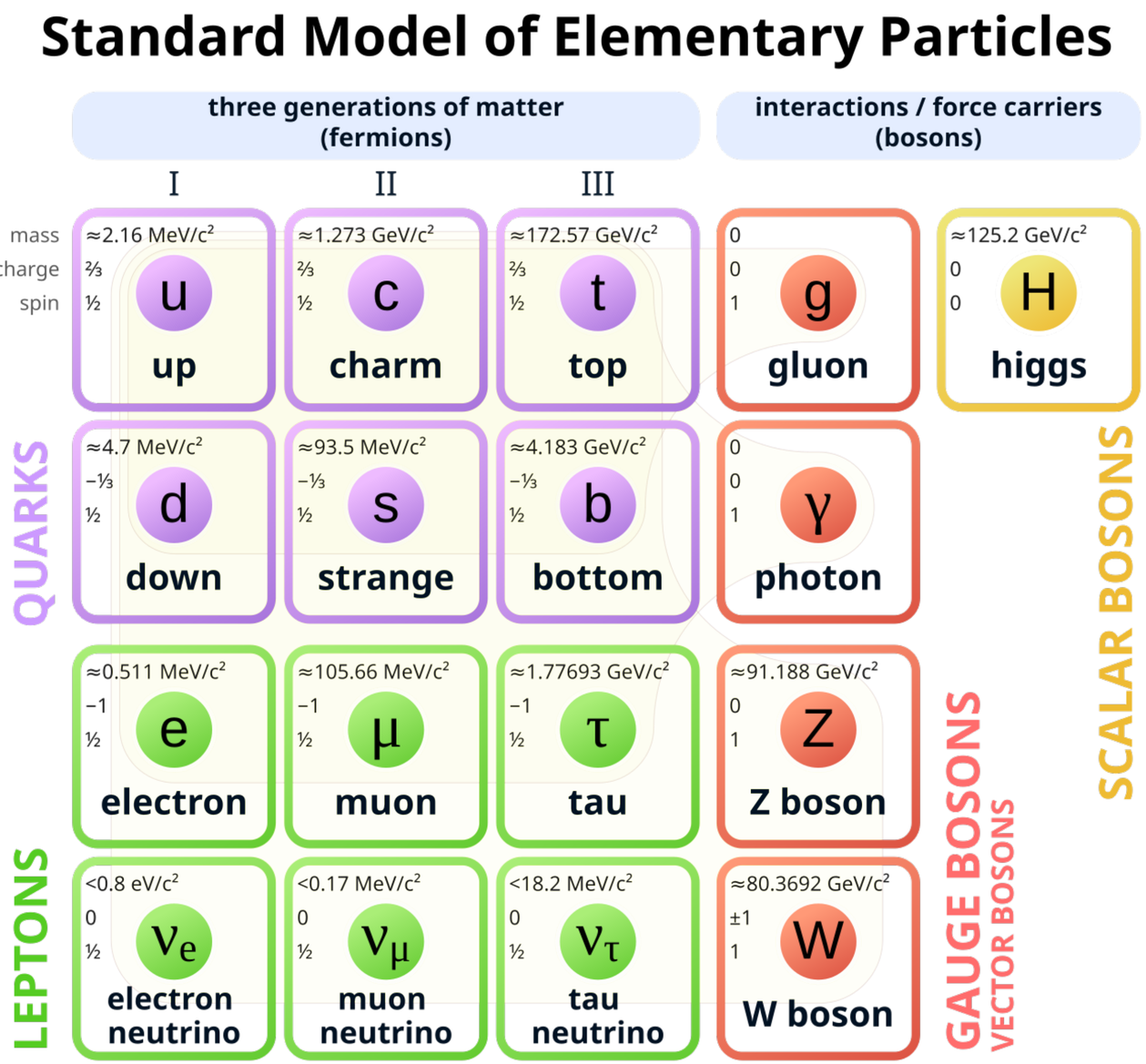
Circular collider

円形加速器の候補
FCC-ee（CERN）CEPC（中国）

次世代加速器 = Higgs factory

なぜヒッグス精密測定？

素粒子の標準理論



理論の2つの柱

- ゲージ原理
- 自発的対称性の破れ（ヒッグス機構）

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + i\psi_i y_{ij}\psi_j\phi + h.c. + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

- ヒッグス粒子の発見で標準理論が確立
- 現在までの各種実験データと無矛盾

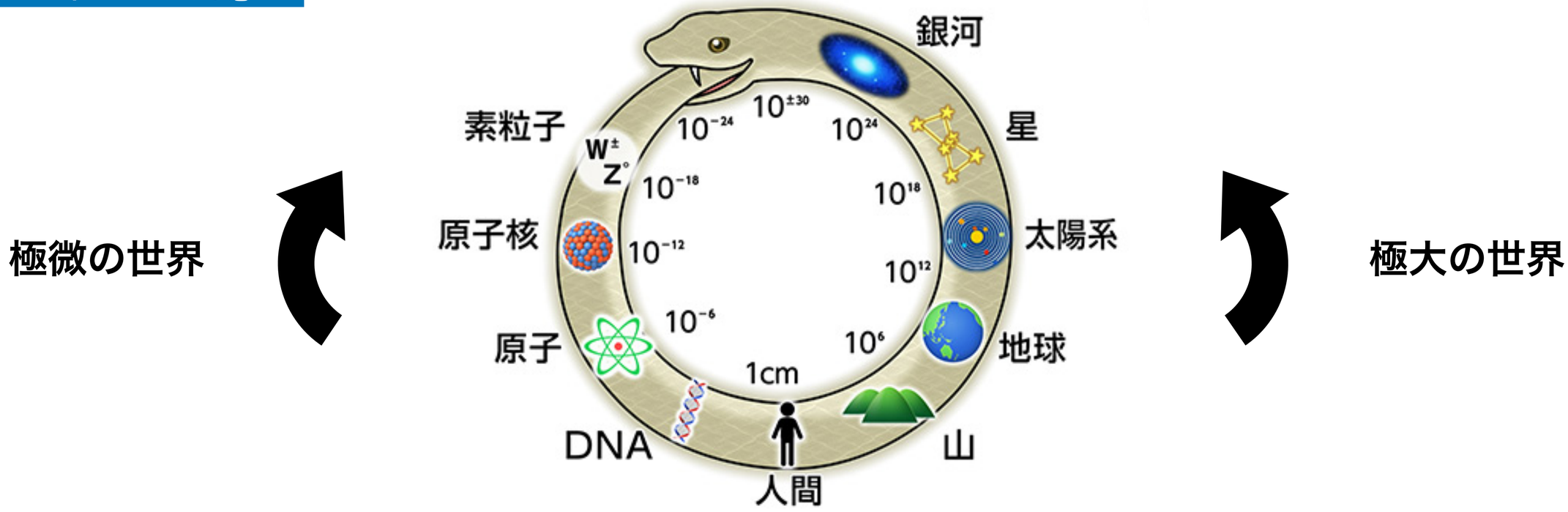
宇宙の標準理論

ビッグバン宇宙論

宇宙は高温の火の玉から始まった。誕生後すぐは、物質は素粒子レベルでバラバラに飛び交っている。したがって、宇宙（マクロ）の進化は素粒子（ミクロ）の物理によって決まる。

ウロボロスの蛇

Glashow's Cosmic Uroboros



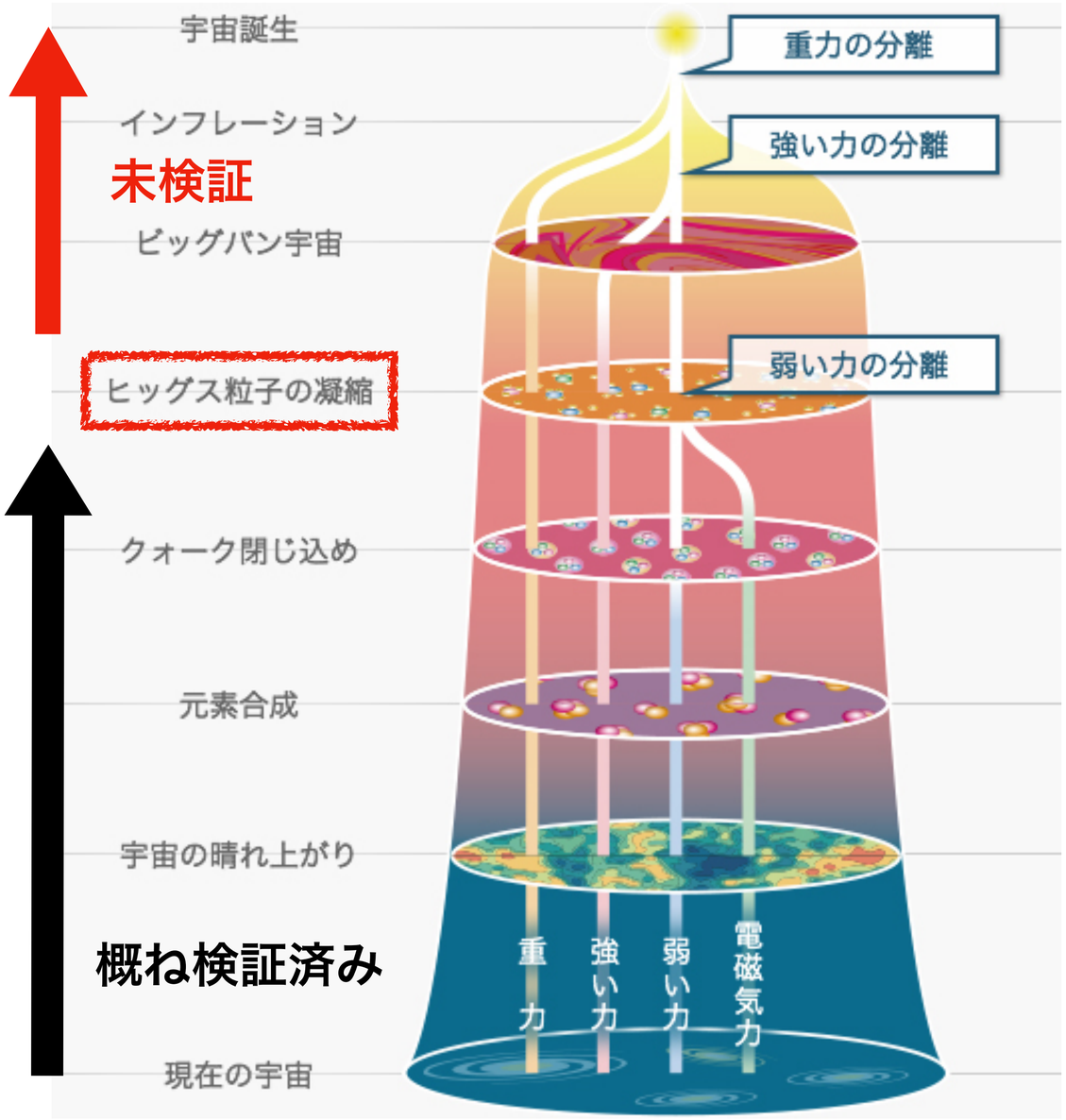
標準理論（ミクロ）が完全に正しいと仮定して、宇宙の進化（マクロ）を計算するとどうなるか？

標準理論の問題点

標準理論では、残念ながら（幸運なことに？）
我々の宇宙を再現できない。

- 暗黒物質が存在しない。
- 物質過剰な宇宙が作れない。
- ニュートリノ質量が説明できない、等々

我々の宇宙を説明するためには、標準理論は拡張されなければならない。



https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/elementaryparticle/beyond.html

新物理のスケールはどこ？

- 超対称性（最小超対称標準模型, MSSM）
- 強結合ダイナミクスによる自発的対称性の破れ
（テクニカラー模型）
- 余剰次元模型

模型変数のチューニング（階層性問題）を避けるには
新物理のスケール（あるいは新粒子の質量スケール）
が 数100 GeV であることが望ましい。

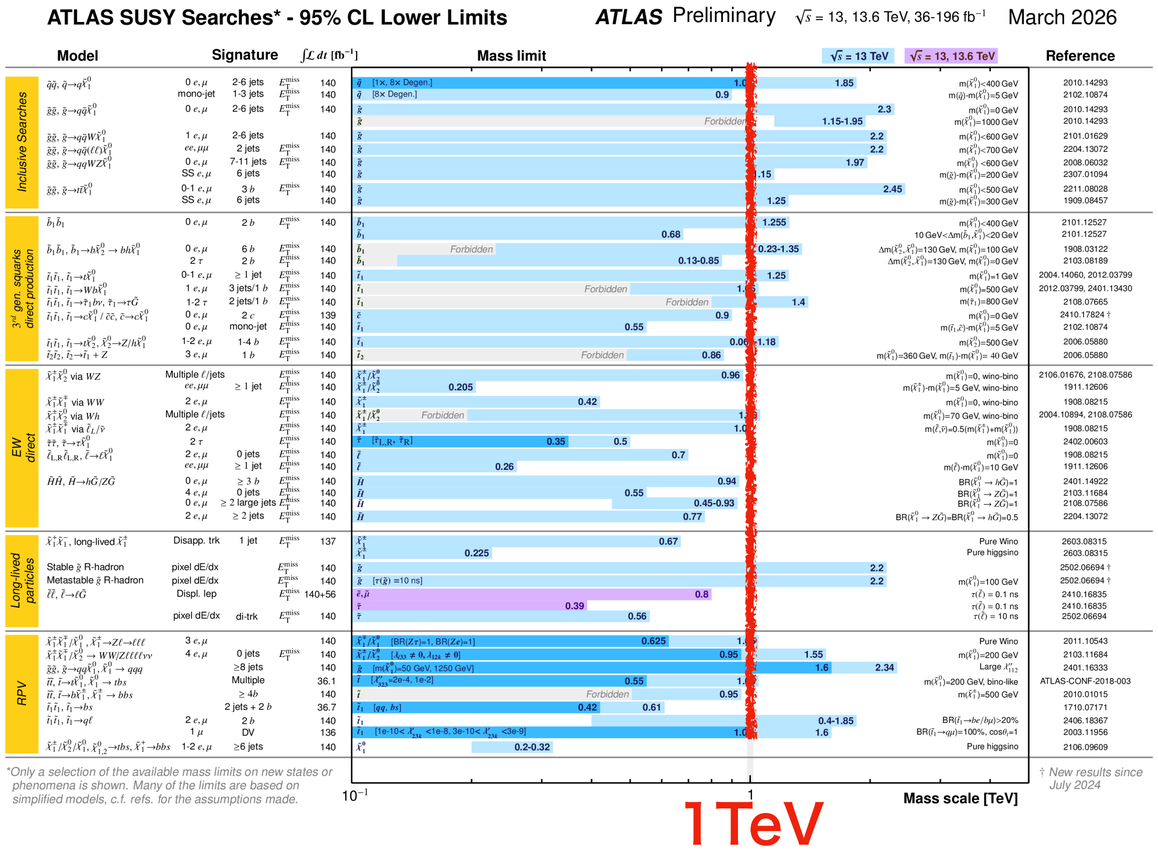
→ LHCで新粒子が見つかり、新物理の糸口が見える
だろう

新物理のスケールはどこ？

- 超対称性（最小超対称標準模型, MSSM）
- 強結合ダイナミクスによる自発的対称性の破れ（テクニカラー模型）
- 余剰次元模型

模型変数のチューニング（階層性問題）を避けるには新物理のスケール（あるいは新粒子の質量スケール）が 数100 GeV であることが望ましい。

→ LHCで新粒子が見つかり、新物理の糸口が見えるだろう



これらの模型に現れる新粒子の兆候は、今のところLHCで見つかっていない。

では、どう攻めるか？

歴史をふりかえる

1975年：タウ粒子の発見　　$m_\tau = 1.8\ \mathrm{GeV}$

1977年：ボトムクォークの発見　　$m_b = 4.2\ \mathrm{GeV}$

『当時（1980年前後）殆どの人がトップクォークの質量は数10 GeV/c^2程度で、CDF以前に発見されるだろうと考えていた』　トップクォークの発見（近藤都登）

歴史をふりかえる

1975年：タウ粒子の発見　　$m_\tau = 1.8\ \mathrm{GeV}$

1977年：ボトムクォークの発見　　$m_b = 4.2\ \mathrm{GeV}$

『当時（1980年前後）殆どの人がトップクォークの質量は数10 GeV/c^2程度で、CDF以前に発見されるだろうと考えていた』　トップクォークの発見（近藤都登）

PETRA, トリスタン, $\mathrm{S}p\bar{p}\mathrm{S}$, LEPで探すも見つからず。

1995年にTevatronで最終的に発見された。

この間、約20年どのような研究が行われていたか？

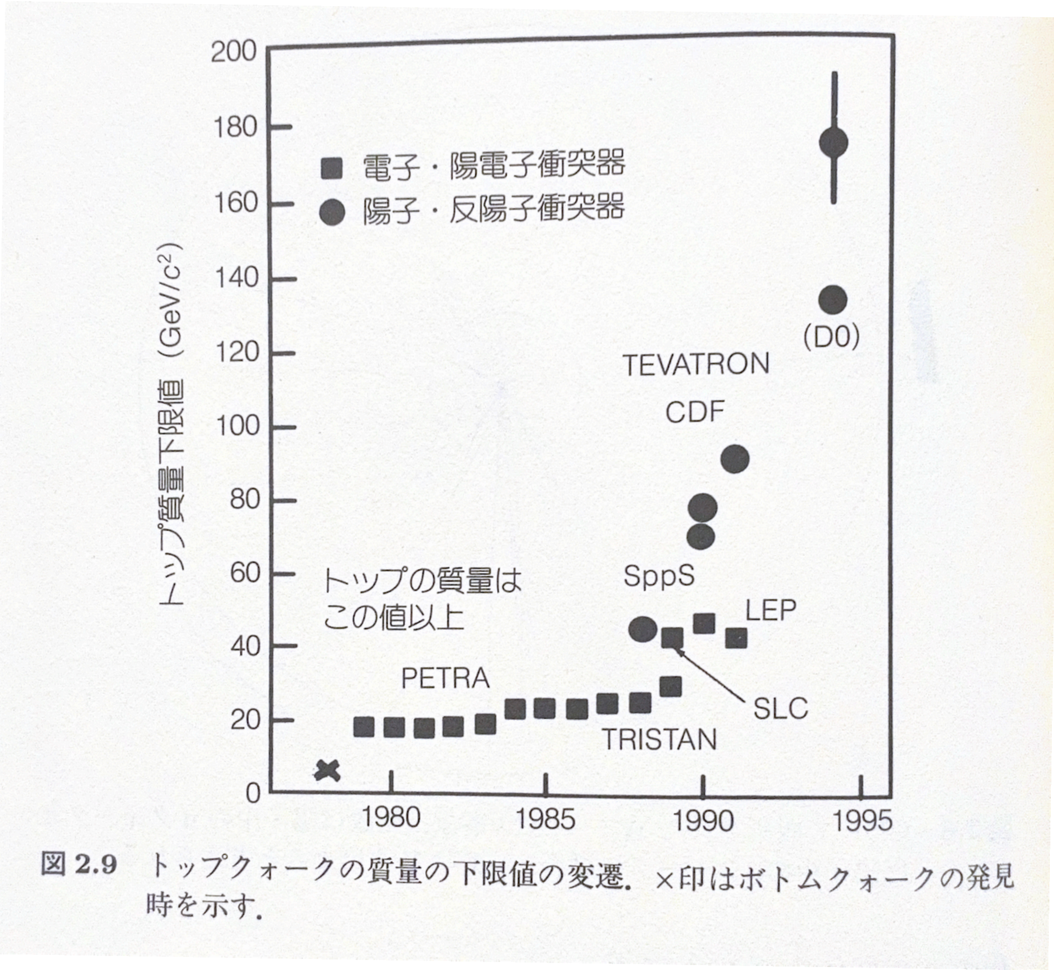
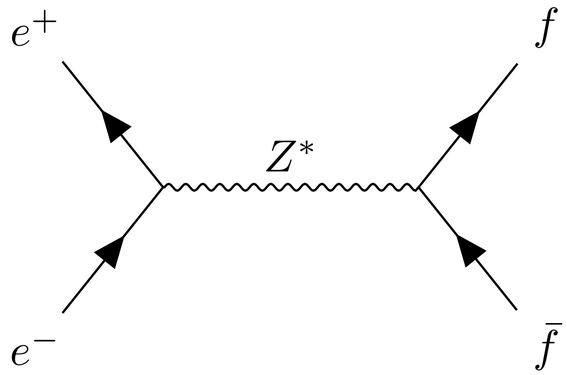


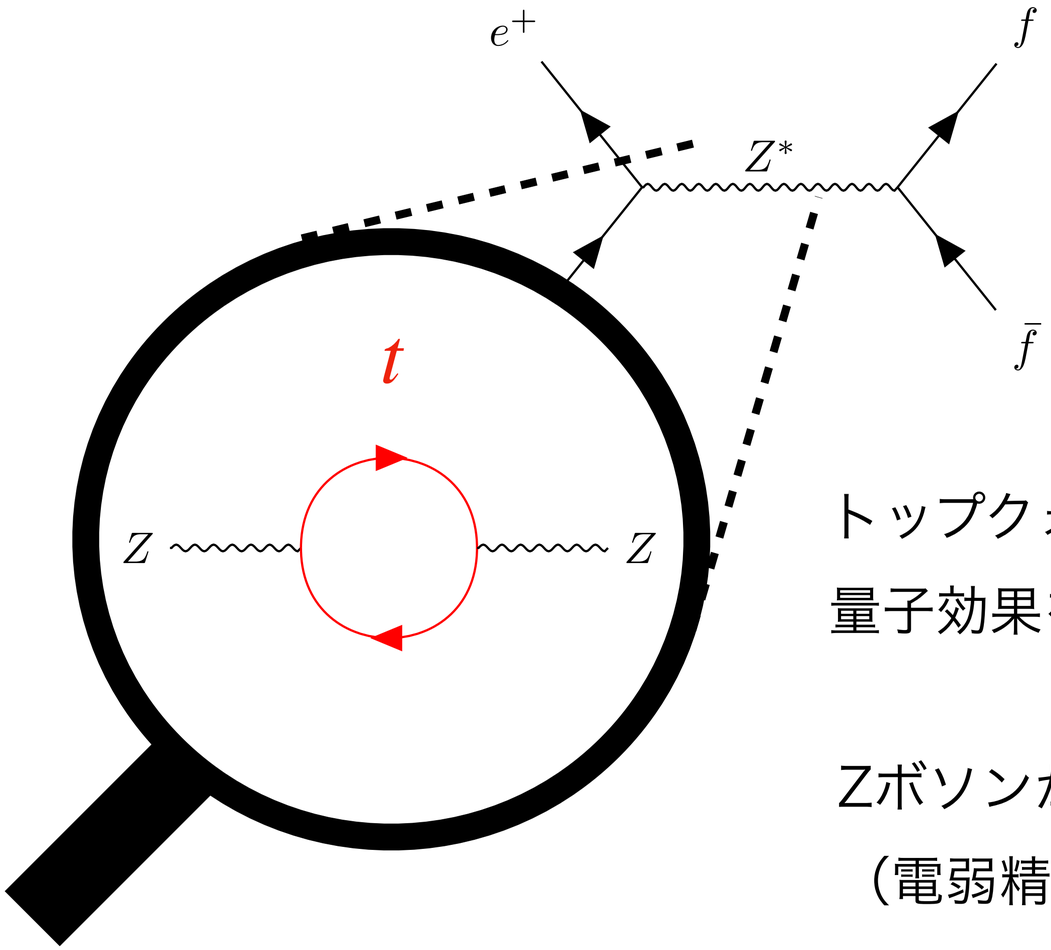
図 2.9　トップクォークの質量の下限値の変遷．×印はボトムクォークの発見時を示す．

重い粒子の痕跡は、量子効果を通じて弱ゲージボソンの物理に現れる。 M. Veltman, NPB123 (1977)



電弱精密測定とトップクォーク質量

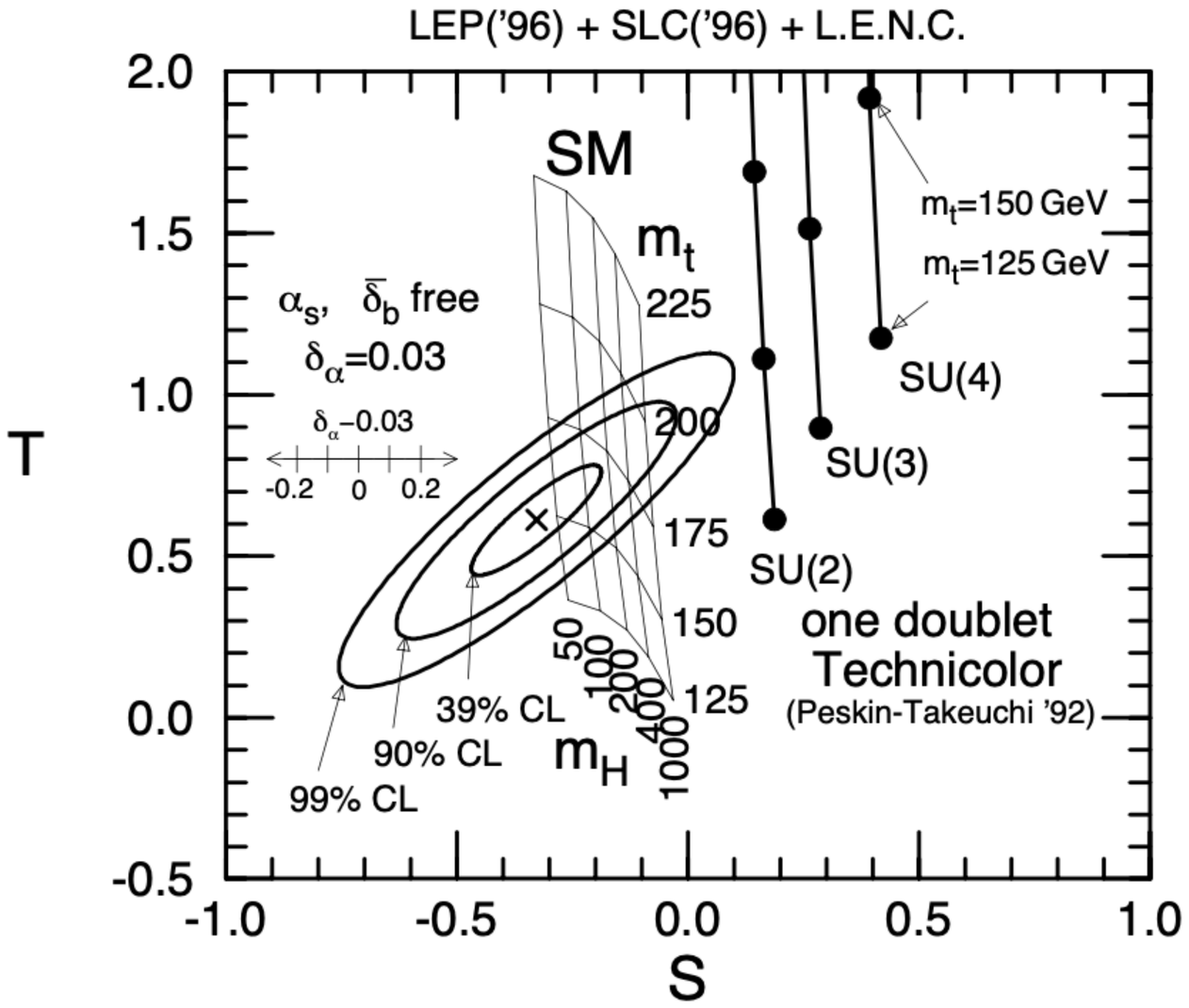
重い粒子の痕跡は、量子効果を通じて弱ゲージボソンの物理に現れる。 M. Veltman, NPB123 (1977)



トップクォークを直接生成できなくても、
量子効果を通じて痕跡を掴むことができる。

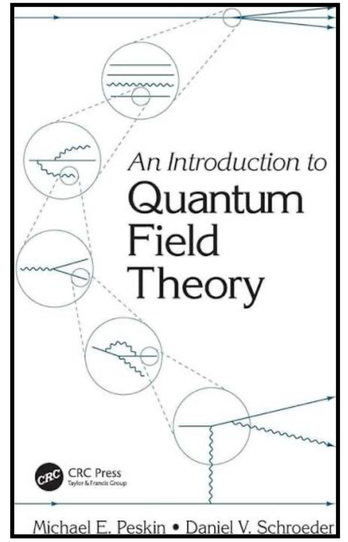
Zボソンが発見された後、その精密測定
（電弱精密測定）が行われた（Z factory）。

電弱精密測定とトップクォーク質量

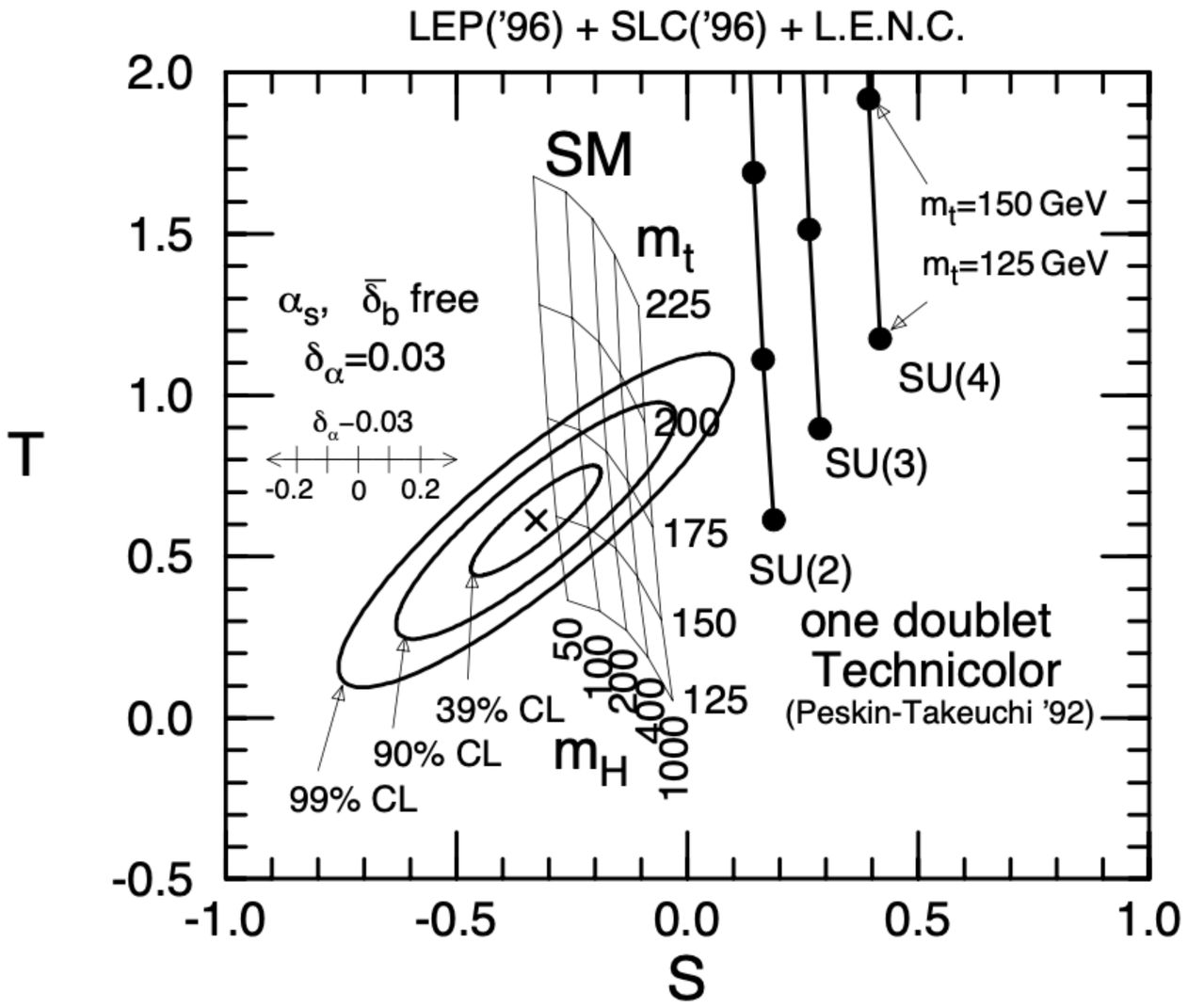


Hagiwara et al, EPJC2 (1998)

新粒子の量子効果はS, Tの2変数で特徴付けることができる。 Peskin, Takeuchi, PRD46 (1992)



電弱精密測定とトップクォーク質量



Hagiwara et al, EPJC2 (1998)

新粒子の量子効果はS, Tの2変数で特徴付けることができる。 Peskin, Takeuchi, PRD46 (1992)

- トップクォークの質量の制限

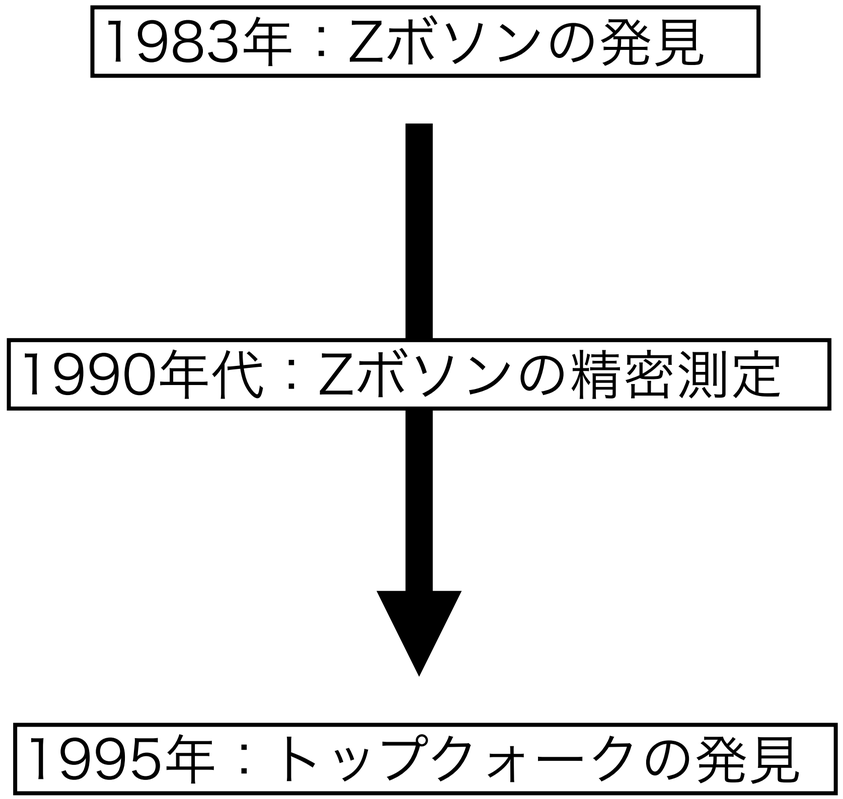
$$150\ \mathrm{GeV} \lesssim m_t \lesssim 200\ \mathrm{GeV}$$

$m_t = 172\ \mathrm{GeV}$ と無矛盾

- 新物理模型に対する制限

  シンプルなテクニカラー模型を棄却

Z factory から Higgs factory へ



Z factory から Higgs factory へ

1983年：Zボソンの発見

1990年代：Zボソンの精密測定

1995年：トップクォークの発見

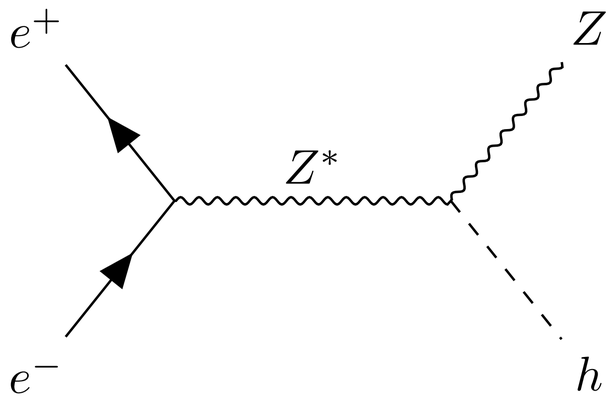
2012年：ヒッグス粒子の発見

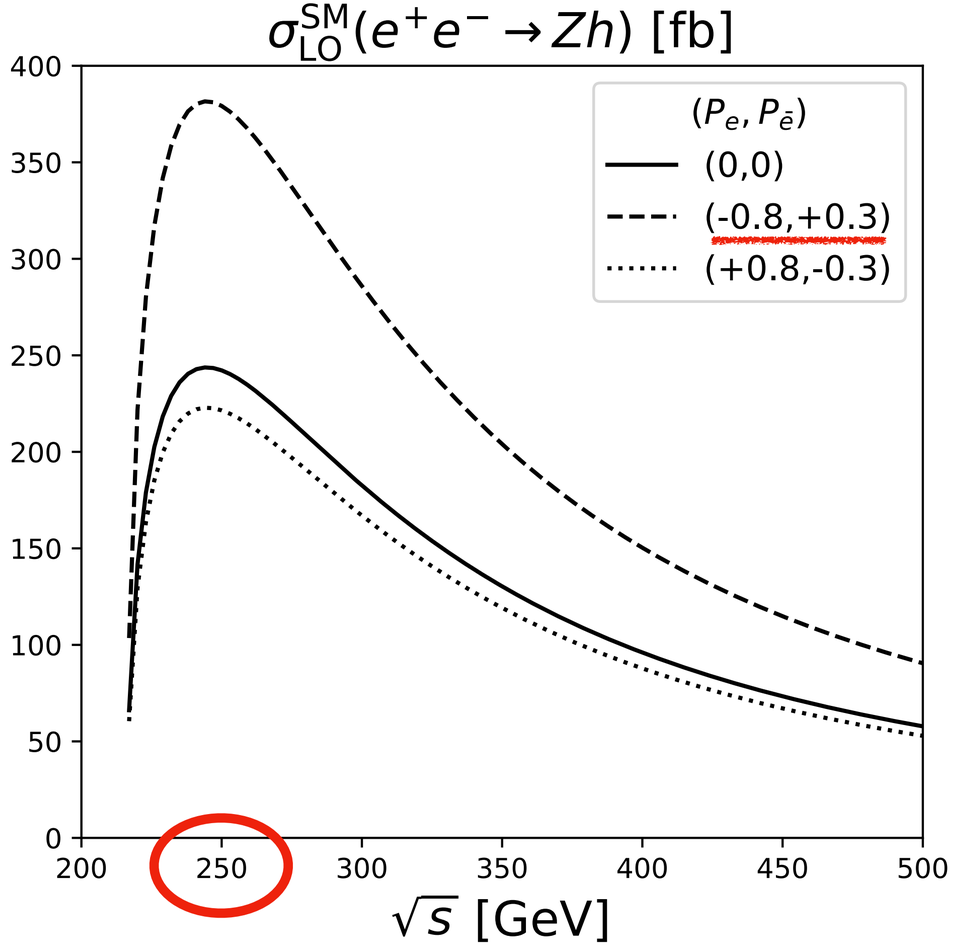
2030年代？：ヒッグス粒子の精密測定

2050年代？：新粒子の発見と新物理の解明

ヒッグスファクトリー

電子・陽電子加速器でヒッグス粒子を大量生成する。



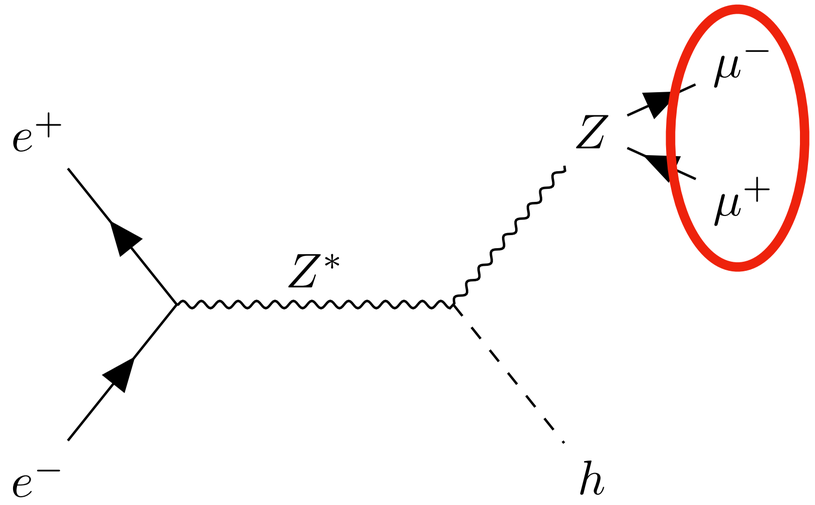


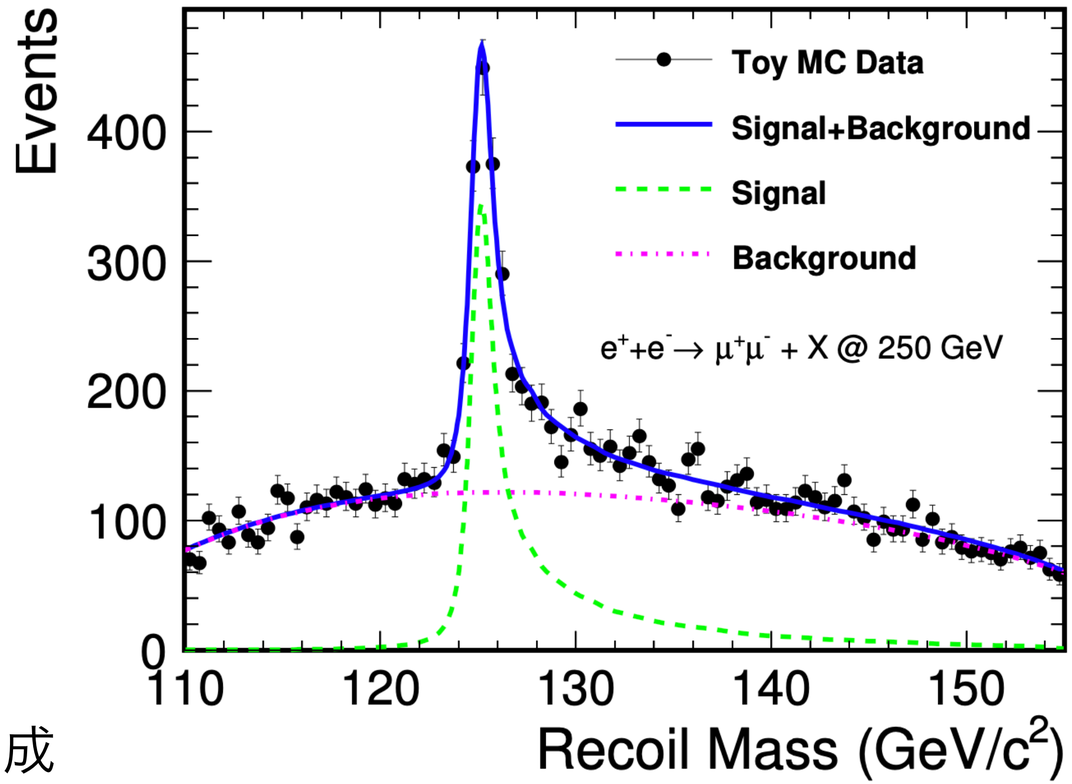
- $\sqrt{s} = 240 - 250$ GeVで散乱断面積が最大
- ビーム偏極を変えると散乱弾面積が変化する。

  Zボソンは左巻き電子と強く結合する

ヒッグスファクトリー

電子・陽電子加速器でヒッグス粒子を大量生成する。





・$\sqrt{s} = 240 - 250$ GeVで散乱断面積が最大

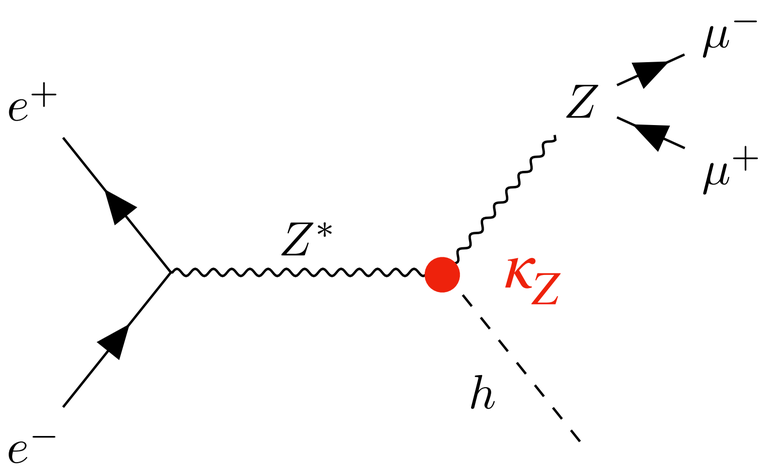
・ビーム偏極を変えると散乱弾面積が変化する。

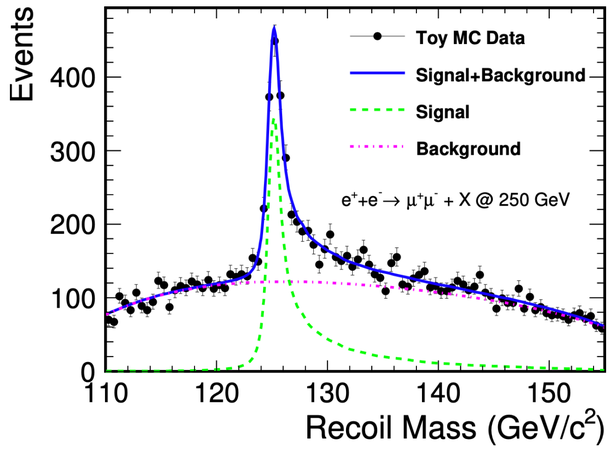
Zボソンは左巻き電子と強く結合する

・ヒッグス粒子を捉えることなく、ヒッグス粒子生成が確認できる → 散乱断面積を単独で測れる

$$M^2_{\mathrm{rec}} = (\sqrt{s} - E_{\mu^+\mu^-})^2 - \left|\vec{p}_{\mu^+\mu^-}\right|^2$$

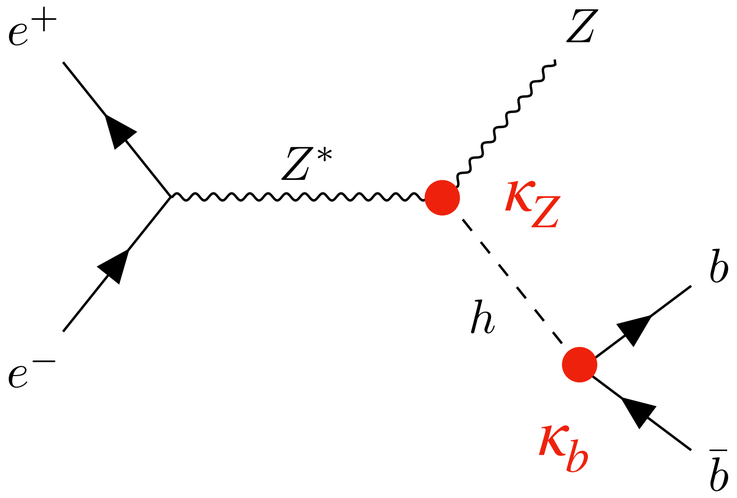
ヒッグス結合の精密測定





・生成断面積からZボソンとの結合が測れる。

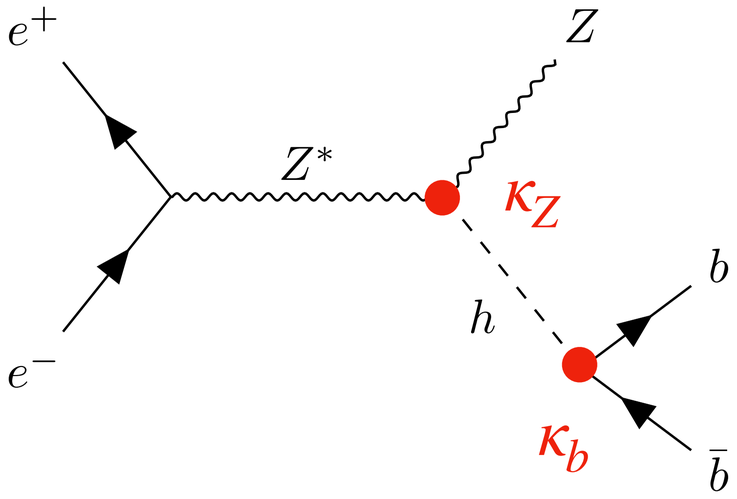
ヒッグス結合の精密測定



・生成断面積からZボソンとの結合が測れる。

・ヒッグス粒子の崩壊から W, b, τ 等との結合が測れる。

ヒッグス結合の精密測定

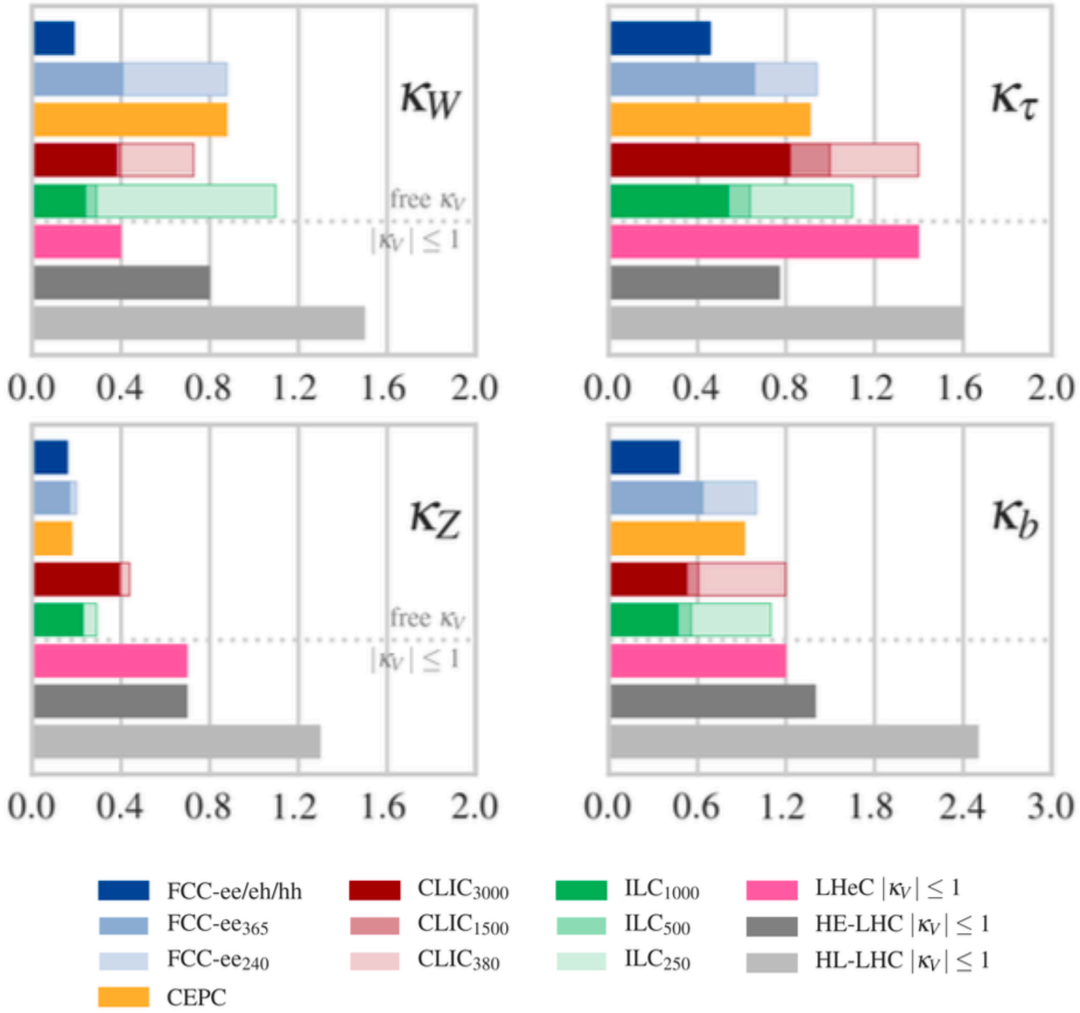


・生成断面積からZボソンとの結合が測れる。

・ヒッグス粒子の崩壊から W, b, τ 等との結合が測れる。

・測定精度は概ね1%以下

・Zボソンとの結合は0.4%以下で測れる。



Blas et al, JHEP01 (2020)

ヒッグス精密測定でなにが分かる？

ヒッグスセクターの構造を調べる

標準理論ではヒッグス二重項を一つだけ導入する。

- ヒッグスセクターを決定する指導原理がない
- 125 GeVヒッグスと矛盾しない拡張は様々な可能性が存在する

ヒッグスセクターの構造を調べる

標準理論ではヒッグス二重項を一つだけ導入する。

- ヒッグスセクターを決定する指導原理がない
- 125 GeVヒッグスと矛盾しない拡張は様々な可能性が存在する

標準理論の諸問題を解決する理論模型では、拡張ヒッグスセクターがしばしば現れる。

- 最小超対称標準模型：ヒッグス二重項を2つ含む Martin hep-ph/97709356, Djouadi PR459 (2008)
- Type-II シーソー模型：複素三重項ヒッグス場を含む Mohapatra, Senjanovic PRD23 (1981)
- スカラー暗黒物質模型：追加のヒッグス粒子が暗黒物質になる Silveira, Zee, PLB136 (1985) Barbieri, Hall, Rychkov, PRD74 (2006)

などなど

ヒッグスセクターの構造を調べる

標準理論ではヒッグス二重項を一つだけ導入する。

- ヒッグスセクターを決定する指導原理がない
- 125 GeVヒッグスと矛盾しない拡張は様々な可能性が存在する

標準理論の諸問題を解決する理論模型では、拡張ヒッグスセクターがしばしば現れる。

- 最小超対称標準模型：ヒッグス二重項を2つ含む Martin hep-ph/97709356, Djouadi PR459 (2008)
- Type-II シーソー模型：複素三重項ヒッグス場を含む Mohapatra, Senjanovic PRD23 (1981)
- スカラー暗黒物質模型：追加のヒッグス粒子が暗黒物質になる Silveira, Zee, PLB136 (1985); Barbieri, Hall, Rychkov, PRD74 (2006)

などなど

新粒子の質量 → 高エネルギーフロンティアで狙うエネルギースケール
ヒッグス場の多重項構造やフレーバー構造 → 新物理の方向性

ヒッグス結合のずれの大きさ

新粒子の兆候は、その質量が大きいほど小さくなる（デッカプリング定理）

Appelquist, Carazzone, PRD11 (1975)

ずれが見つかれば、新粒子の質量に上限が付く。

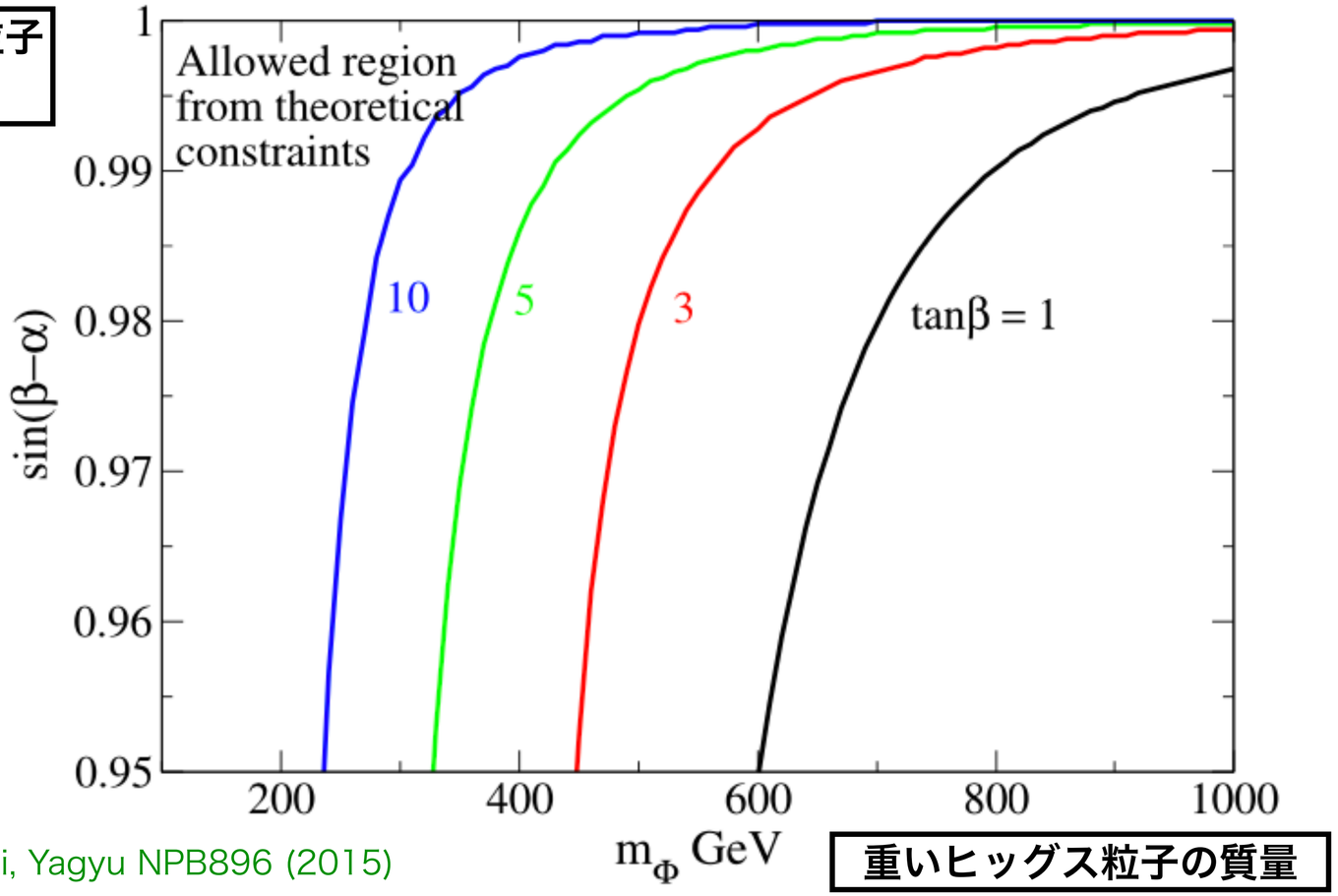
ヒッグス結合のずれの大きさ

新粒子の兆候は、その質量が大きいほど小さくなる（デッカプリング定理）

ずれが見つかれば、新粒子の質量に上限が付く。

Appelquist, Carazzone, PRD11 (1975)

ヒッグス粒子と弱ゲージ粒子との結合のずれ



Kanemura, Kikuchi, Yagyu NPB896 (2015)

重いヒッグス粒子の質量

ヒッグス結合のずれの大きさ

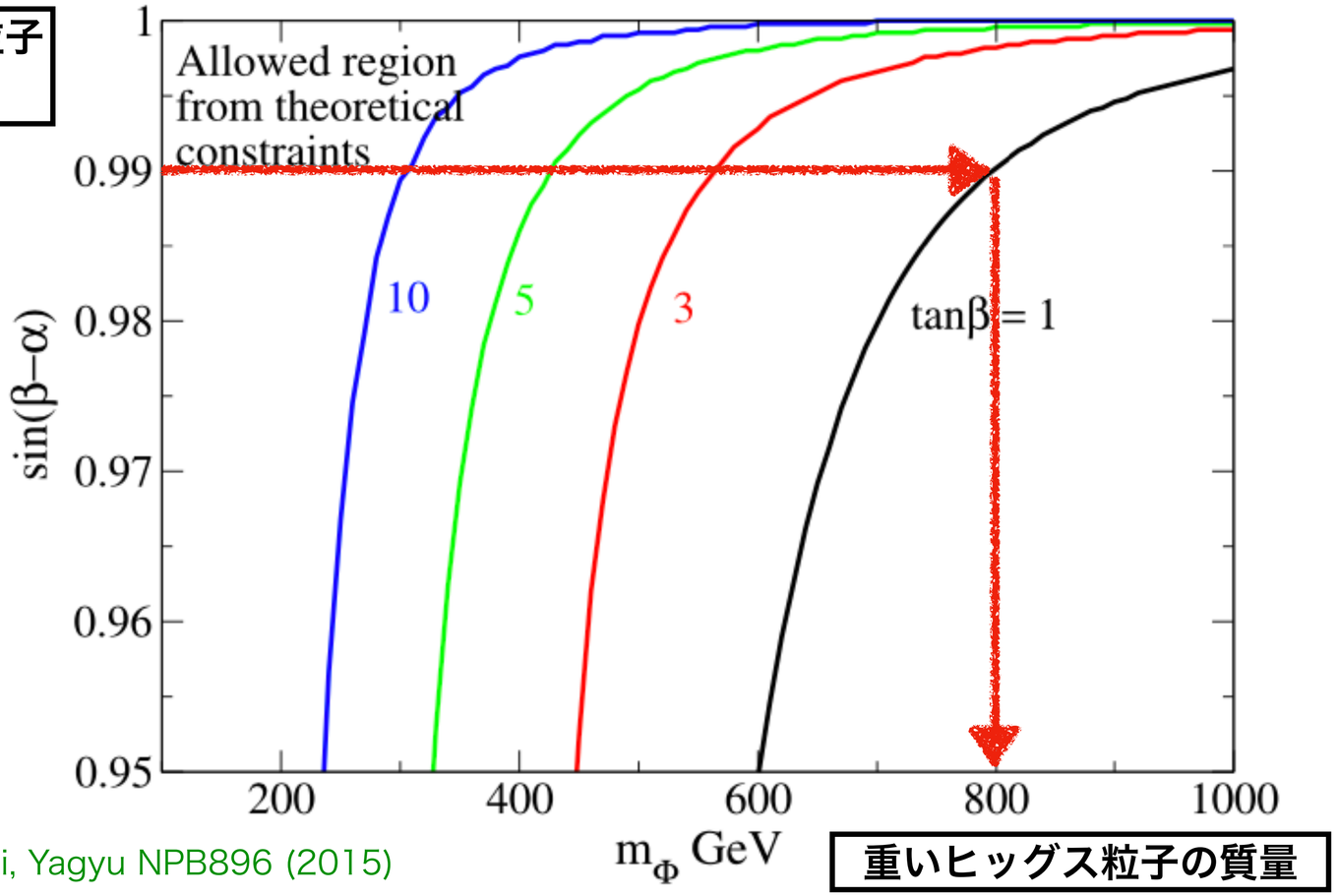
新粒子の兆候は、その質量が大きいほど小さくなる（デッカプリング定理）

ずれが見つかれば、新粒子の質量に上限が付く。

Appelquist, Carazzone, PRD11 (1975)

ヒッグス粒子と弱ゲージ粒子との結合のずれ

1%のずれが
見つかった場合



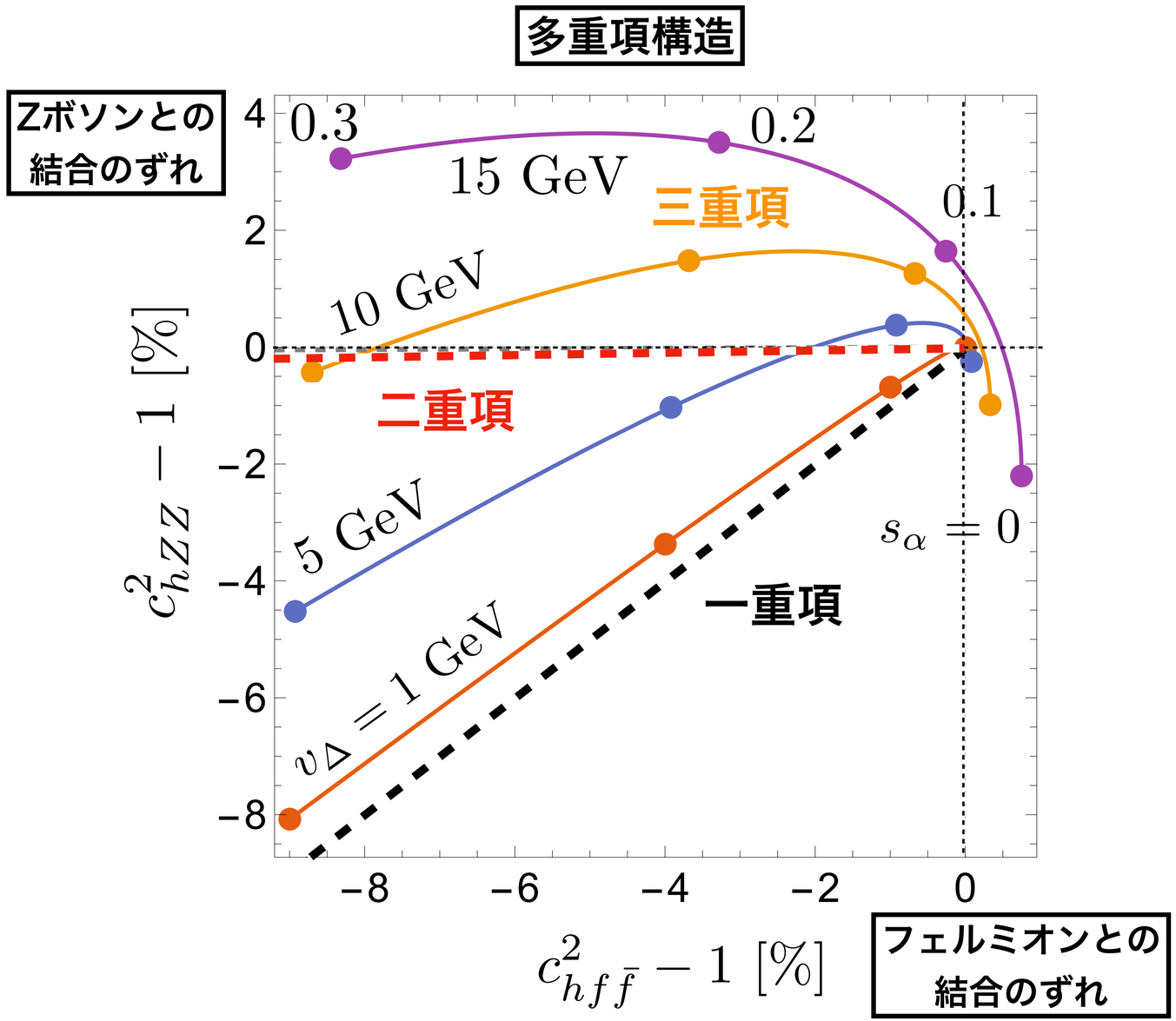
重いヒッグス粒子の質量

Kanemura, Kikuchi, Yagyu NPB896 (2015)

新粒子は 800 GeV
以下にいる！

模型の詳細にあまり依らない
参考：遠藤さんのスライド

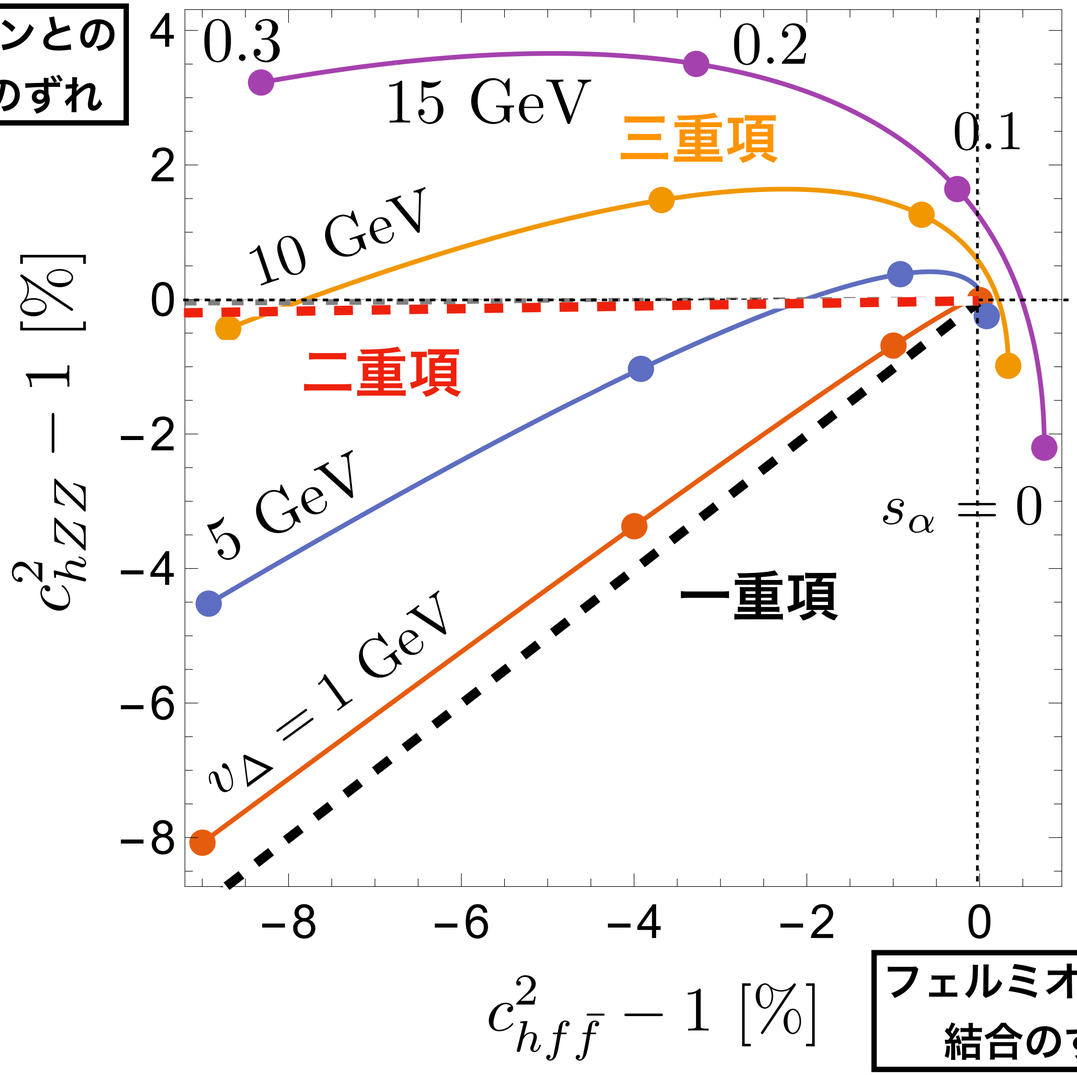
ヒッグス結合のずれの方向



ヒッグス結合のずれの方向

多重項構造

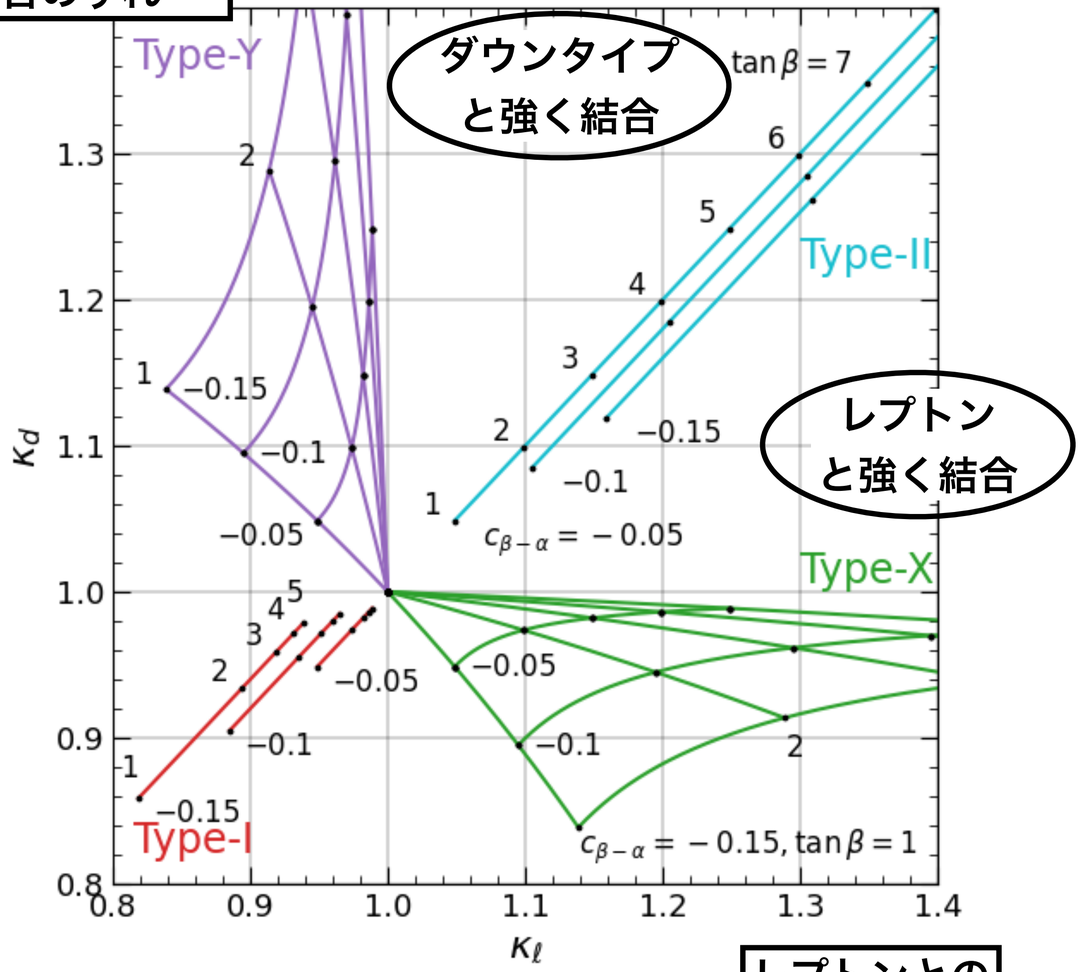
Zボソンとの結合のずれ



フェルミオンとの結合のずれ

ダウンタイプとの結合のずれ

フレーバー構造



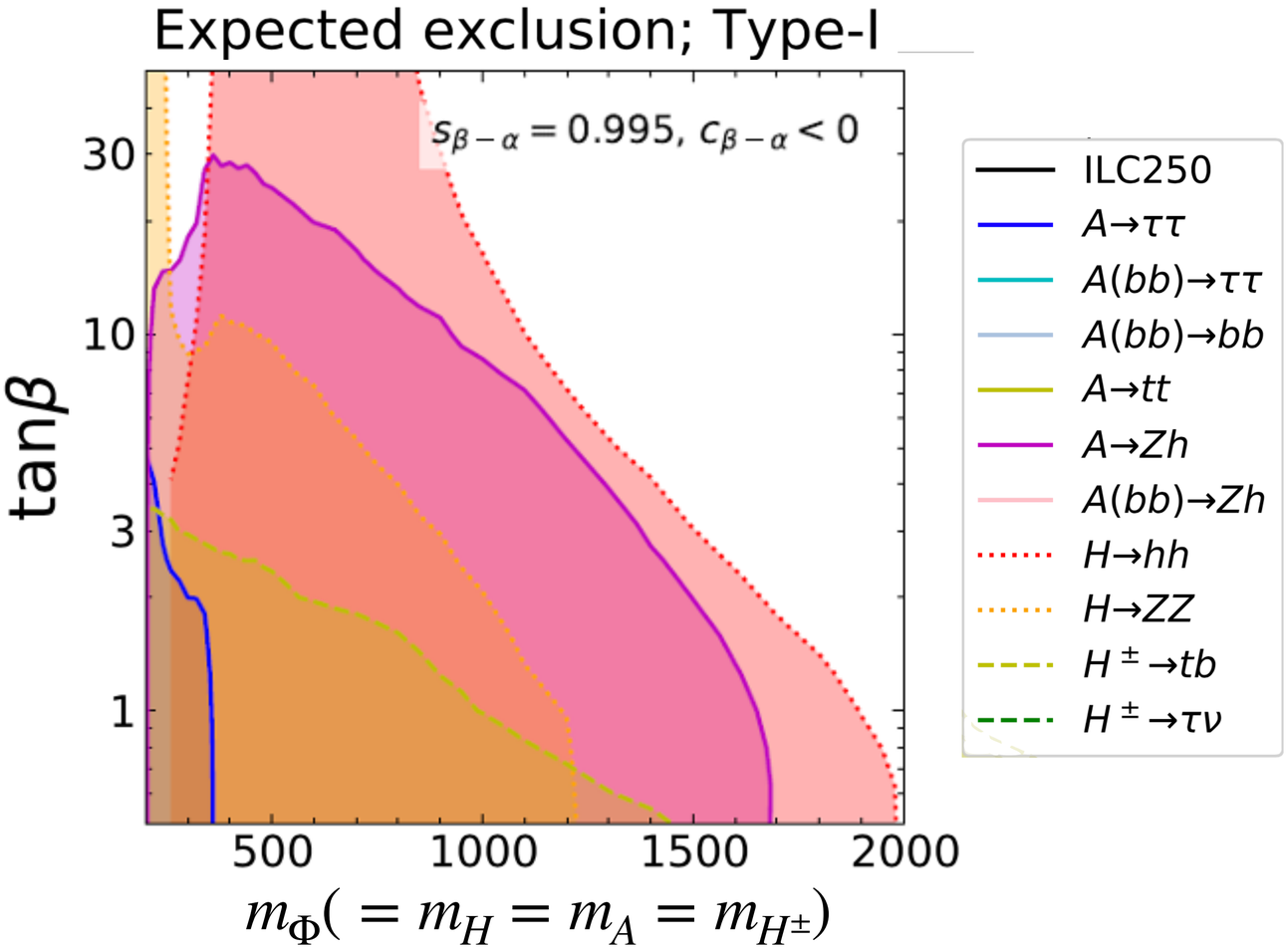
模型の詳細が大事

レプトンとの結合のずれ

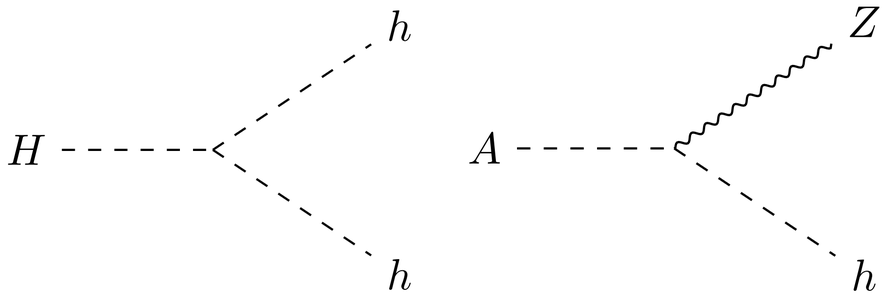
Kanemura, Tsumura, Yagyu, Yokoya, PRD90 (2014)

直接探索との相補性

MA, Kanemura, Kikuchi, Mawatari, Sakurai, Yagyu, NPB966 (2021)

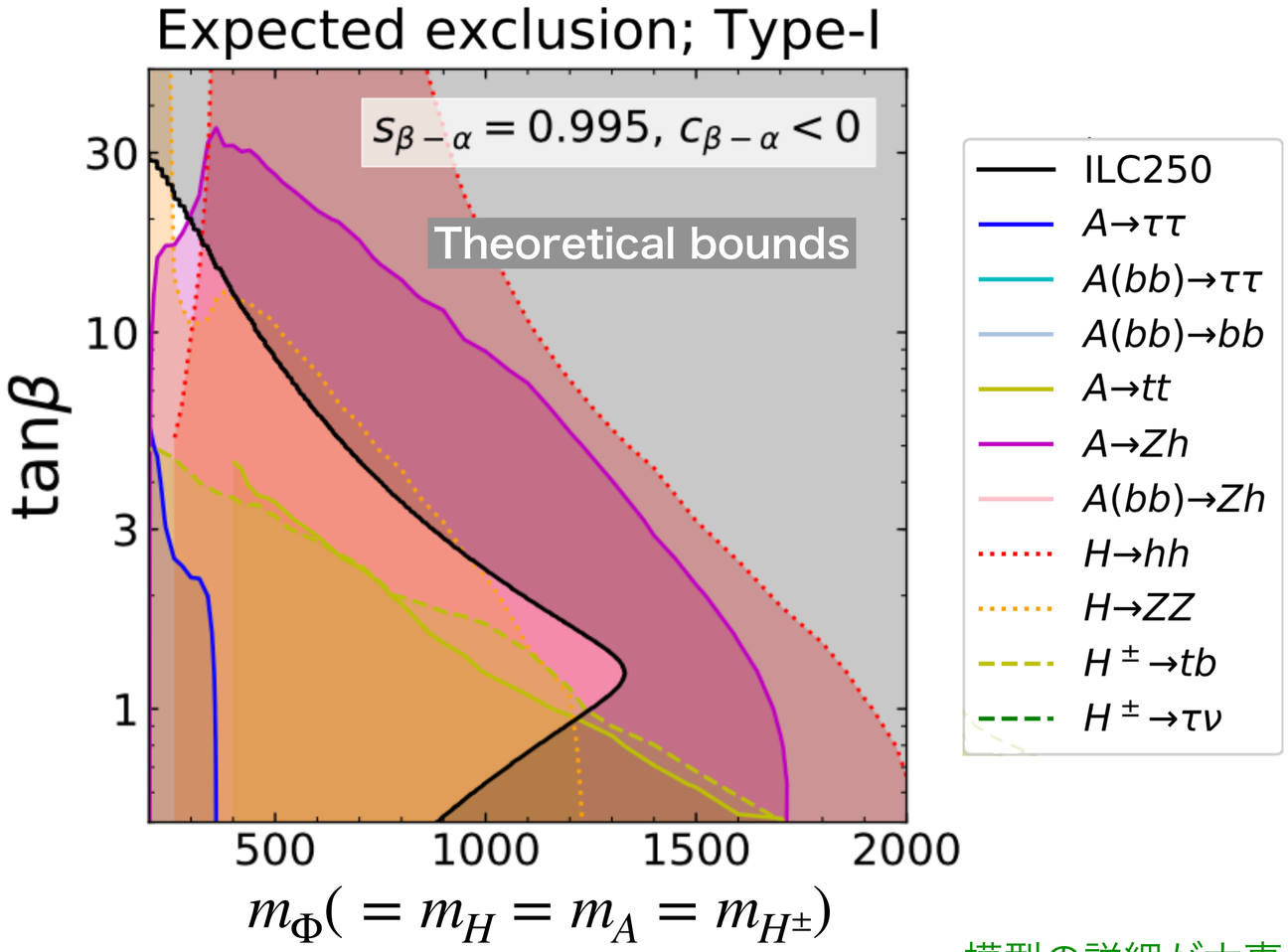


HL-LHCでは Higgs to Higgs decay が強力なプローブになる。



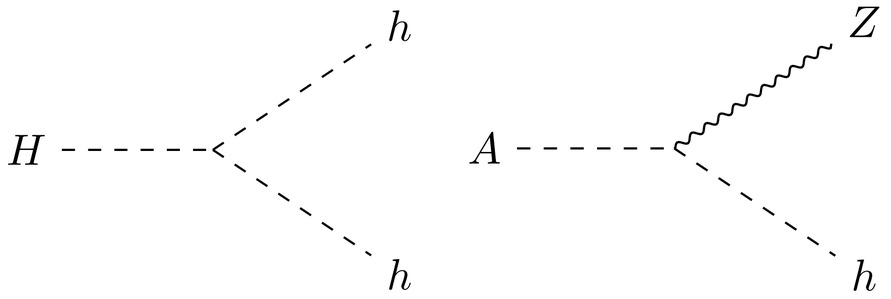
直接探索との相補性

MA, Kanemura, Kikuchi, Mawatari, Sakurai, Yagyu, NPB966 (2021)

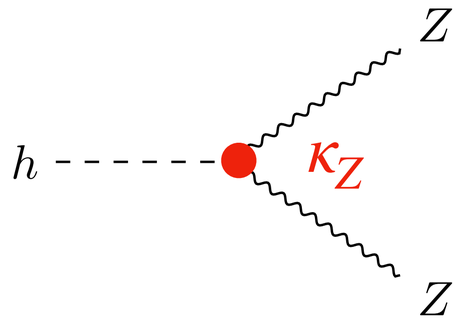


模型の詳細が大事

HL-LHCでは Higgs to Higgs decay が強力なプローブになる。

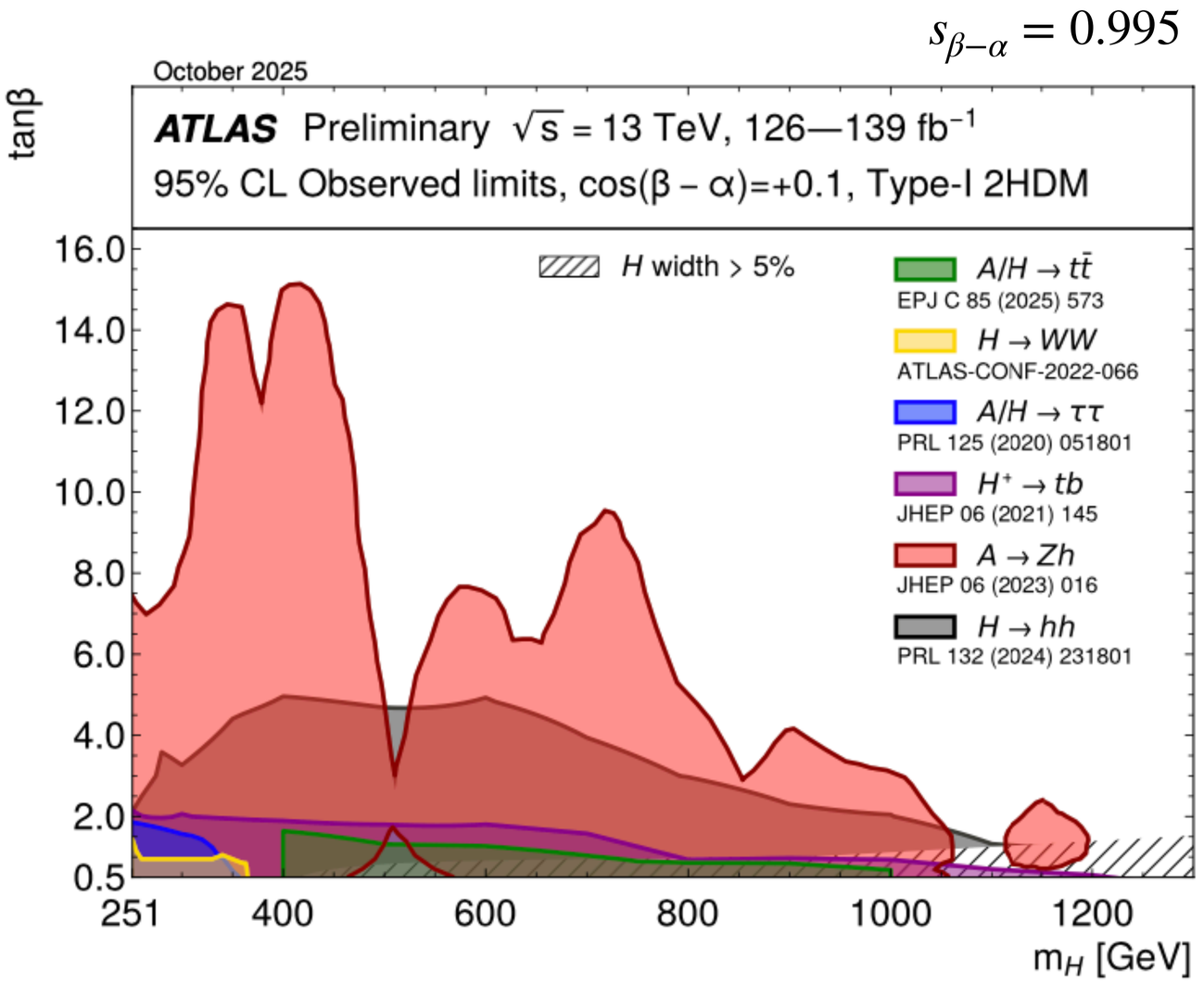


ヒッグス結合にずれが見つかれば、ほぼ全ての領域をカバーできる。



直接探索との相補性

ATL-PHYS-PUB-2025-042



Run2ですでに制限が付いている。Run3に期待。

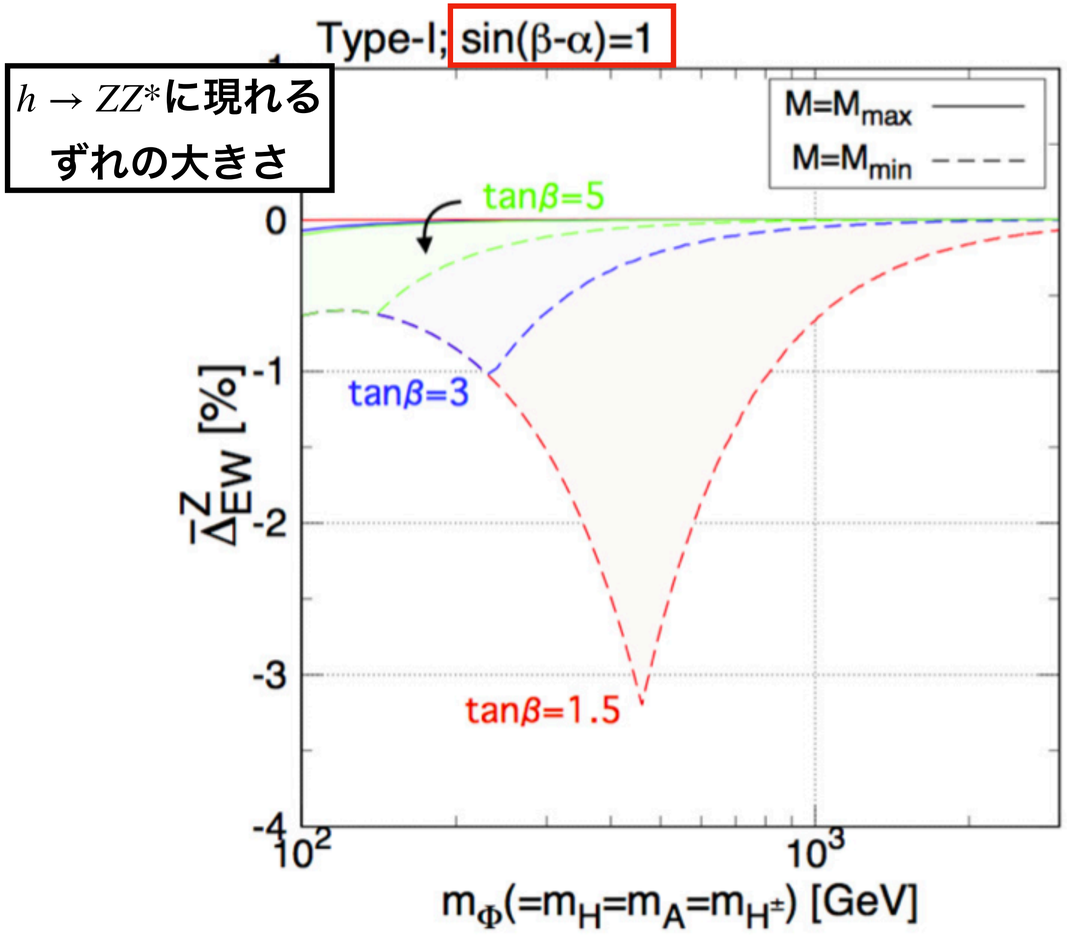
ヒッグス精密測定に向けて

高次補正の必要性

1%レベルの測定データと比較するときは、ツリーレベル（摂動の最低次）の計算では不十分

高次補正の必要性

1%レベルの測定データと比較するときは、ツリーレベル（摂動の最低次）の計算では不十分

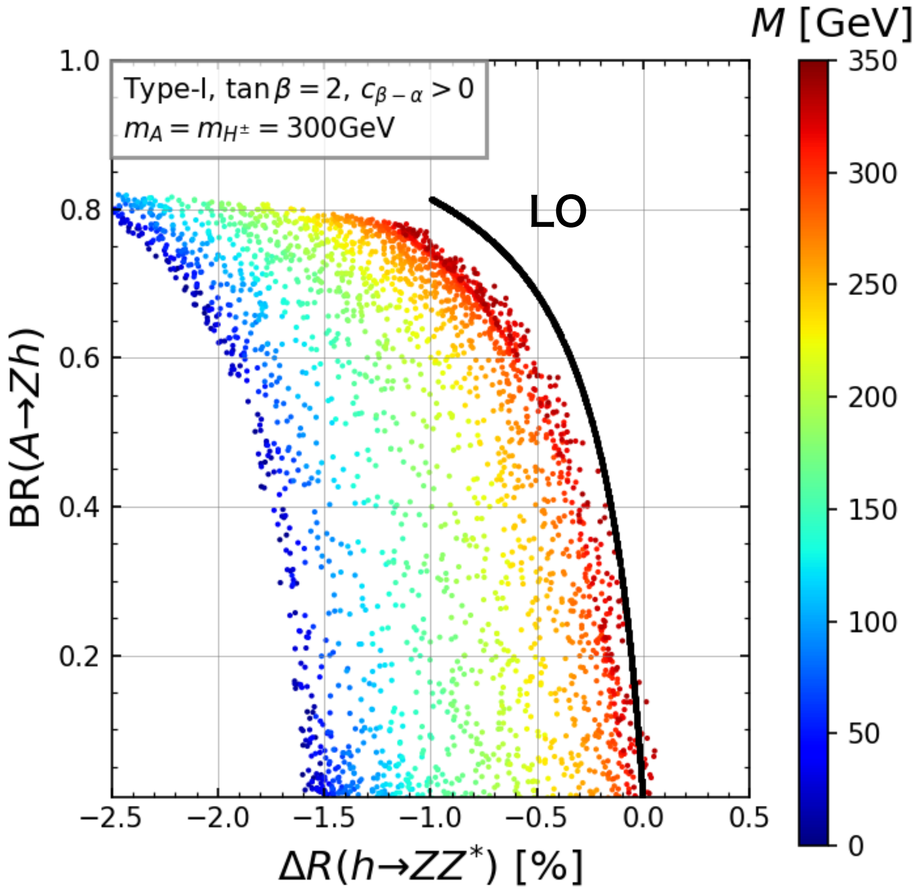


- ツリーレベルでずれが無いときでも、高次補正によって$\mathcal{O}(1\%)$のずれが生じる。

Kanemura, Kikuchi, Mawatari, Sakurai, Yagyu, PLB783 (2018)

高次補正の必要性

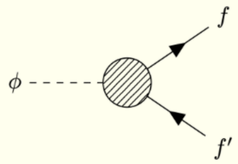
1%レベルの測定データと比較するときは、ツリーレベル（摂動の最低次）の計算では不十分

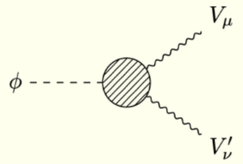


- ツリーレベルでずれが無いときでも、高次補正によって$\mathcal{O}(1\%)$のずれが生じる。
- Higgs to Higgs decayの予言も、高次補正によって変わりうる。
- Higgs factoryだけでなく、HL-LHCでの新物理探索においても、高次補正を含めた理論予言が必要。

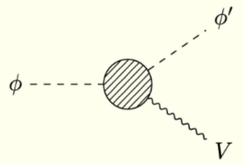
MA, Kanemura, Sakurai, NPB986 (2023)

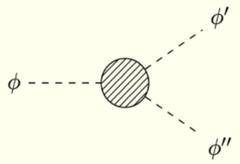
http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~hcoup/index.html



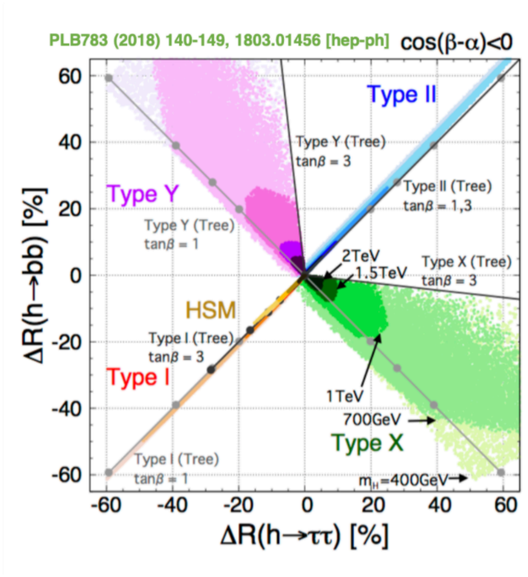


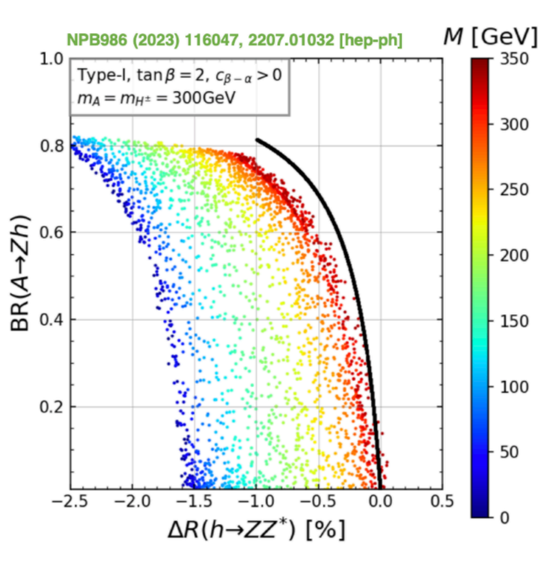
H-COUP





Home Publications Release History Old Versions Contact





SM-like Higgs boson
One can study the new physics effects in the SM-like Higgs boson decays with higher-order corrections by using H-COUP. Various extended Higgs models can be distinguished by comparing them on the same footing.

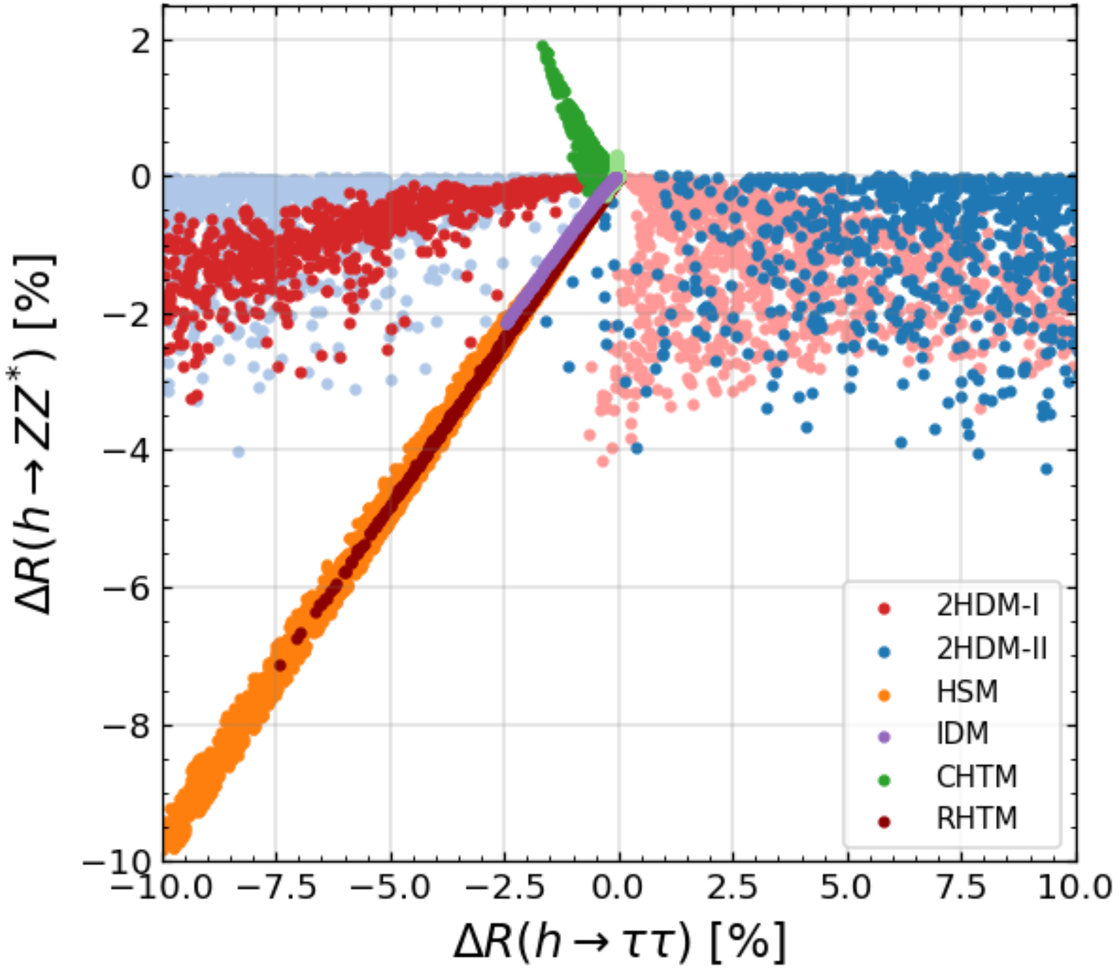
Additional Higgs bosons
H-COUP calculates decay rates of additional Higgs bosons with higher-order corrections. The correlation with the SM-like Higgs boson measurements can be studied.

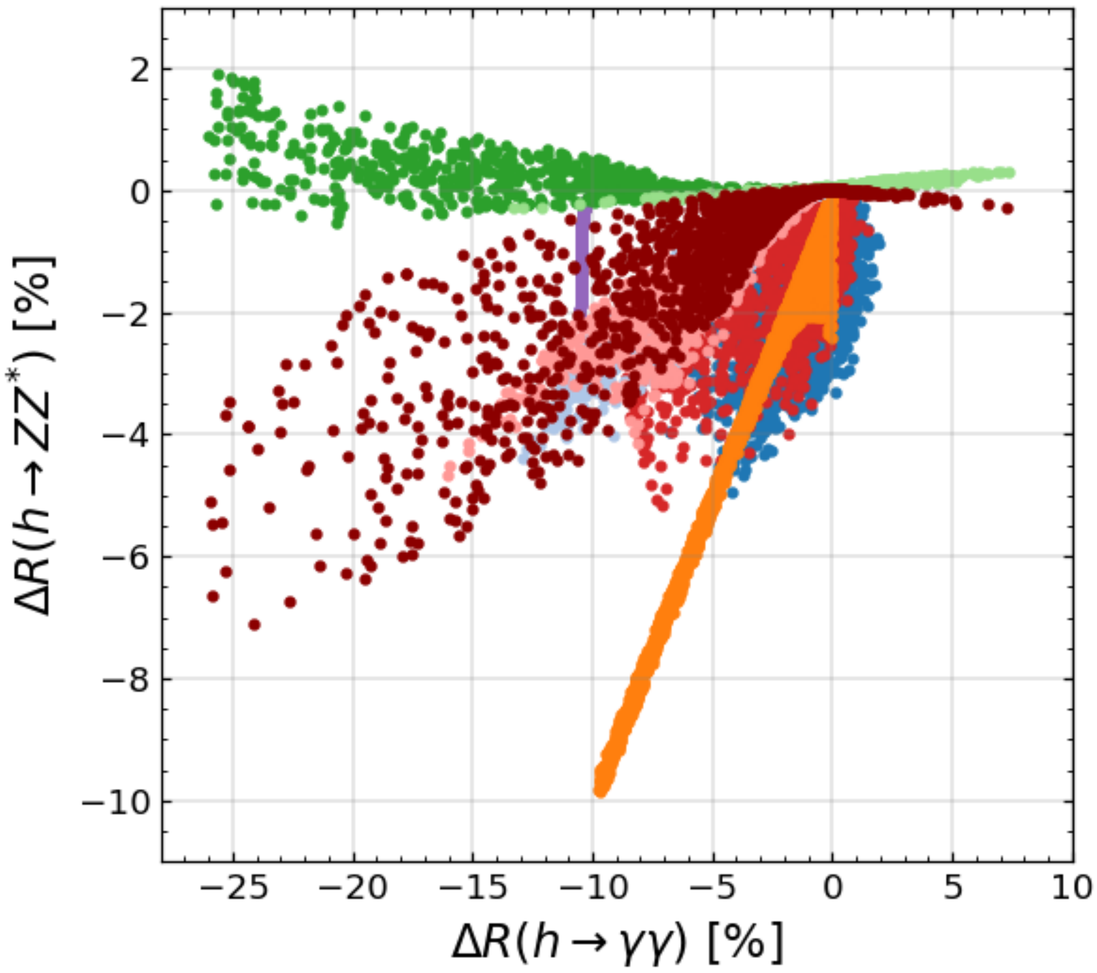
NEW!! H-COUP version 3.0 was released (28th Nov. 2023)

高次補正を含めた模型の比較

MA, Kanemura, Kikuchi, Sakurai, Taniguchi, Yagyu, 2611.04857

一重項、二重項、三重項模型など、様々な拡張模型を高次補正込みで比較できる。





まとめ

・将来電子・陽電子コライダーはHiggs factory

・Higgsの精密測定によって、新物理に迫ることができる

・そのために、理論計算もさらなる発展が必要