

拡張ヒッグスの物理

P R E S E N T A T I O N



津村 浩二

第4回 加速器・物理合同 ILC夏の合宿

2013年7月20-23日

模型の作り方

□ ゲージ群を決める

$SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow \text{gluon, W, B}$

ゲージ結合定数: g_s, g, g'

□ 物質場(スピン $\frac{1}{2}$, 0)

$Q, u_R, d_R, L, \ell_R, \phi, \phi'$

(ゲージアノマリーはクォークレプトンで打ち消す)

□ グローバル対称性

(B, Lは自動的)

□ 他の相互作用

湯川相互作用、ヒッグス自己結合

ヒッグスの発見

2012 July 4th, Hi_{gg}storical day

❖ 125 GeVのボソンを発見!!



CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson

Geneva, 4 July 2012. At a seminar held at CERN¹ today as a curtain raiser to the year's major particle physics conference, ICHEP2012 in Melbourne, the ATLAS and CMS experiments presented their latest preliminary results in the search for the long sought Higgs particle. Both experiments observe a new particle in the mass region around 125-126 GeV.

我々がHiggsと呼ぶためには？

❖ ヒッグス物理で最低限知っておくこと

❖ ヒッグスの 真空期待値 [VEV] ($v/\sqrt{2} = \langle \Phi^0 \rangle$) が電弱対称性の破れを導く

→ “ヒッグス機構” でゲージボソンが質量を獲得

$$m_V^2 = \frac{1}{4} g_V^2 v^2$$

❖ フェルミオンの質量も湯川相互作用を通じてVEVで生成

$$m_F = \frac{Y_F}{\sqrt{2}} v$$

我々がHiggsと呼ぶためには？

❖ ヒッグス物理で最低限知っておくこと

- ❖ ヒッグスの 真空期待値 [VEV] ($v/\sqrt{2} = \langle \Phi^0 \rangle$) が電弱対称性の破れを導く
→ “ヒッグス機構” でゲージボソンが質量を獲得

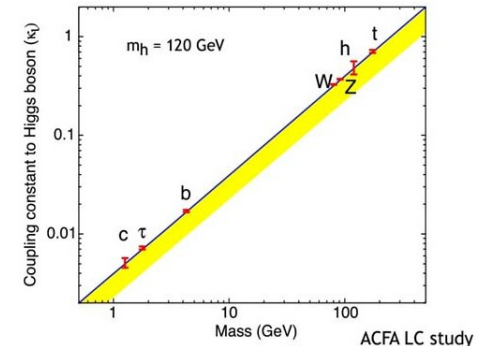
$$m_V^2 = \frac{1}{4} g_V^2 v^2$$

- ❖ フェルミオンの質量も湯川相互作用を通じてVEVで生成

$$m_F = \frac{Y_F}{\sqrt{2}} v$$

❖ “質量” と “結合” の関係

$$\lambda_{hVV} = 2m_V^2/v \quad \lambda_{hF\bar{F}} = m_F/v$$

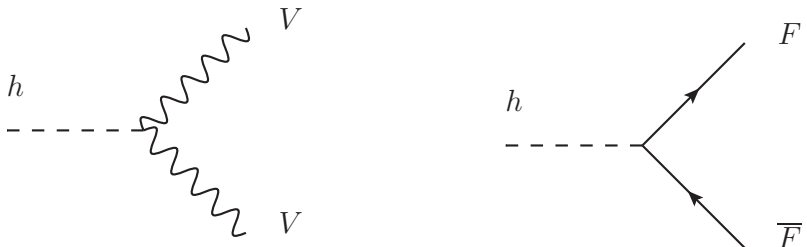


この関係を確認できればヒッグスと呼んで良いだろう！

我々がHiggsと呼ぶためには？

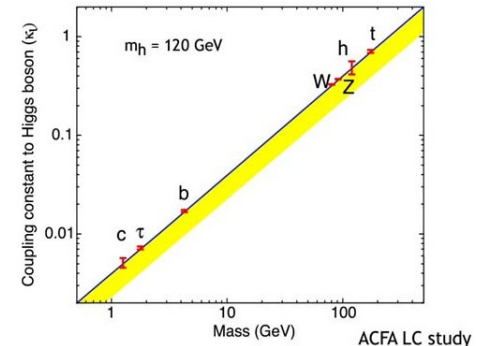
つまり、生成断面積や分岐比の精密測定が重要
スピンがゼロであることも確認が必要

☆ “質量” と “結合” の関係



The image shows two Feynman diagrams. The left diagram shows a dashed line labeled 'h' (Higgs boson) interacting with a wavy line labeled 'V' (vector boson). The right diagram shows a dashed line labeled 'h' interacting with two solid lines labeled 'F' and 'F-bar' (fermion and antifermion).

$$\lambda_{hVV} = 2m_V^2/v \quad \lambda_{hF\bar{F}} = m_F/v$$

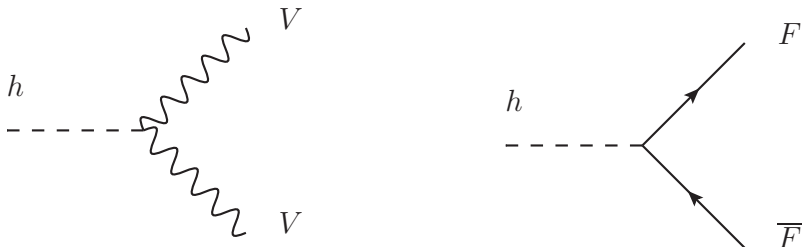


この関係を確認できればヒッグスと呼んで良いだろう！

我々がHiggsと呼ぶためには？

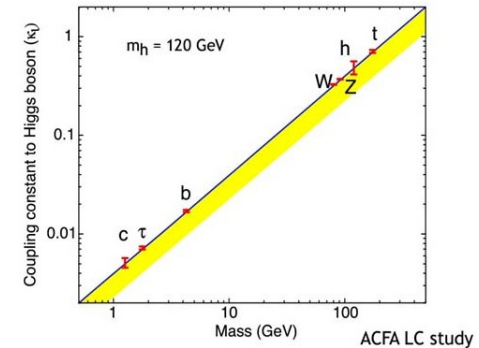
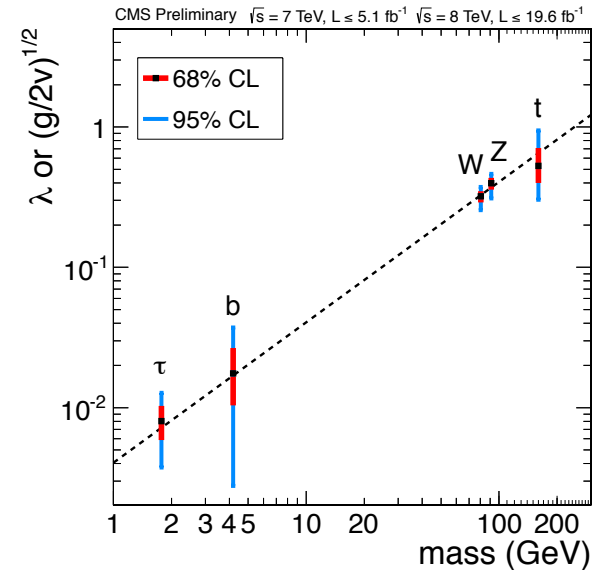
この比例関係の破れは
2つめのヒッグスを示唆

☆ “質量” と “結合” の関係



The image shows two Feynman diagrams. The left diagram shows a dashed line labeled 'h' (Higgs boson) interacting with a wavy line labeled 'V' (vector boson), with two 'V' lines extending from the vertex. The right diagram shows a dashed line labeled 'h' interacting with two solid lines labeled 'F' and 'F-bar' (fermion and antifermion).

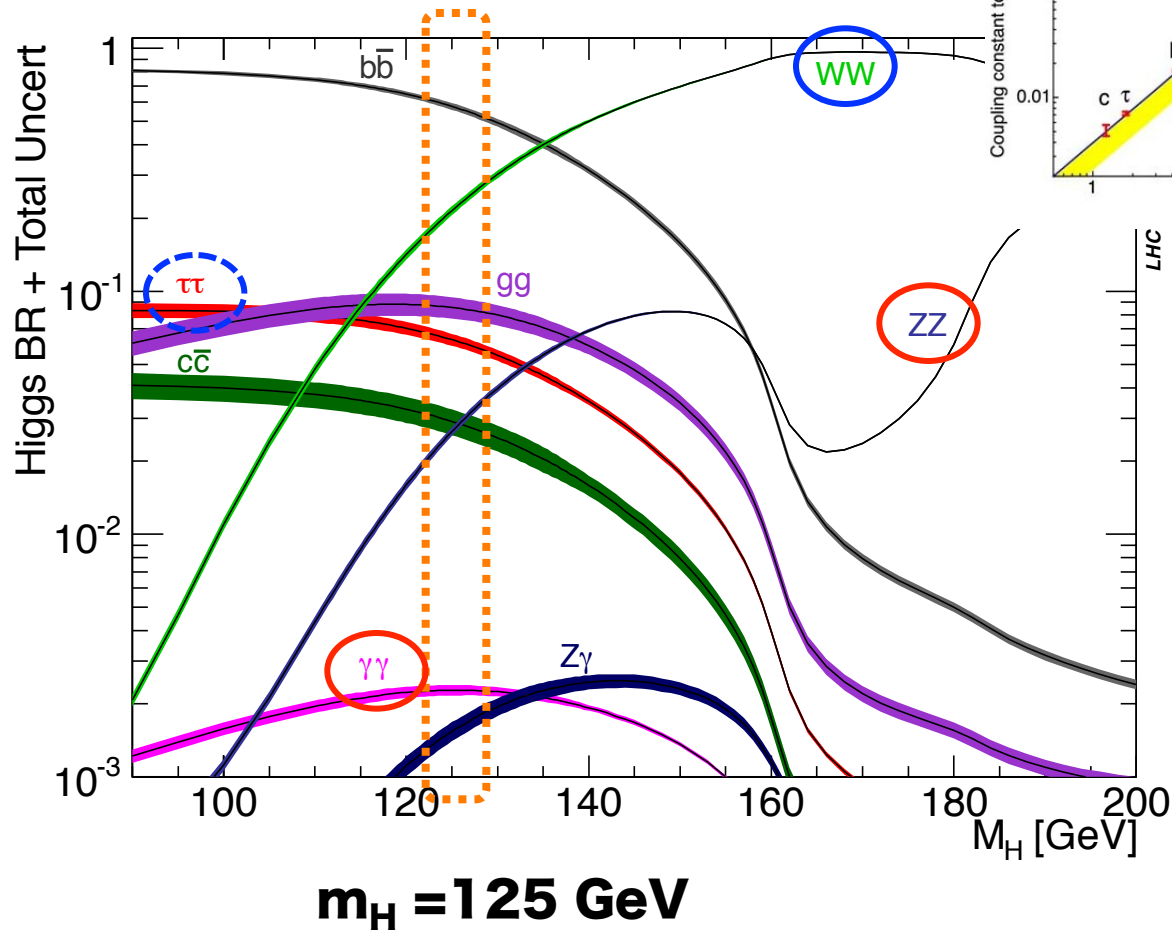
$$\lambda_{hVV} = 2m_V^2/v \quad \lambda_{hF\bar{F}} = m_F/v$$



この関係を確認できればヒッグスと呼んで良いだろう！

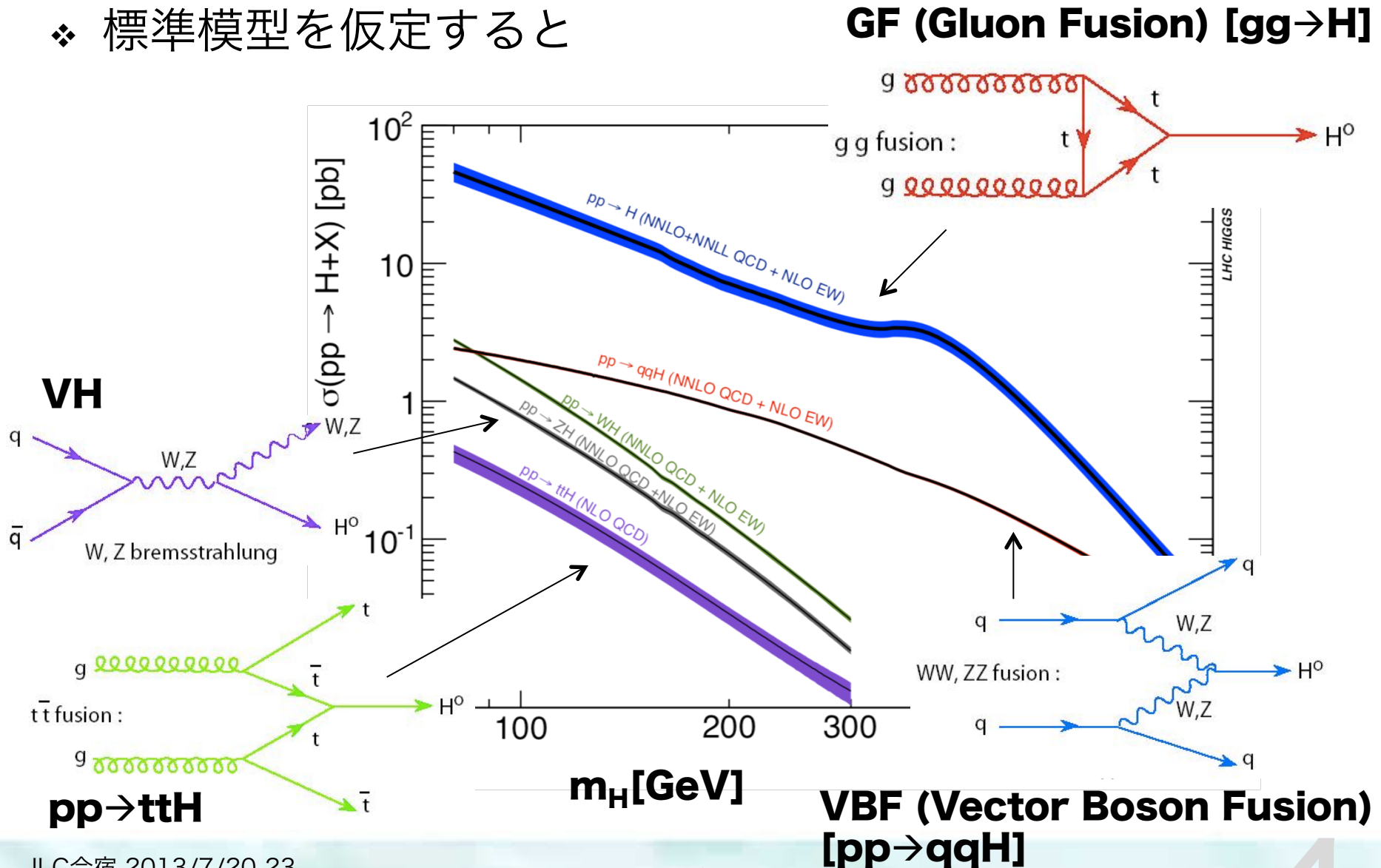
崩壊分岐比

❖ 標準模型を仮定すると



生成断面積

❖ 標準模型を仮定すると



CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson

Geneva, 4 July 2012. At a seminar held at CERN¹ today as a curtain raiser to the year's major particle physics conference, ICHEP2012 in Melbourne, the ATLAS and CMS experiments presented their latest preliminary results in the search for the long sought Higgs particle. Both experiments observe a new particle in the mass region around 125-126 GeV.

ヒッグスは軽かったか(重かったか)?

なぜ我々は新物理を考えるのか?

7月革命前夜

H^0 (Higgs Boson)

The observed signal is called a Higgs Boson in the following, although its detailed properties and in particular the role that the new particle plays in the context of electroweak symmetry breaking need to be further clarified. The signal was discovered in searches for a Standard Model (SM)-like Higgs. See the following section for mass limits obtained from those searches.

H^0 MASS

VALUE (GeV)
125.9 ± 0.4 OUR AVERAGE

125.9 ± 0.4 ± 0.4

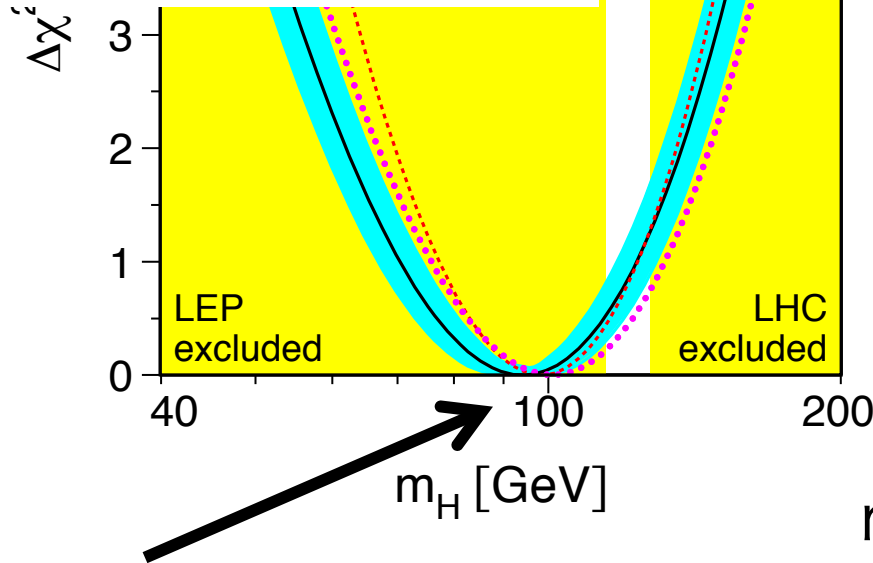
126.0 ± 0.4 ± 0.4

●●● We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ●●●

126.2 ± 0.6 ± 0.2

125.3 ± 0.4 ± 0.5

DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
1 CHATRCHYAN 13J	CMS	pp , 7 and 8 TeV
2 AAD 12AI	ATLS	pp , 7 and 8 TeV
3 CHATRCHYAN 13J	CMS	pp , 7 and 8 TeV
4 CHATRCHYAN 12N	CMS	pp , 7 and 8 TeV



LHC実験で排除
 $m_h < 127 \text{ GeV}$

— 人 人 人 人 人 人 人 —
 > わりとピッタリ <
 — Y Y Y Y Y Y Y —

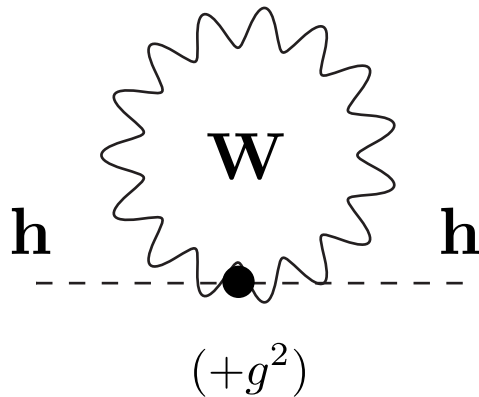
^(^o^)^
 |^
 /

$$m_h = 94^{+24}_{-29} \text{ GeV}$$

標準模型を仮定した時、電弱精密測定から期待される質量

しかし、標準模型には ヒッグスが“軽い”理由がない

輻射補正を考えてみる Δm_h^2



$$= (+g^2) \int \frac{d^4 k}{k^2 - m_W^2} = (+g^2) \Lambda^2$$



Wボソンの伝播関数

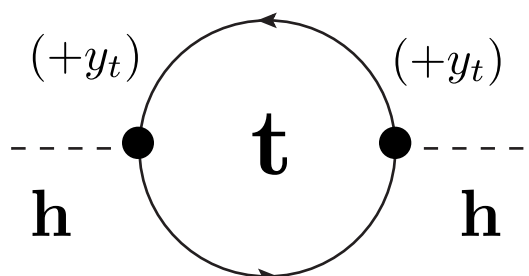
二次発散

(新物理のスケールの2乗で発散)

ヒッグスは重いほうが自然に思われる

しかし、標準模型には ヒッグスが”軽い”理由がない

輻射補正を考慮してみる Δm_h^2



$$= (-)(+y_t)^2 \int d^4k \left(\frac{k + m_t}{k^2 - m_t^2} \right)^2 = -(+y_t^2) \Lambda^2$$

フェルミオンループ

2乗

やはり **二次発散**
(新物理のスケールの2乗で発散)

ヒッグスは重いほうが自然に思われる

トップクォークの伝播関数

どのくらい不自然か？

$$m_h^2 \lllll \Lambda^2$$

$$(125 \text{ GeV})^2$$

$$M_{\text{GUT}}^2 \simeq (10^{16} \text{ GeV})^2$$

例えば、大統一スケール

$$1 \text{ 穰} = 10^{28}$$

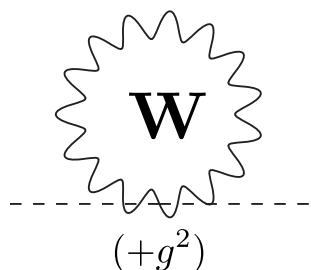
1無量大数=10⁸⁸

宇宙のスケール ~ O(100億光年) = 10²⁶ メートル

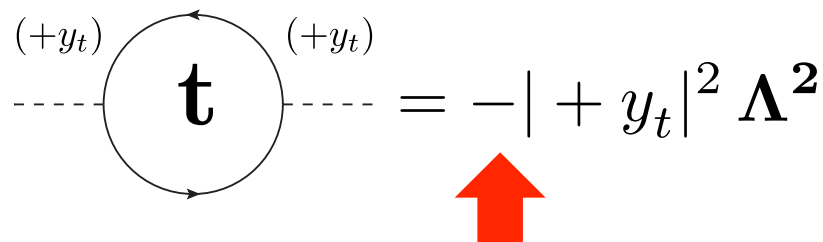
地球-太陽間：8分20秒、北極星：430光年

『夏の大三角』 デネブ：1800光年、ベガ：40光年、アルタイル：16光年

電弱スケールは兎に角、**軽すぎる**

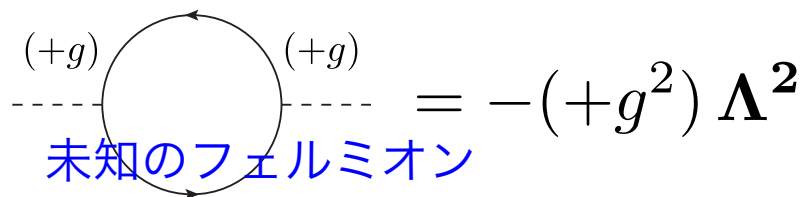


A Feynman diagram showing a loop of a W boson. The loop is represented by a wavy line with a jagged edge. The vertex is labeled 'W'. Below the loop, the coupling is given as $(+g^2)$. The diagram is equated to $(+g^2) \Lambda^2$.

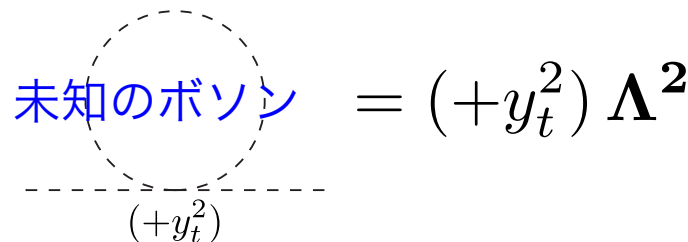


A Feynman diagram showing a loop of a top quark. The loop is represented by a solid line with an arrow indicating the direction of the quark. The vertex is labeled 't'. The coupling is given as $(+y_t)$ at both ends. The diagram is equated to $-|+y_t|^2 \Lambda^2$.

↑
マイナス?



A Feynman diagram showing a loop of an unknown fermion. The loop is represented by a solid line with an arrow. The vertex is labeled with $(+g)$. Below the loop, the text "未知のフェルミオン" (Unknown fermion) is written in blue. The diagram is equated to $-(+g^2) \Lambda^2$.

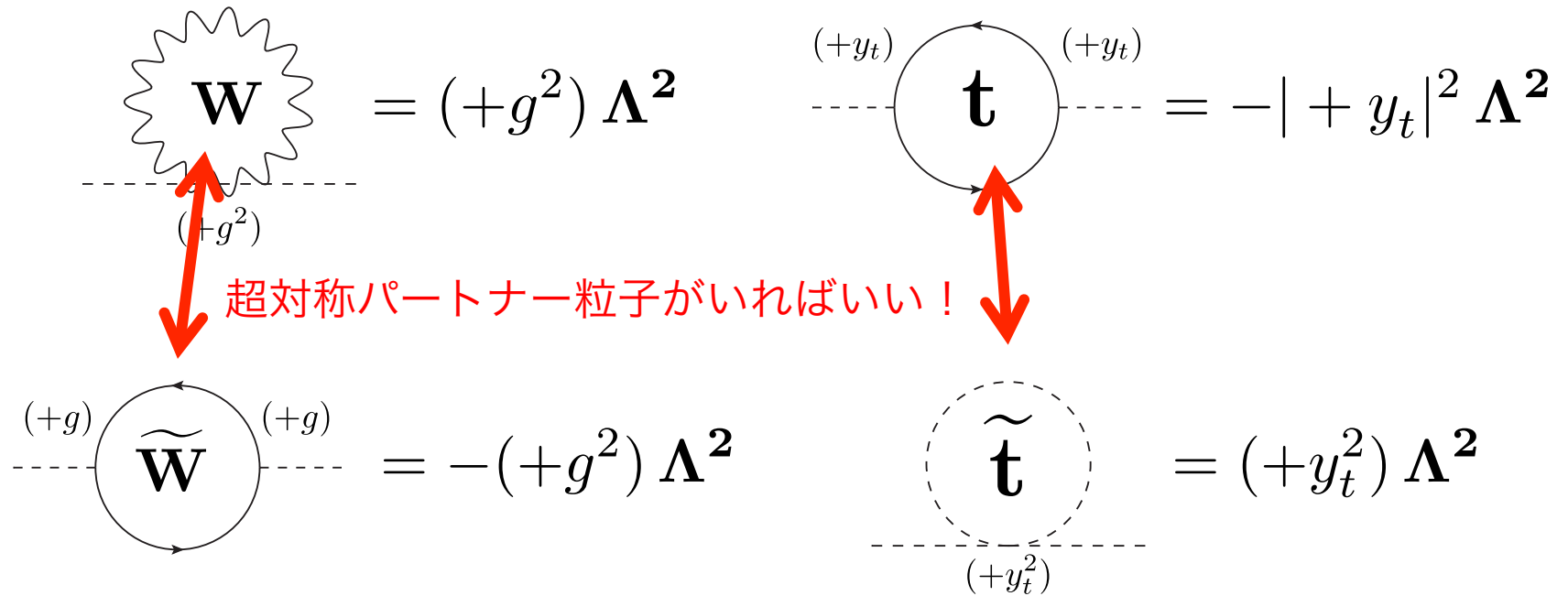


A Feynman diagram showing a loop of an unknown boson. The loop is represented by a dashed line. The vertex is labeled with $(+y_t^2)$. Below the loop, the text "未知のボソン" (Unknown boson) is written in blue. The diagram is equated to $(+y_t^2) \Lambda^2$.

ヒッグスが輻射補正で重くならない!
(ヒッグスが**“軽い”**理由を正当化出来る)

ヒッグスが輻射補正で重くならない!
 (ヒッグスが“軽い”理由を正当化出来た)

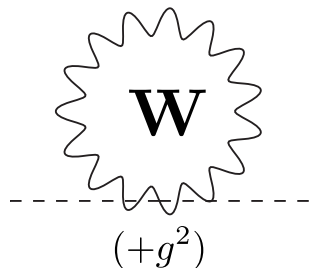
SUSY(超対称模型)



軽いヒッグスが予言される ($\rightarrow m_h < m_z$ @ 最低次)

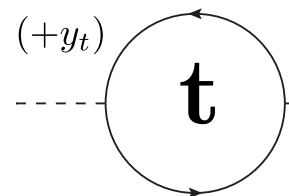
さらにゲージ結合の統一が良くなったり、冷たい暗黒物質の候補もいる

電弱スケールは兎に角、**軽すぎる**



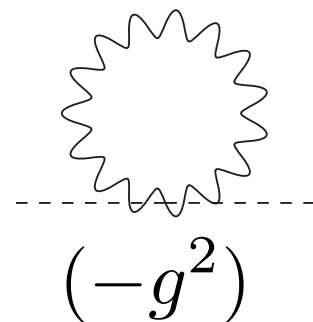
A Feynman diagram showing a loop of a W boson (represented by a wavy line) connected to a dashed external line. The loop is labeled with a bold 'W'. Below the diagram is the expression $(+g^2)$.

$$= (+g^2) \Lambda^2$$



A Feynman diagram showing a loop of a top quark (represented by a solid line with an arrow) connected to a dashed external line. The loop is labeled with a bold 't'. Above the loop are two labels $(+y_t)$. Below the diagram is the expression $-|+y_t|^2 \Lambda^2$.

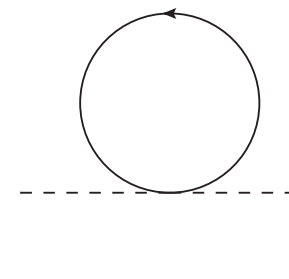
$$= -|+y_t|^2 \Lambda^2$$



A Feynman diagram showing a loop of a scalar particle (represented by a wavy line) connected to a dashed external line. Below the diagram is the expression $(-g^2)$.

$$= (-g^2) \Lambda^2$$

しかし、フェルミオンループは
繰り込み可能な範囲では**マイナス**



A Feynman diagram showing a loop of a fermion (represented by a solid line with an arrow) connected to a dashed external line. Below the diagram is the expression $\left(\frac{y_t^2}{M}\right) \times M \Lambda^2$. An arrow points from the text below to the $\frac{y_t^2}{M}$ term, and another arrow points from the text below to the M term.

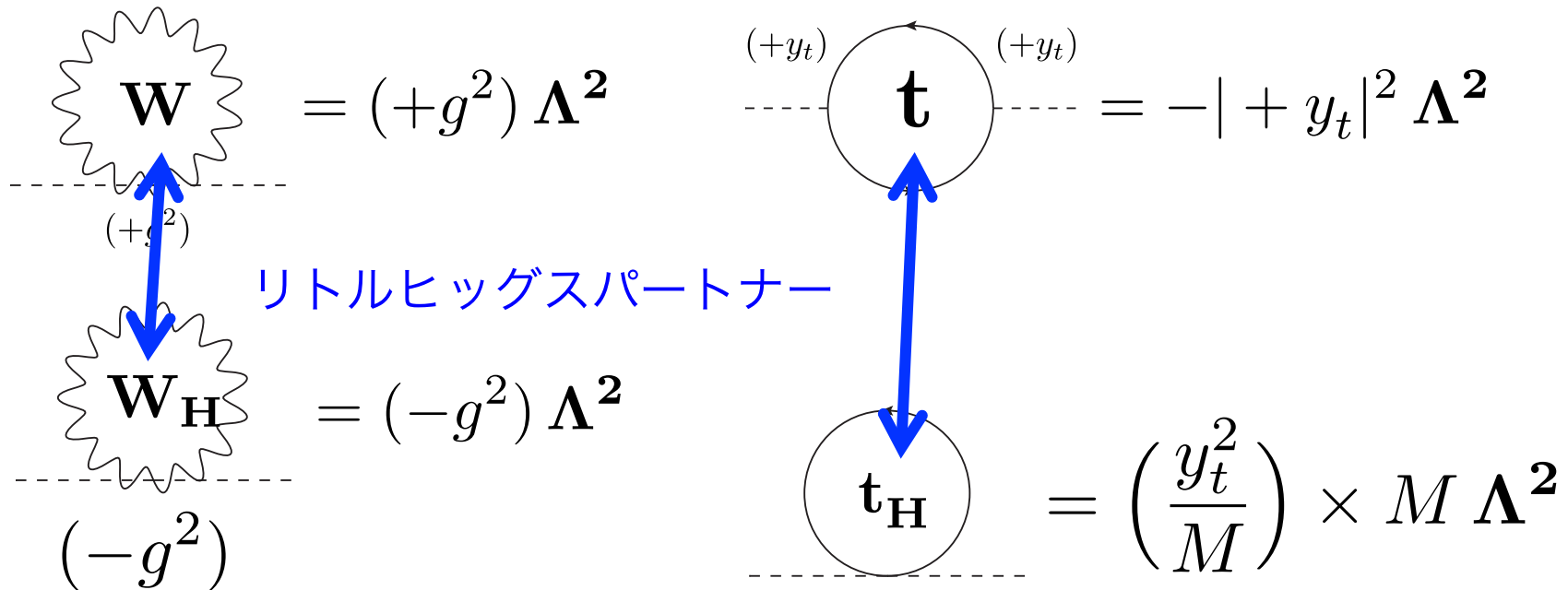
$$= \left(\frac{y_t^2}{M}\right) \times M \Lambda^2$$

ボソンじゃだめなの？

繰り込み不可能な
相互作用の結合

ループ積分

リトルヒッグス模型



ヒッグスは疑南部ゴールドストーンボソンというアイデア (背後にグローバル対称性)

冷たい暗黒物質の候補もいる

これまでの指針

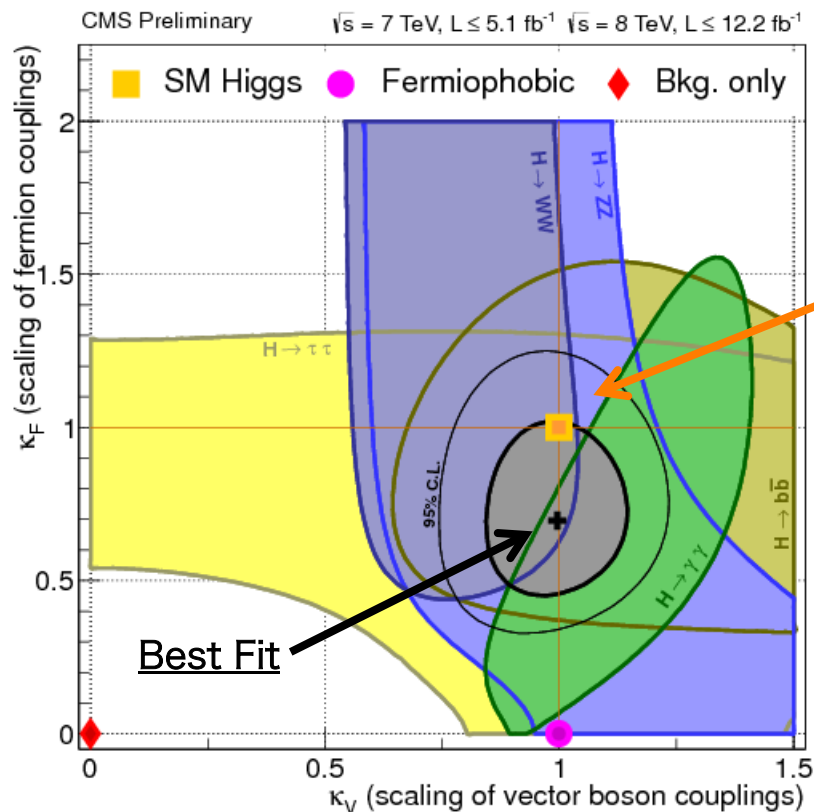
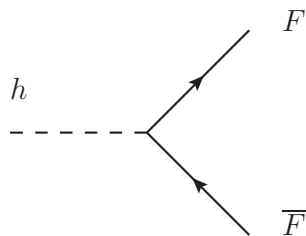
1. ヒッグスの質量の自然さの問題
2. 冷たい暗黒物質の不在
3. ニュートリノ極小質量の問題
4. バリオン数生成のシナリオ
5. …

これらの解決のために数多くのモデルが考えられた
拡張ヒッグスモデルもそのアプローチの一つ

ヒッグス結合のずれ

ヒッグス結合はSMの予言からずれている可能性がある

$$\kappa_F = \lambda_{hF\bar{F}} / \lambda_{hF\bar{F}}^{\text{SM}}$$

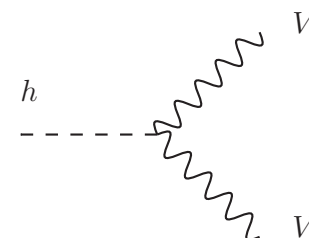


CMS

SMの予言

色付きの領域はヒッグスの各種崩壊モードが好む領域

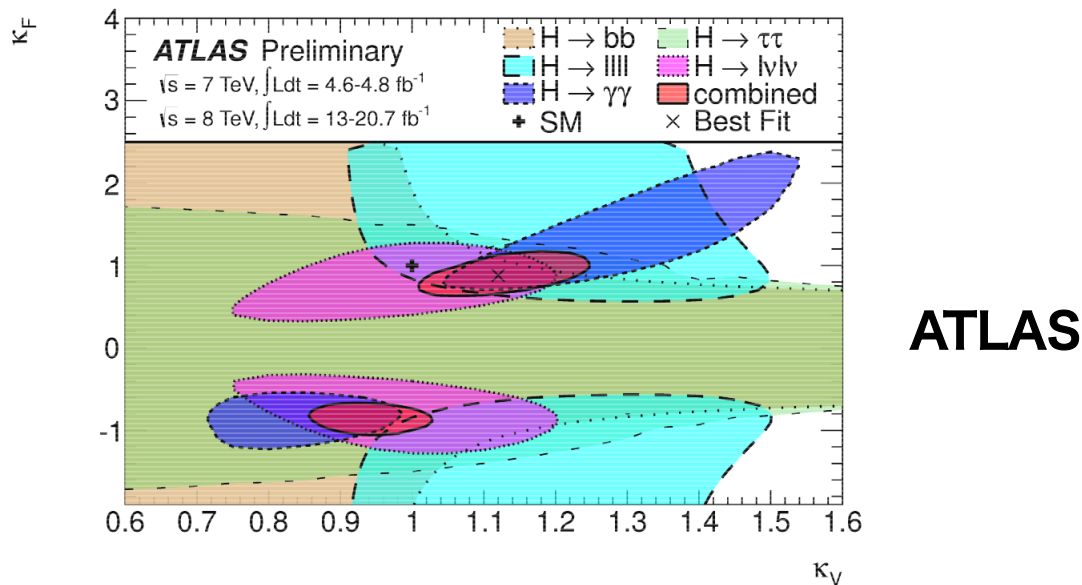
$$\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}}$$



ヒッグス結合の 標準模型からの ずれ

は

標準模型を超える **新物理** と解釈できる



H^0 (Higgs Boson)

The observed signal is called a Higgs Boson in the following, although its detailed properties and in particular the role that the new particle plays in the context of electroweak symmetry breaking need to be further clarified. The signal was discovered in searches for a Standard Model (SM)-like Higgs. See the following section for mass limits obtained from those searches.

[particle-discovered-cern-higgs-boson](#)

「**この**」
discovered at

the ATLAS and CMS

H^0 MASS

VALUE (GeV)

125.9±0.4 OUR AVERAGE

125.8±0.4±0.4

126.0±0.4±0.4

••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••

126.2±0.6±0.2

125.3±0.4±0.5

DOCUMENT ID

TECN

COMMENT

1 CHATRCHYAN13J CMS pp , 7 and 8 TeV

2 AAD 12AI ATLAS pp , 7 and 8 TeV

3 CHATRCHYAN13J CMS pp , 7 and 8 TeV

4 CHATRCHYAN12N CMS pp , 7 and 8 TeV

collaborations at CERN¹'s Large Hadron Collider (LHC) presented preliminary new results that further elucidate the particle discovered last year. Having analysed two and a half times more data than was available for the discovery announcement in July, they find that the new particle is looking more and more like a Higgs boson, the particle linked to the mechanism that gives mass to elementary particles. It remains an open question, however, whether this is the Higgs boson of the Standard Model of particle physics, or possibly the lightest of several bosons predicted in some theories that go beyond the Standard Model. Finding the answer to this question will take time.

仲間がいてもいい

目次

- ❖ ヒッグスは軽かったか(重かったか)?
- ❖ どういう拡張ヒッグスモデルが許されるか?

HIGGS BOSON **H**

The **HIGGS BOSON** is the theoretical particle of the Higgs mechanism, which physicists believe will reveal how all matter in the universe get its mass. Many scientists hope that the Large Hadron Collider in Geneva, Switzerland will detect the elusive Higgs Boson when it begins colliding particles at 99.99% the speed of light.

Wool felt with gravel fill for maximum mass.

\$9.75 PLUS SHIPPING

LIGHT ●●●●●●●●●● HEAVY

GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEUTRINO MUON UP QUARK
NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON **HIGGS BOSON** NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN
NEUTRINO MUON UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHY
The **PARTICLE ZOO** TAU NEUTRINO MUON UP QUARK PROTON N
ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NE

拡張ヒッグスモデルの分類

短期目標

ヒッグスのゲージ結合が標準
モデルからズレることを示す

ヒッグス結合のずれは
2つめのヒッグスを示唆

標準模型のヒッグス

弱ゲージボソン (W^\pm, Z) に吸収される自由度

$$2 + 1 = 3$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} i\omega^+ \\ (v + h - iz)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

真空期待値を持つ

SU(2)の[複素] 2次元表現で Y (ハイパーチャージ) = -1/2

The Higgs boson

標準模型のヒッグス

$$\Phi = \begin{pmatrix} i\omega^+ \\ (v + h - iz)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$|j = 1/2, m = 1/2\rangle$

電荷 $Q = +1$ の成分

電荷 $Q = 0$ の成分

$|j = 1/2, m = -1/2\rangle$

SU(2)の[複素] 2次元表現で Y (ハイパーチャージ) = $-1/2$

アイソスピン 1/2

ヒッグスを分類するラベル

SU(2)“アイソスピン”のまとめ

$$[J^a, J^b] = i \epsilon^{abc} J^c \quad \begin{cases} \mathbf{J}^2 |j, m\rangle = j(j+1) |j, m\rangle \\ J^3 |j, m\rangle = m |j, m\rangle \end{cases}$$

$$j = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$$

一重項 二重項 三重項 四重項

$$\begin{array}{cccc} \varphi_0 & \begin{pmatrix} \varphi_{1/2} \\ \varphi_{-1/2} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_0 \\ \varphi_{-1} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \varphi_{3/2} \\ \varphi_{1/2} \\ \varphi_{-1/2} \\ \varphi_{-3/2} \end{pmatrix} \end{array}$$

SU(2)アイソスピン = 成分の数 $(2j+1)$

ハイパーチャージ = $Q - m(T_3)$ (電荷をずらしたもの)

$$\text{電荷 } Q = m(T_3) + Y$$

標準模型のヒッグス

$$\Phi = \begin{pmatrix} i\omega^+ \\ (v + h - iz)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

SU(2)の[複素]2次元表現で Y (ハイパーチャージ) = -1/2

ヒッグスを分類するラベル

$$\text{電荷 } Q = m(T_3) + Y$$

拡張ヒッグスの例1

$$\xi = \begin{pmatrix} i \xi^+ \\ v + \xi^0 \\ i \xi^- \end{pmatrix} \begin{array}{l} |j=1, m=1\rangle \\ |j=1, m=0\rangle \\ |j=1, m=-1\rangle \end{array}$$

SU(2)の実3次元表現で Y (ハイパーチャージ) = 0

アイソスピン 1

$$\text{電荷 } Q = m(T_3) + Y$$

拡張ヒッグスの例2

$$\Delta = \begin{pmatrix} i \Delta^{++} \\ i \Delta^+ \\ (v + \Delta_h - i \Delta_z) / \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{matrix} |j=1, m=1\rangle \\ |j=1, m=0\rangle \\ |j=1, m=-1\rangle \end{matrix}$$

SU(2)の複素3次元表現で Y (ハイパーチャージ) = +1

アイソスピン 1

相互作用ラグランジアン

ヒッグス結合とゲージボソン質量の関係

$$\phi h \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{wavy} \\ \text{---} \end{array} \begin{array}{l} W_{\mu}^{+} \\ \\ W_{\nu}^{-} \end{array} = i \frac{2m_W^2}{v} g_{\mu\nu} \quad \phi h \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{wavy} \\ \text{---} \end{array} \begin{array}{l} Z_{\mu} \\ \\ Z_{\nu} \end{array} = i \frac{2m_Z^2}{v} g_{\mu\nu}$$

ゲージボソンの質量公式

W, Z ボソンの質量は表現に依存する

$$m_W^2 = +[j(j+1) - Y_\phi^2] \frac{g^2 v_{2j+1}^2}{2}$$

$$m_Z^2 = +2Y_\phi^2 \frac{g_Z^2 v_{2j+1}^2}{2}$$

標準模型ヒッグスの場合

$$\Phi = \begin{pmatrix} i\omega^+ \\ (v+h-iz)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{4}$$

$$m_Z^2 = \frac{g_Z^2 v^2}{4}$$

だいたい同じくらい

複素三重項ヒッグスの場合

$$\Delta = \begin{pmatrix} i\Delta^{++} \\ i\Delta^+ \\ (v+\Delta_h-i\Delta_z)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{2}$$

$$m_Z^2 = g_Z^2 v^2$$

Zが2倍重い

ゲージボソンの質量

実験と明らかに矛盾する



標準模型ヒッグスの場合

$$\Phi = \begin{pmatrix} i\omega^+ \\ (v + h - iz)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{4}$$

$$m_Z^2 = \frac{g_Z^2 v^2}{4}$$

複素三重項ヒッグスの場合

$$\Delta = \begin{pmatrix} i\Delta^{++} \\ i\Delta^+ \\ (v + \Delta_h - i\Delta_z)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{2}$$

$$m_Z^2 = g_Z^2 v^2$$

ゲージボソンの質量

2つの表現が同時に存在すれば

$$m_W^2 = \frac{g^2(v_\Phi^2 + 2v_\Delta^2)}{4}$$

$$m_Z^2 = \frac{g_Z^2(v_\Phi^2 + 4v_\Delta^2)}{4}$$

$$v_W^2 = v_\Phi^2 + 2v_\Delta^2$$

$$v_Z^2 = v_\Phi^2 + 4v_\Delta^2$$

エフェクティブな真空期待値がWとZで異なる

標準模型ヒッグスの場合

$$\Phi = \begin{pmatrix} i\omega^+ \\ (v + h - iz)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{4}$$

$$m_Z^2 = \frac{g_Z^2 v^2}{4}$$

複素三重項ヒッグスの場合

$$\Delta = \begin{pmatrix} i\Delta^{++} \\ i\Delta^+ \\ (v + \Delta_h - i\Delta_z)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{2}$$

$$m_Z^2 = g_Z^2 v^2$$

相互作用ラグランジアン

ヒッグス結合とゲージボソン質量の関係

$$h \text{ --- } \begin{array}{l} W_{\mu}^{+} \\ W_{\nu}^{-} \end{array} = i \frac{2m_W^2}{v} g_{\mu\nu} \qquad h \text{ --- } \begin{array}{l} Z_{\mu} \\ Z_{\nu} \end{array} = i \frac{2m_Z^2}{v} g_{\mu\nu}$$

$$= i \frac{g^2 v}{2} g_{\mu\nu} \quad \text{標準模型ヒッグスの場合} \quad = i \frac{g_Z^2 v}{2} g_{\mu\nu}$$

$$= i g^2 v g_{\mu\nu} \quad \text{複素三重項ヒッグスの場合} \quad = 2 i g_Z^2 v g_{\mu\nu}$$

2つ目のヒッグスと混ざればゲージ結合がズれる！

目次

- ❖ ヒッグスは軽かったか(重かったか)?
- ❖ どういう拡張ヒッグスモデルが許されるか?

❖ 拡張ヒッグスモデルの分類

❖ 電弱対称性の破れに注目する

❖ フレーバーに注目する

(ヒッグス結合はどうズレるか?)

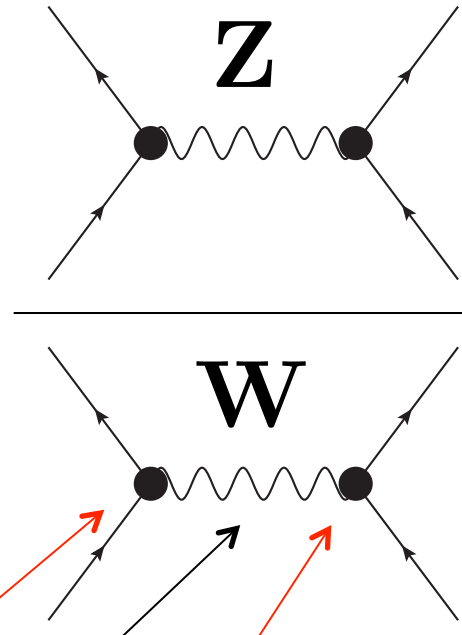
(拡張ヒッグスモデルと新物理の関係)



電弱対称性の破れに注目する

ρ パラメータ

荷電カレントと中性カレントの相互作用の強さの比


$$\rho = \frac{\text{Z}}{\text{W}} = \frac{v_W^2}{v_Z^2} \left(= \frac{v_\Phi^2}{v_\Phi^2} = 1 \right)$$

標準模型の場合

$$g_V \times \frac{1}{m_V^2} \times g_V \approx \frac{1}{4v_V^2}$$

ρ パラメータ

荷電カレントと中性カレントの相互作用の強さの比

$$\rho = \frac{\text{Z}}{\text{W}} = \frac{v_W^2}{v_Z^2} \left(= \frac{v_\Phi^2 + 2v_\Delta^2}{v_\Phi^2 + 4v_\Delta^2} \right)$$

三重項を追加した場合

$$v_\Delta \ll v_\Phi$$

0.05%で拡張ヒッグスを規定する

0.05%で拡張ヒッグスを規定する

電弱精密測定の結果

$$\rho_0 = (\rho / \rho_{\text{SM}}) = 1.0004^{+0.0003}_{-0.0004}$$

拡張ヒッグス模型

任意の数の(真空期待値を持つ)ヒッグス場に対して

$$\rho_{\text{tree}} = \frac{\sum_{\alpha} [I_{\alpha}(I_{\alpha} + 1) - Y_{\alpha}^2] v_{\alpha}^2}{\sum_{\beta} 2Y_{\beta}^2 v_{\beta}}$$

真空期待値
SU(2)アイソスピン
ハイパーチャージ

$\rho \approx 1$ を保つ

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

$I=Y=0$ なので ρ に寄与しない

$$\rho_0 = (\rho / \rho_{\text{SM}}) = 1.0004^{+0.0003}_{-0.0004}$$

拡張ヒッグス模型

追加されるヒッグスの仲間

S^0

$\rho \approx 1$ を保つ

このような模型の例：

✓ 電弱一次相転移を導く模型

[電弱バリオン数生成のシナリオに関係]

✓ ゲージ化された $U(1)_{B-L}$ 模型

[大統一模型の低エネルギー有効理論のひとつ]

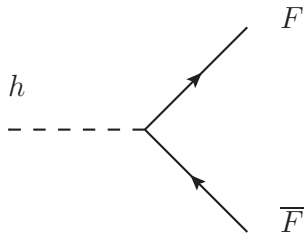
大統一=ゲージ相互作用の統一、クォークとレプトンの統一

例1) $SU(2)$ の一重項を含めて拡張

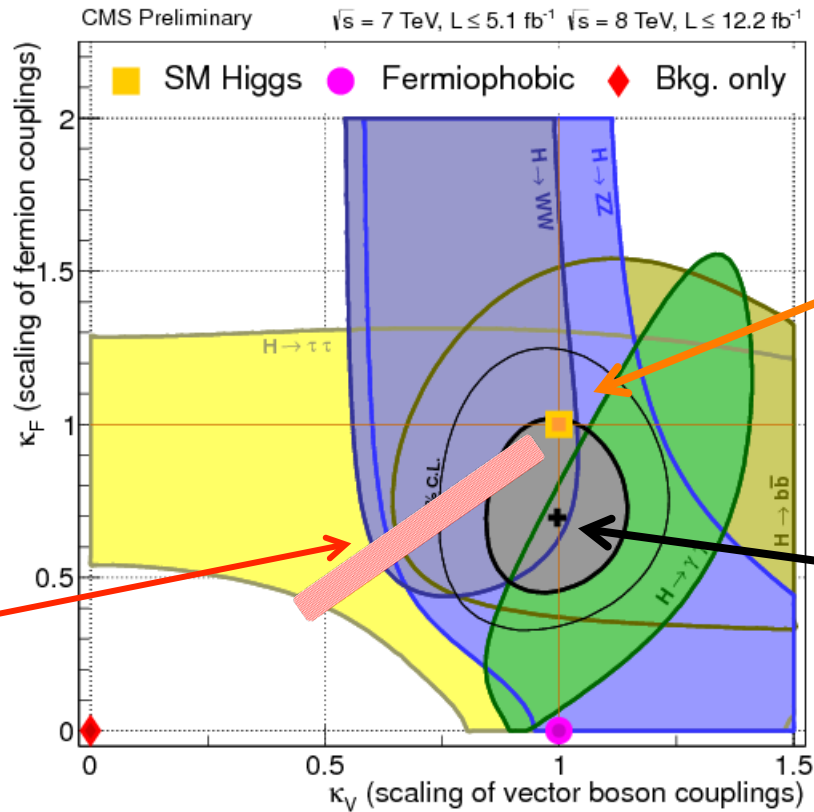
$I=Y=0$ なので ρ に寄与しない

$$\rho_0 = (\rho/\rho_{SM}) = 1.0004^{+0.0003}_{-0.0004}$$

$$\kappa_F = \lambda_{hF\bar{F}} / \lambda_{hF\bar{F}}^{\text{SM}}$$



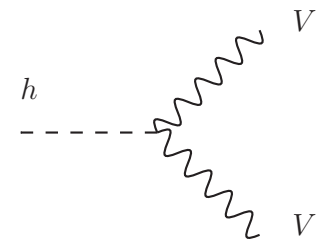
模型の予言する
典型的な領域



CMS

SMの予言

$$\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}}$$



拡張ヒッグス模型

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

$\rho \approx 1$ を保つ

例2) 複数の二重項 $(l=1/2, Y=-1/2)$ を含めて拡張

エフェクティブには真空期待値の再定義のみ

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2 + \dots$$

拡張ヒッグス模型

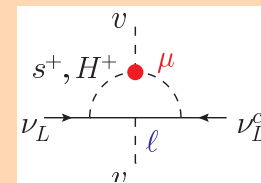
追加されるヒッグスの仲間

$$H, A, H^\pm$$

$\rho \approx 1$ を保つ

このような模型の例：

- ✓ 超対称標準模型 → ヒッグス質量に予言
[量子異常なし、ゲージ結合の統一精密化、暗黒物質]
- ✓ フレーバー対称模型 [ヒッグス二重項に兄弟を！]
- ✓ Zee(輻射シーソー)模型
[ニュートリノ質量をループ補正で説明]

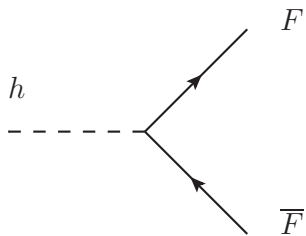


例2) 複数の二重項 $(l=1/2, Y=-1/2)$ を含めて拡張

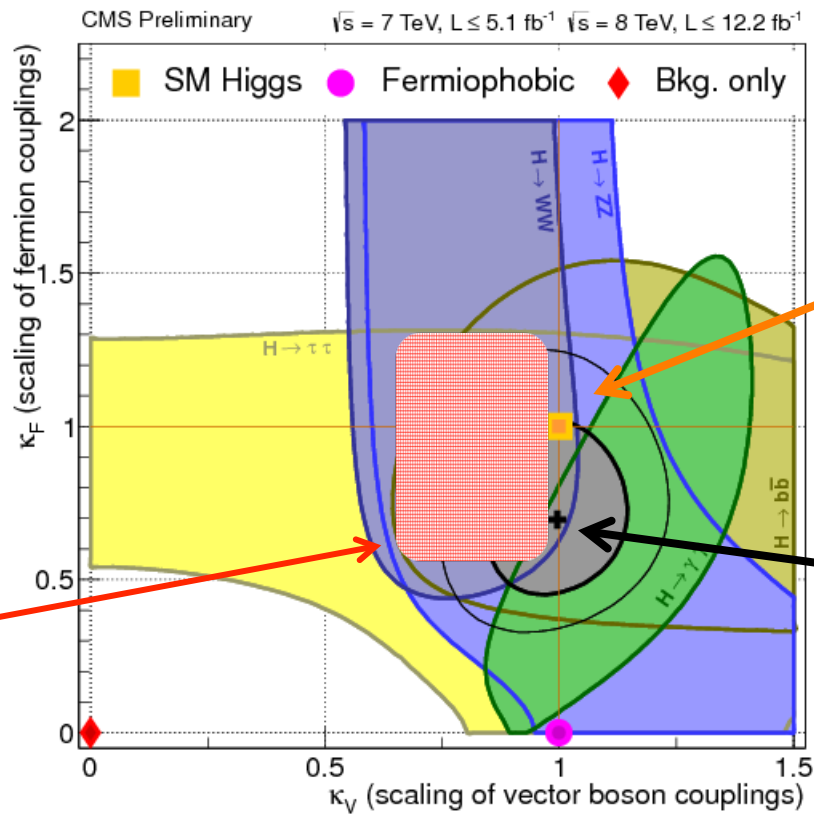
エフェクティブには真空期待値の再定義のみ

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2 + \dots$$

$$\kappa_F = \lambda_{hF\bar{F}} / \lambda_{hF\bar{F}}^{\text{SM}}$$



模型の予言する
典型的な領域

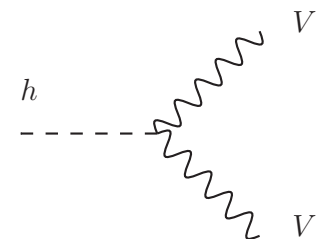


CMS

SMの予言

Best Fit

$$\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}}$$



拡張ヒッグス模型

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

例2) 複数の二重項($I=1/2, Y=-1/2$)を含めて拡張

$\rho \approx 1$ を保つ

例3) 真空期待値の小さい多重項を加える

W,Zに対応する真空期待値に小さな補正

$$v_V^2 = v_\Phi^2 (1 + \epsilon_V^2 + \dots)$$

拡張ヒッグス模型

追加されるヒッグスの仲間

$$\Delta_H, \Delta_A, \Delta^\pm, \Delta^{\pm\pm}$$

$\rho \approx 1$ を保つ

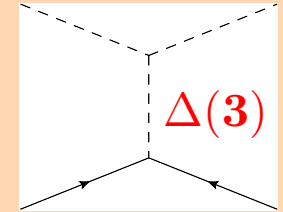
このような模型の例：

$$y_\nu \bar{L}^c \Delta L \rightarrow m_\nu \bar{\nu}_L^c \nu_L$$

✓ (タイプ2)シーソー模型

[ニュートリノ質量をツリーで説明]

スカラーセクターでレプトン数が破れる



✓ ハイブリッドシーソー模型

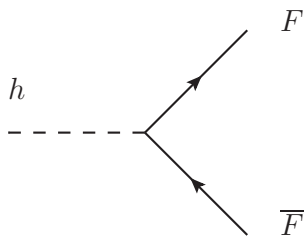
[ニュートリノ質量をツリーとループ補正で説明]

例3) 真空期待値の小さい多重項を加える

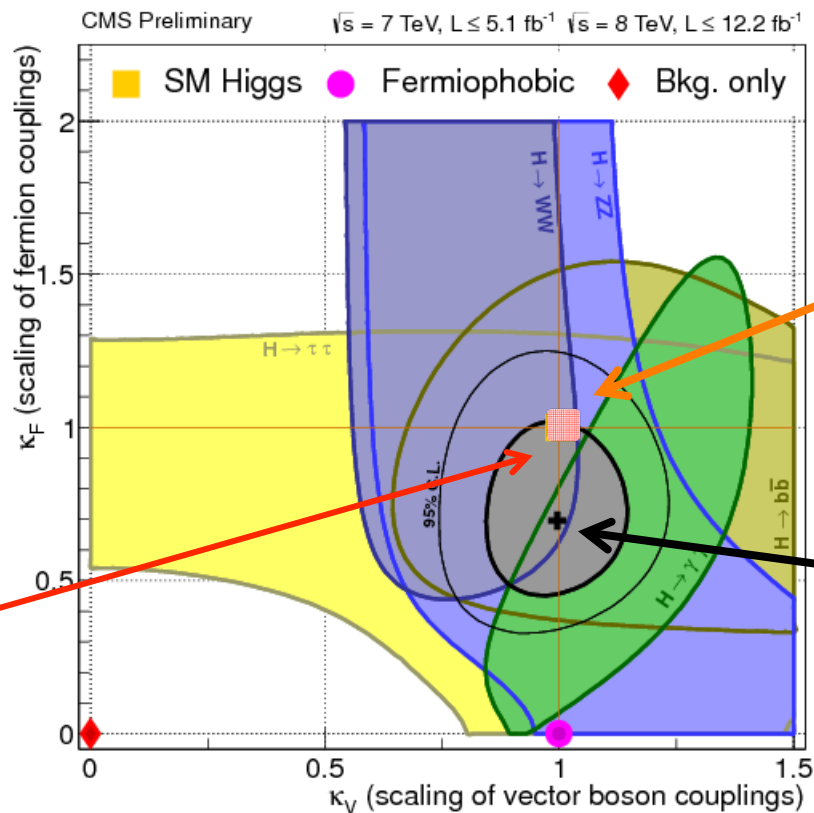
W,Zに対応する真空期待値に小さな補正

$$v_V^2 = v_\Phi^2 (1 + \epsilon_V^2 + \dots)$$

$$\kappa_F = \lambda_{hF\bar{F}} / \lambda_{hF\bar{F}}^{\text{SM}}$$



模型の予言する
典型的な領域

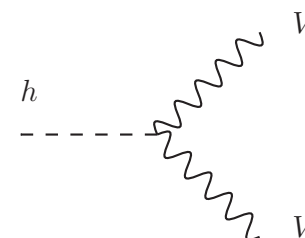


CMS

SMの予言

Best Fit

$$\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}}$$



拡張ヒッグス模型

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

例2) 複数の二重項($l=1/2, Y=-1/2$)を含めて拡張

例3) 真空期待値の小さい多重項を加える

$\rho \approx 1$ を保つ

例4) エキゾチックな表現

$\rho = 1$ を満たす表現を選んてくる

例) 7重項 $Y=2$, 26重項 $Y=15/2$, ...

拡張ヒッグス模型

追加されるヒッグスの仲間

$H, A, H^\pm,$
 $H^{\pm\pm}, H^{\pm\pm\pm}$
 $H^{\pm\pm\pm\pm}, H^{\pm\pm\pm\pm\pm} \dots$

$\rho \approx 1$ を保つ

このような模型の例：

エキゾチックではありません

現象論的に面白い点： $\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}} > 1$

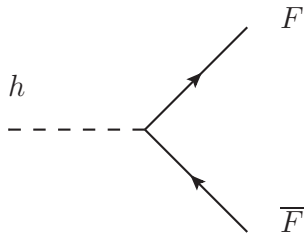
ヒッグスのゲージ結合が標準模型より大きくなる

例4) エキゾチックな表現

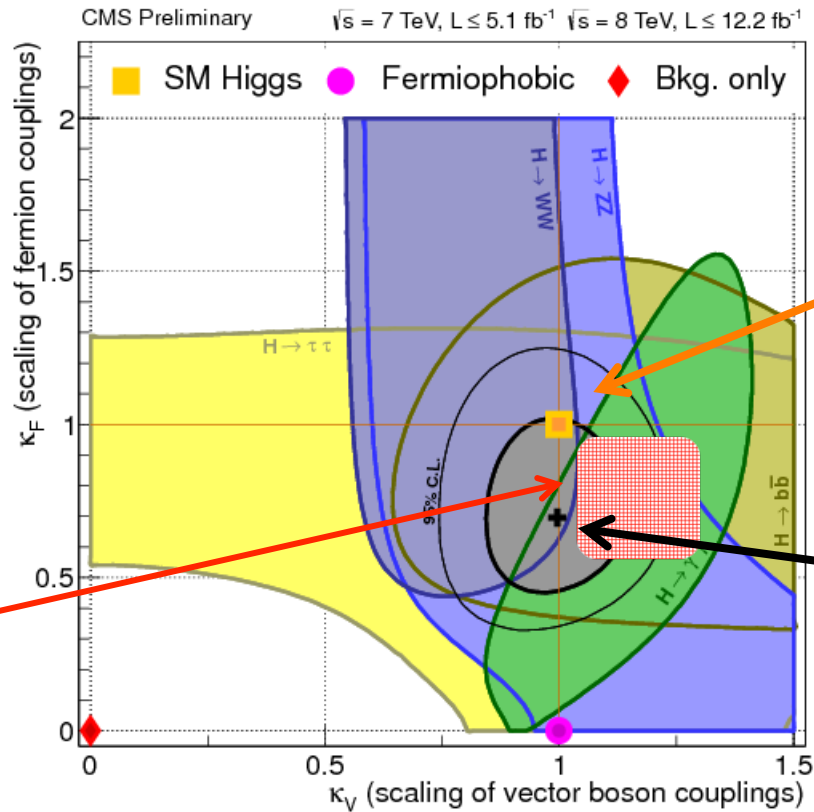
$\rho = 1$ を満たす表現を選んてくる

例) 7重項 $Y=2$, 26重項 $Y=15/2$, ...

$$\kappa_F = \lambda_{hF\bar{F}} / \lambda_{hF\bar{F}}^{\text{SM}}$$



模型の予言する
典型的な領域

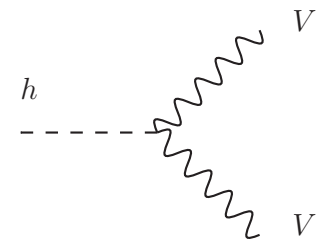


CMS

SMの予言

Best Fit

$$\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}}$$



拡張ヒッグス模型

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

例2) 複数の二重項($l=1/2, Y=-1/2$)を含めて拡張

例3) 真空期待値の小さい多重項を加える

例4) エキゾチックな表現

$\rho \approx 1$ を保つ

例5) 複数の真空期待値を調整する

$\rho = 1$ を満たすよう真空期待値の間に関係を要求

例) Georgi-Machacek模型 $v_\xi = v_\Delta$

$$v_W^2 = v_\Phi^2 + 2v_\Delta^2 + 2v_\xi^2$$

$$v_Z^2 = v_\Phi^2 + 4v_\Delta^2$$

拡張ヒッグス模型

追加されるヒッグスの仲間

$$H_1, H_3, H_3^\pm$$

$$H_5, H_5^\pm, H_5^{\pm\pm}$$

$\rho \approx 1$ を保つ

このような模型の例：

✓ Georgi-Machacek模型

[ヒッグスセクターの大域的対称性に基づいた模型]

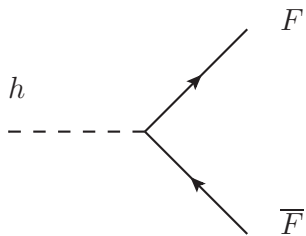
現象論的に面白い点: $\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}} > 1$

ヒッグスのゲージ結合が標準模型より大きくなる

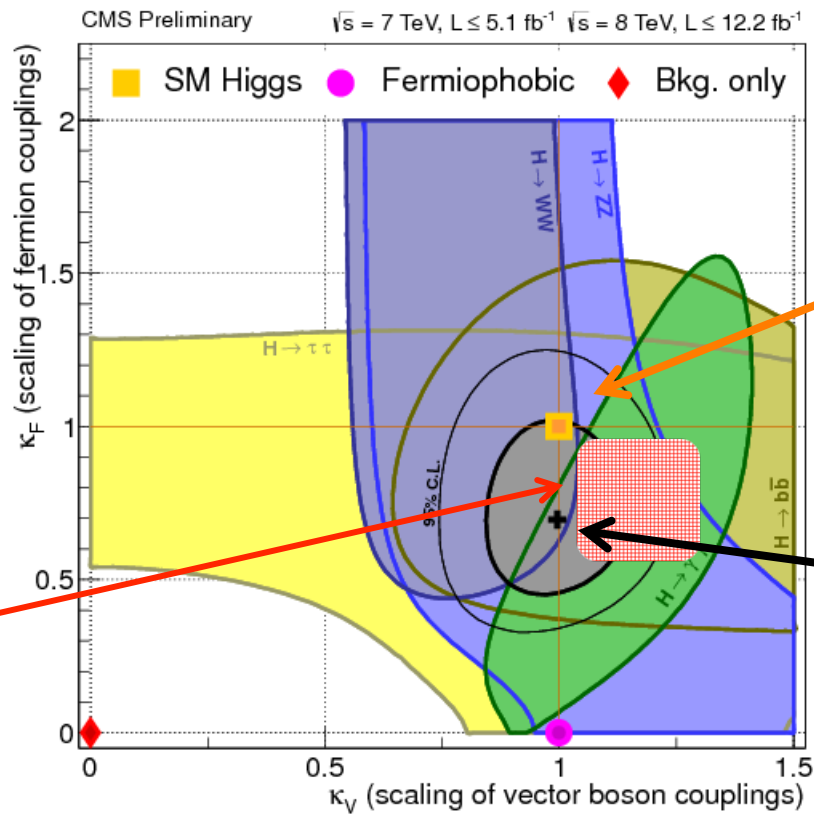
例5) 複数の真空期待値を調整する

$\rho = 1$ を満たすよう真空期待値の間に関係を要求

$$\kappa_F = \lambda_{hF\bar{F}} / \lambda_{hF\bar{F}}^{\text{SM}}$$



模型の予言する
典型的な領域

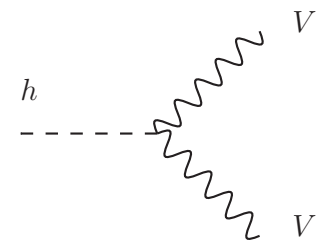


CMS

SMの予言

Best Fit

$$\kappa_V = \lambda_{hVV} / \lambda_{hVV}^{\text{SM}}$$



拡張ヒッグス模型

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

例2) 複数の二重項 $(I=1/2, Y=-1/2)$ を含めて拡張

例3) 真空期待値の小さい多重項を加える

例4) エキゾチックな表現

例5) 複数の真空期待値を調整する

$\rho \approx 1$ を保つ

拡張ヒッグス模型には多様な可能性がある

拡張ヒッグス模型

S^0

H, A, H^\pm

$\Delta_H, \Delta_A, \Delta^\pm, \Delta^{\pm\pm}$

例1) SU(2)の一重項を含めて拡張

例2) 複数の二重項($l=1/2, Y=-1/2$)を含めて拡張

例3) 真空期待値の小さい多重項を加える

例4) エキゾチックな表現

$H, A, H^\pm,$

$H^{\pm\pm}, H^{\pm\pm\pm},$

$H^{\pm\pm\pm\pm}, H^{\pm\pm\pm\pm\pm}, \dots$

例5) 複数の真空期待値を調整する

H_1, H_3, H_3^\pm

$H_5, H_5^\pm, H_5^{\pm\pm}$

$\rho \approx 1$ を保つ

ヒッグスの仲間にも多様な可能性がある

フレーバーに注目する

(もし時間があったら)

短期目標

ヒッグスの **湯川結合** が標準
モデルからズレることを示す

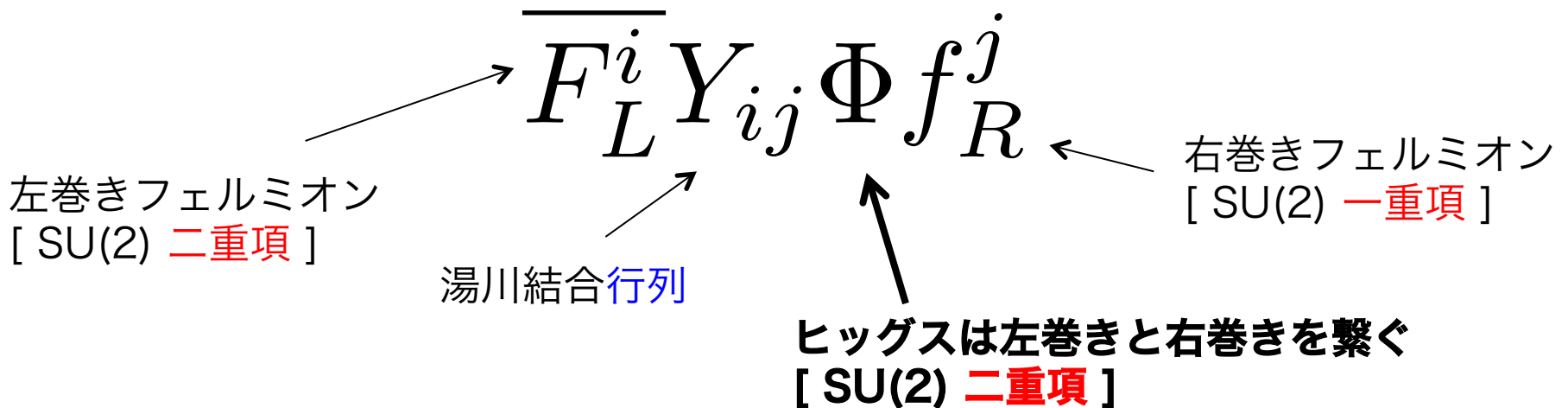
ヒッグス結合のずれは
2つめのヒッグスを示唆

二重項ヒッグス場

$\rho \approx 1$ を保つ

例2) 複数の二重項 $(I=1/2, Y=-1/2)$ を含めて拡張

二重項は特別な表現で湯川相互作用を持てる



電弱対称性が破れる前では左巻きと右巻きは**全く別の場**

二重項ヒッグス場

$\rho \approx 1$ を保つ

例2) 複数の二重項 $(I=1/2, Y=-1/2)$ を含めて拡張

二重項は特別な表現で湯川相互作用を持てる

$$\overline{F}_L^i Y_{ij} \Phi f_R^j$$

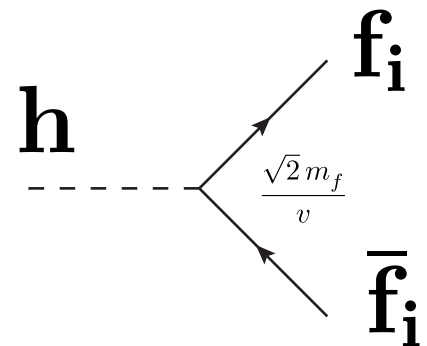
フェルミオン質量

$$m_f^i = \frac{Y_i v}{\sqrt{2}}$$

$$\langle \Phi \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ (v+h)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

真空期待値をとる
(フェルミオンの質量固有状態に回転)

湯川相互作用



フレーバーを変えない湯川相互作用

二重項ヒッグス場

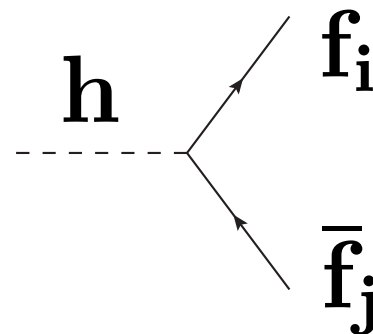
$$+\overline{F}_L^i (+Y^I_{ij} \Phi_I + Y^{II}_{ij} \Phi_{II}) f_R^j$$

$$\langle \Phi_I \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ (v_I + h_I)/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad \langle \Phi_{II} \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ (v_{II} + h_{II})/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{真空期待値をとる} \\ \text{(フェルミオンの質量固有状態に回転)} \end{array}$$

$$\overline{f}_L^i \left\{ \left(+\frac{\sqrt{2} m_f^i \delta_{ij}}{v} - \kappa_{II}^{ij} \frac{v_{II}}{v_I} \right) h_I + \kappa_{II}^{ij} h_{II} \right\} f_R^j$$

フレーバーを変えない
湯川相互作用

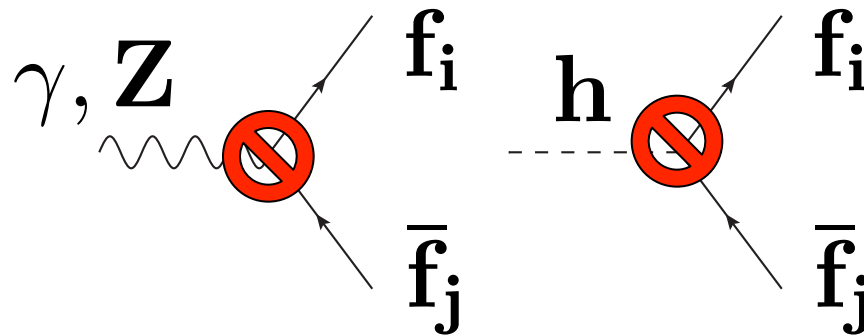
フレーバーを変える
湯川相互作用



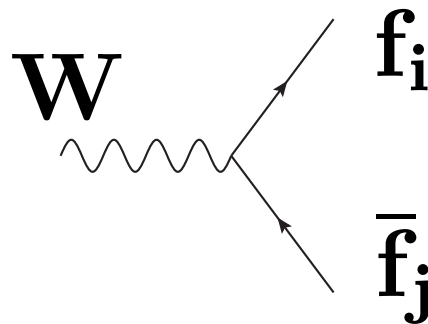
複数の二重項があると一般に湯川相互作用がフレーバーを破る

フレーバーを変える過程の抑制

標準模型はツリーレベルで世代を変えない

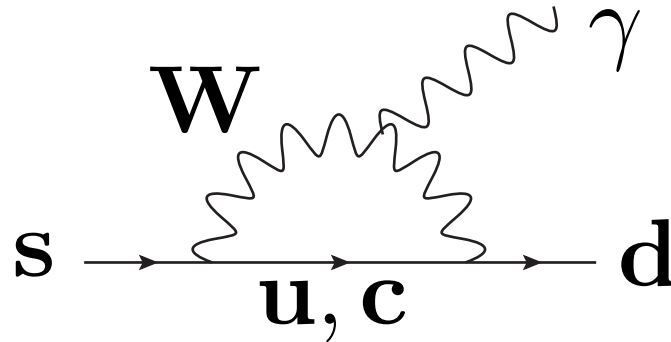


世代を変える相互作用はWボソンのみ



フレーバーを変える過程の抑制

Wを媒介した1-ループでフレーバーを破る



ナイーブな期待よりさらに

$$\frac{\Delta m^2}{m_W^2} \sim 10^{-4} \text{ だけ抑制される}$$

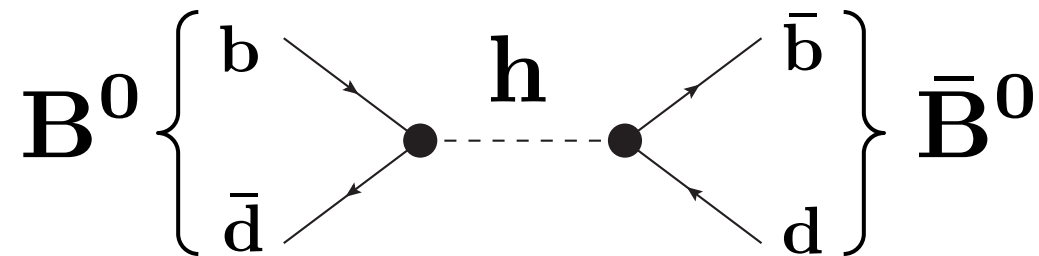


振幅レベルなのでさらに2乗される

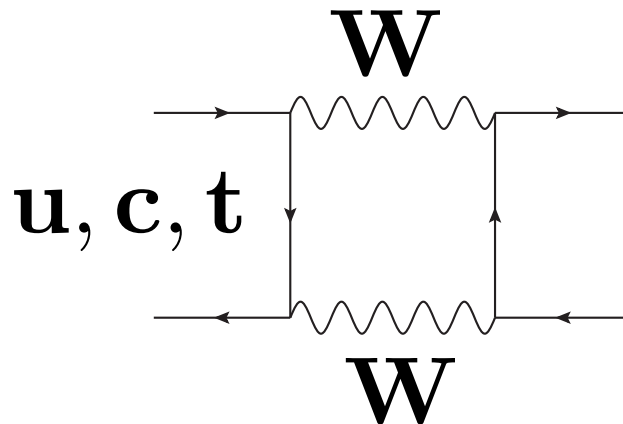
$$\begin{aligned} &\simeq \int_k \dots U_{u_i s}^* \frac{1}{k^2 - m_{u_i}^2} U_{u_i d} \dots \\ &\sim \int_k \dots \cos \theta \sin \theta \left\{ \frac{1}{k^2 - m_u^2} - \frac{1}{k^2 - m_c^2} \right\} \dots \\ &\approx \frac{\Delta m^2}{k^4} \quad (\Delta m^2 = m_c^2 - m_u^2) \end{aligned}$$

標準模型ではフレーバーを変える過程が強く抑制されている

ヒッグスがフレーバーを破ると



標準模型では 1 ループ + さらなる抑制



ツリーレベルでフレーバーを変えるヒッグスは禁止したい

二重項ヒッグス場

$\rho \approx 1$ を保つ

二重項_(I=1/2, Y=-1/2)ヒッグス2個

$$+\overline{F}_L^i (+Y^I_{ij} \Phi_I + Y^{II}_{ij} \Phi_{II}) f_R^j$$

↑
やりたいこと

じゃあ、どうやるか？

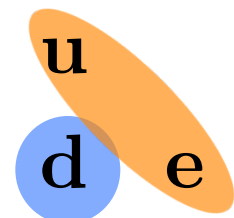
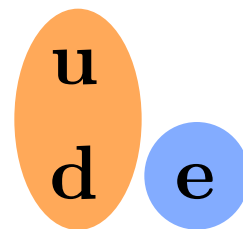
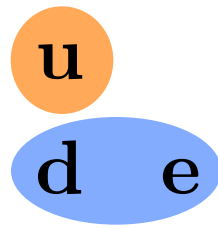
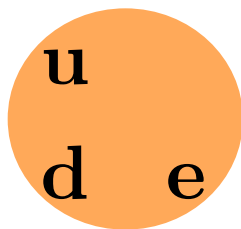
$$\Phi_I : \color{red}{+}, \quad \Phi_{II} : \color{blue}{-}, \quad F_L : \color{red}{+}, \quad f_R : \color{red}{+}$$

離散対称性を課したら出来る

二重項ヒッグス場

フェルミオンの組み合わせでいろんな可能性

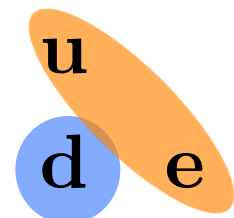
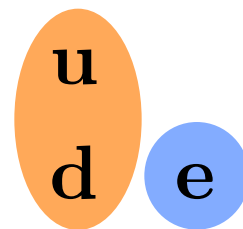
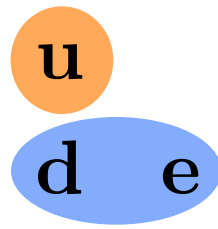
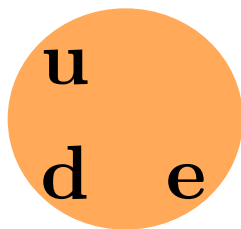
$$\begin{aligned}
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{u\ ij}^I \Phi_I + Y_{u\ ij}^I \text{ⓧ} \Phi_{II}) u_R^j \\
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{d\ ij}^I \Phi_I + Y_{d\ ij}^I \text{ⓧ} \Phi_{II}) d_R^j \\
 & + \overline{L}_L^i (+Y_{\ell\ ij}^I \Phi_I + Y_{\ell\ ij}^I \text{ⓧ} \Phi_{II}) \ell_R^j
 \end{aligned}$$



二重項ヒッグス場

フェルミオンの組み合わせでいろんな可能性

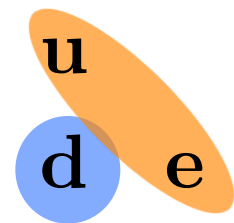
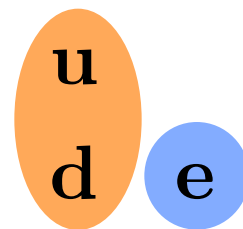
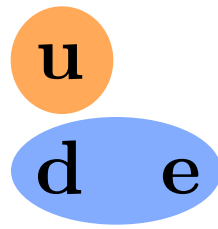
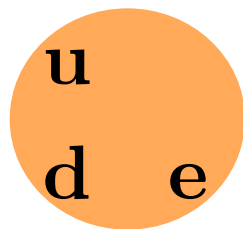
$$\begin{aligned}
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{u\ ij}^I \Phi_I + Y_{u\ ij}^I \text{ⓧ} \Phi_{II}) u_R^j \\
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{d\ ij}^I \text{ⓧ} \Phi_I + Y_{d\ ij}^{II} \Phi_{II}) d_R^j \\
 & + \overline{L}_L^i (+Y_{\ell\ ij}^I \text{ⓧ} \Phi_I + Y_{\ell\ ij}^{II} \Phi_{II}) \ell_R^j
 \end{aligned}$$



二重項ヒッグス場

フェルミオンの組み合わせでいろんな可能性

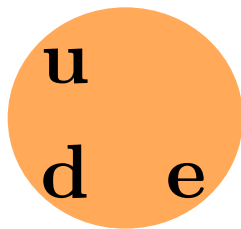
$$\begin{aligned}
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{u ij}^I \Phi_I + Y_{u ij}^I \text{⊗} \Phi_{II}) u_R^j \\
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{d ij}^I \Phi_I + Y_{d ij}^I \text{⊗} \Phi_{II}) d_R^j \\
 & + \overline{L}_L^i (+Y_{\nu ij}^I \Phi_I + Y_{\ell ij}^{II} \Phi_{II}) \ell_R^j
 \end{aligned}$$



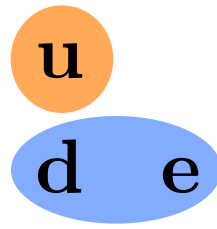
二重項ヒッグス場

フェルミオンの組み合わせでいろいろな可能性

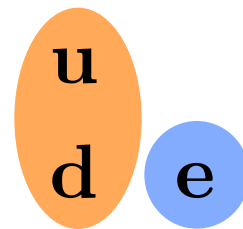
$$\begin{aligned}
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{u ij}^I \Phi_I + Y_{u ij}^I \text{ⓧ} \Phi_{II}) u_R^j \\
 & + \overline{Q}_L^i (+Y_{d ij}^I \text{ⓧ} \Phi_I + Y_{d ij}^{II} \Phi_{II}) d_R^j \\
 & + \overline{L}_L^i (+Y_{\ell ij}^I \Phi_I + Y_{\ell ij}^I \text{ⓧ} \Phi_{II}) \ell_R^j
 \end{aligned}$$



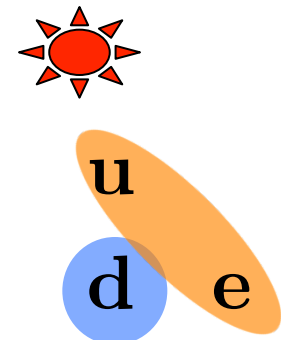
Type – I



– II



– X



– Y

二重項ヒッグス場

フェルミオンの組み合わせでいるんな可能性

もっとも良く調べられて2HDM
(超対称標準模型が予言する湯川)

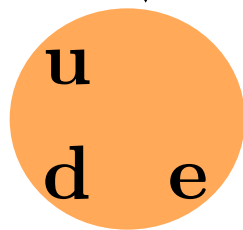
レプトンに特化した2HDM
(ゲージ化されたタイプIIIシーソー模型、
AKS輻射シーソー模型、A4模型、T7模型)

標準模型から湯川結合が
ユニバーサルにズれる
(ニュートリノ特化2HDM等)

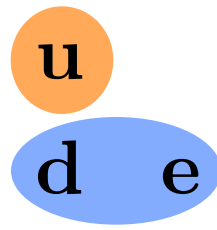
ディラックνに関する拡張

マヨラナνに関する拡張

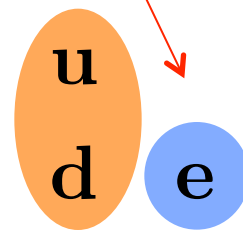
Not yet thought



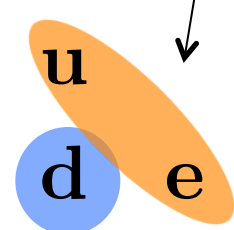
Type – I



– II



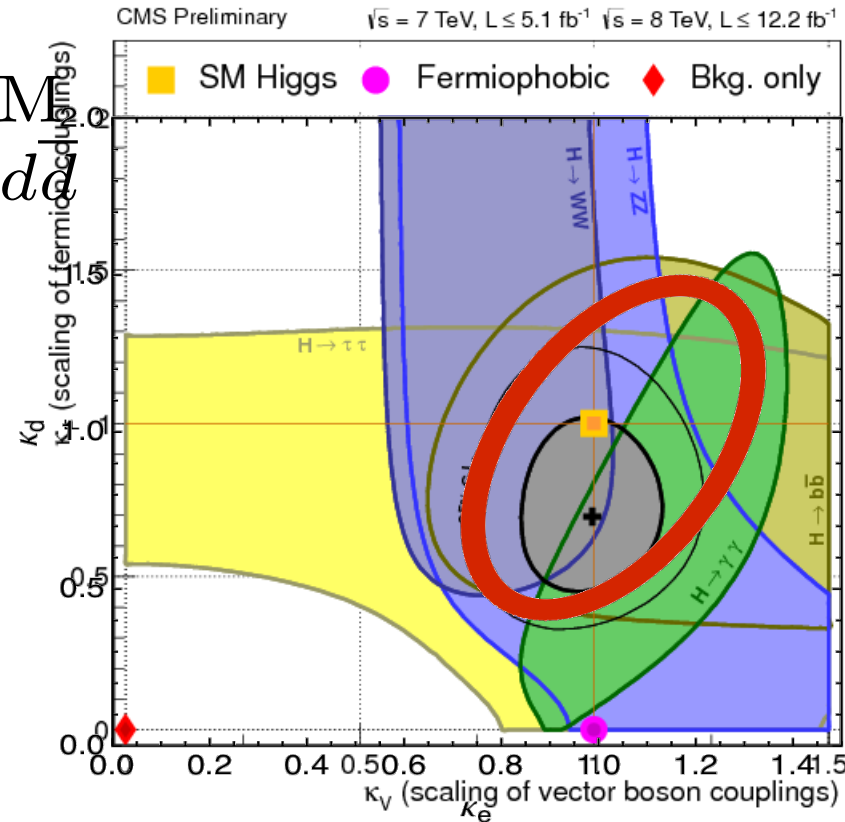
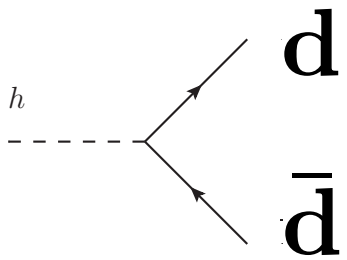
– X



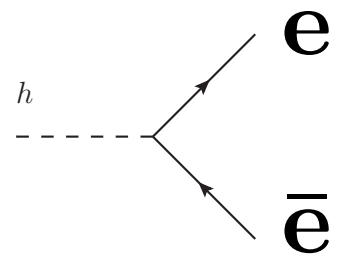
– Y

$$\kappa_x = \kappa_V \mp \frac{v_{II}}{v_I} \sqrt{1 - \kappa_V^2} \quad \kappa_y = \kappa_V \pm \frac{v_I}{v_{II}} \sqrt{1 - \kappa_V^2}$$

$$\kappa_d \equiv \lambda_{h\bar{d}d} + \lambda_{hF\bar{d}d}^{\text{SM}}$$

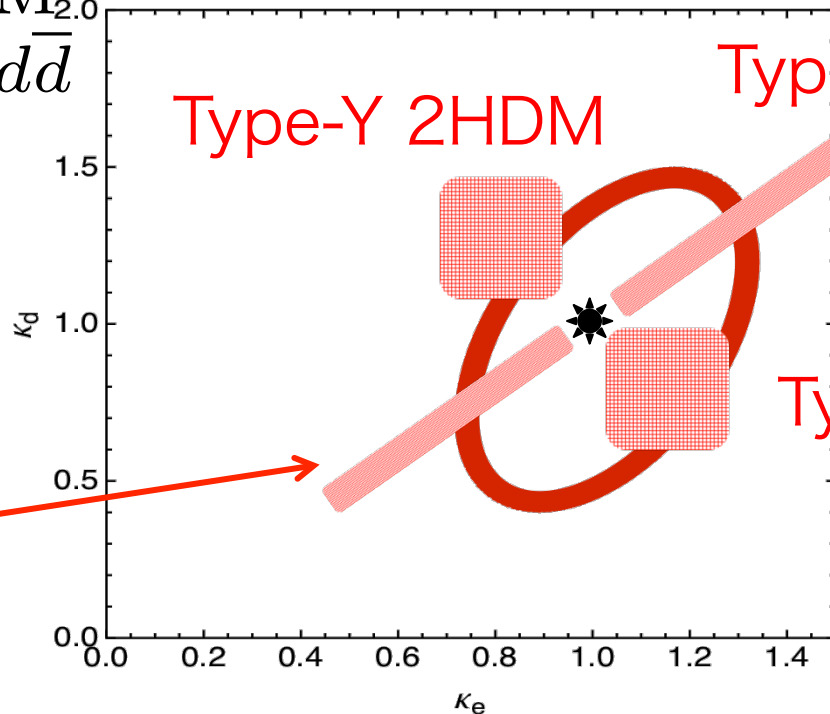
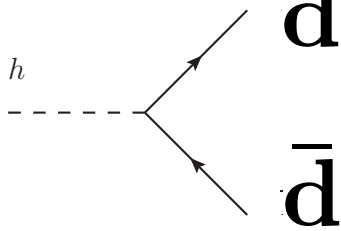


$$\kappa_e \equiv \lambda_{h\bar{e}e} + \lambda_{h\nu\bar{e}e}^{\text{SM}}$$



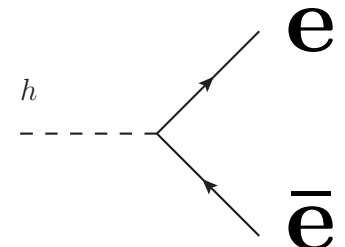
ヒッグス結合の独立な測定でモデルを区別できる

$$\kappa_d = \lambda_{hd\bar{d}} / \lambda_{hd\bar{d}}^{\text{SM}_{2.0}}$$



Type-I 2HDM
の予言する典型的な領域

$$\kappa_e = \lambda_{he\bar{e}} / \lambda_{he\bar{e}}^{\text{SM}}$$

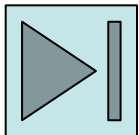


2HDMの制限

2HDMに現れるヒッグスの兄弟からの制限

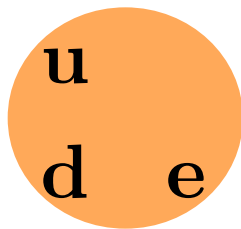
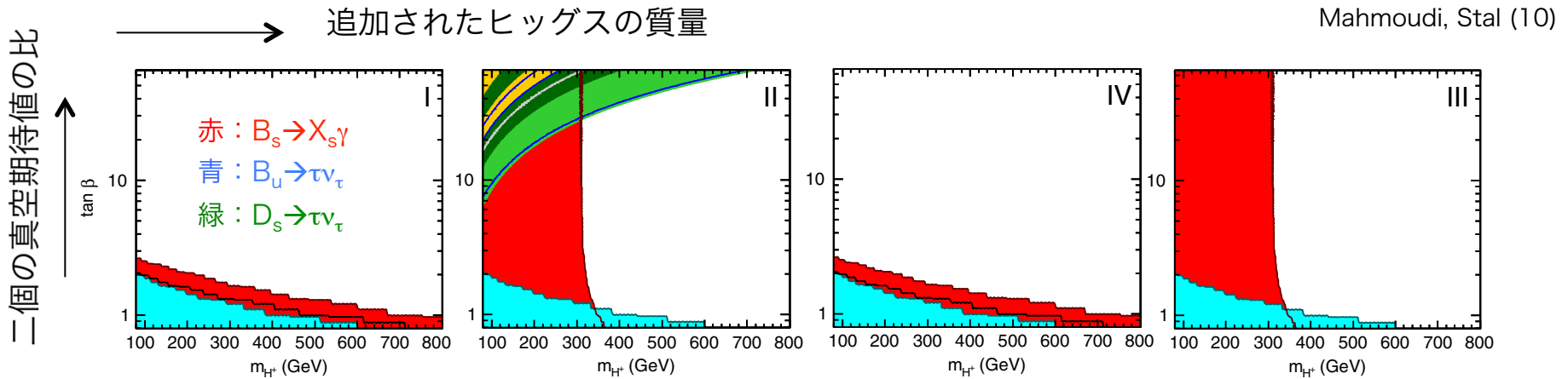
(もし時間があったら)

(たぶん、ない)

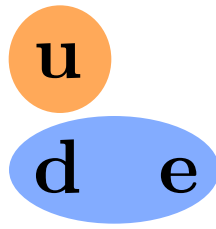


二重項ヒッグス場

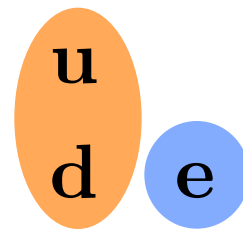
模型に依存してさまざまな制限



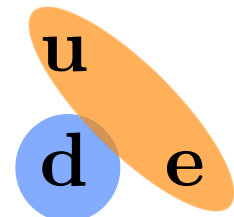
Type – I



– II



– X



– Y

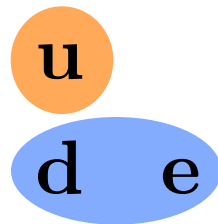
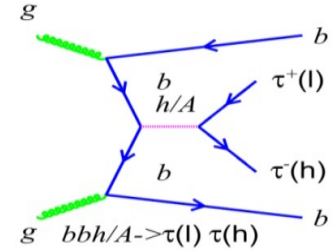
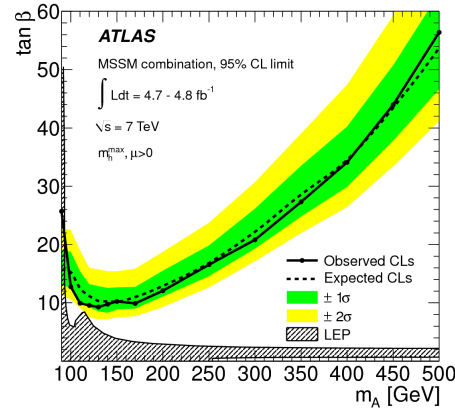
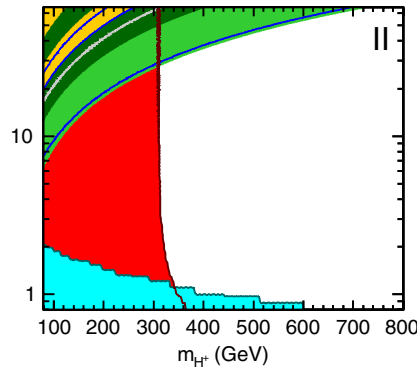
二重項ヒッグス場

模型に依存してさまざまな制限

二個の真空期待値の比

追加されたヒッグスの質量

赤: $B_s \rightarrow X_s \gamma$
 青: $B_u \rightarrow \tau \nu_\tau$
 緑: $D_s \rightarrow \tau \nu_\tau$

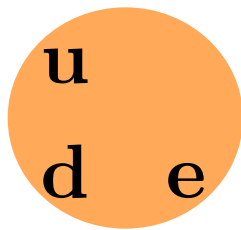
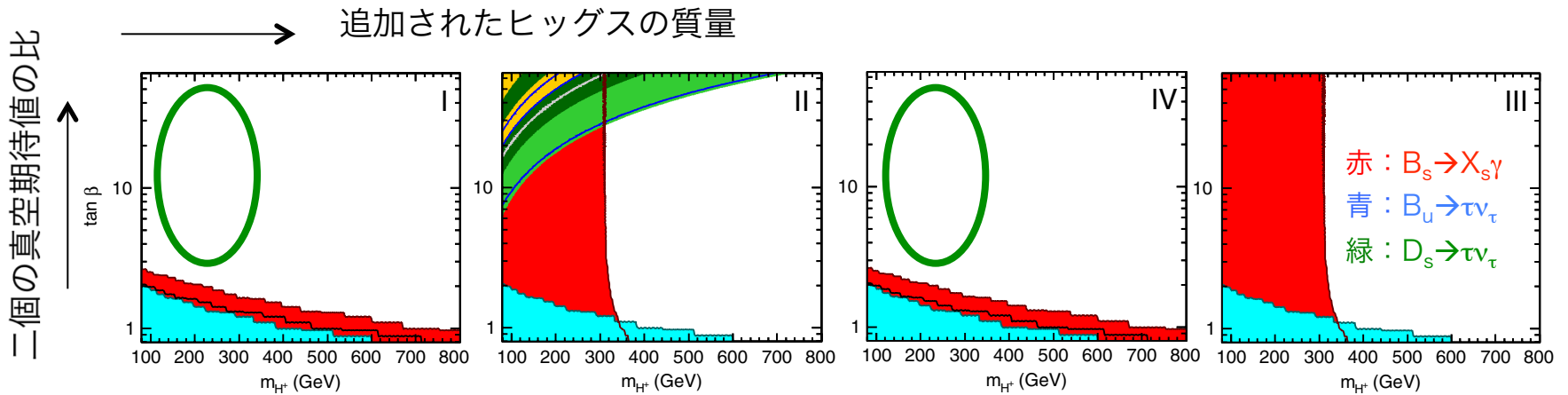


タイプIIはフレーバーからも
LHCからも強く制限された

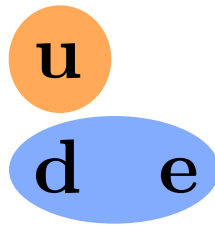
Type – I – II – X – Y

二重項ヒッグス場

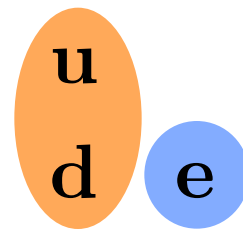
追加されたヒッグスが軽い可能性もある
(LHCで見えにくいがILCで見える物理)



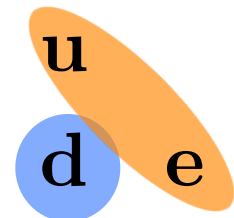
Type – I



– II



– X



– Y

まとめ

まとめ

❖ ヒッグスは軽かったか(重かったか)?

答えはお任せします。今後、明らかにされることか?

❖ どういう拡張ヒッグスモデルが許されるか?

電弱セクター、フレーバーで分類すると様々な可能性

→ 多様な新物理モデルと関係

→ ヒッグス結合のズレにパターン

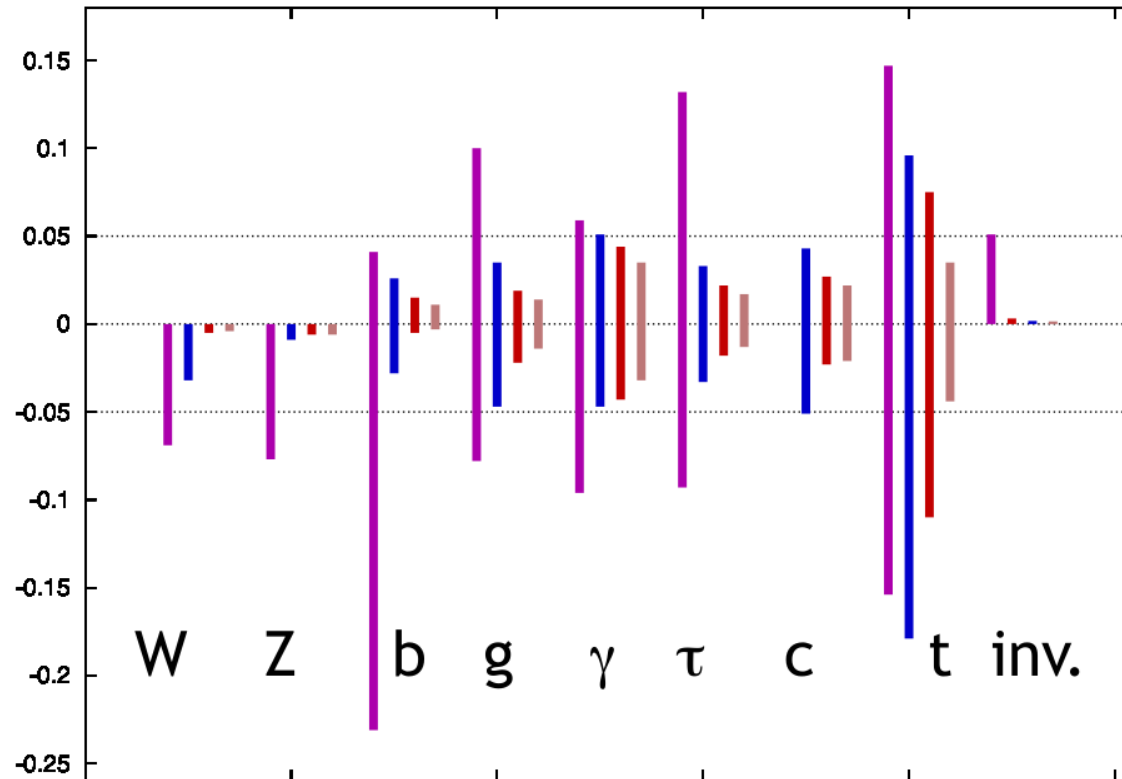
ILCにおけるヒッグス結合の精密測定が不可欠

ありがとうございました

予備スライド

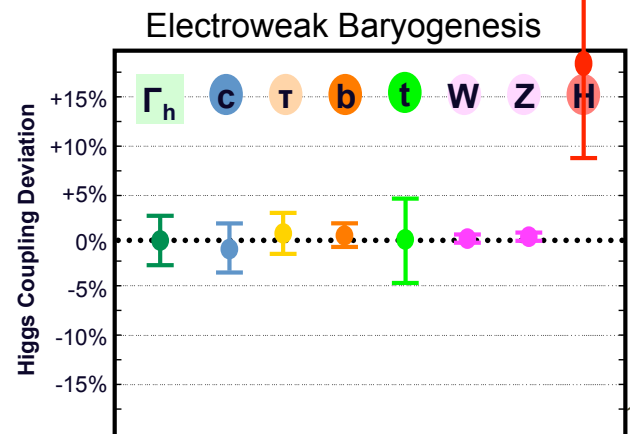
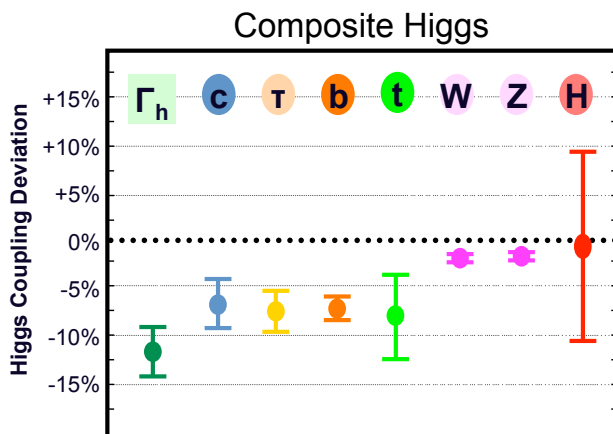
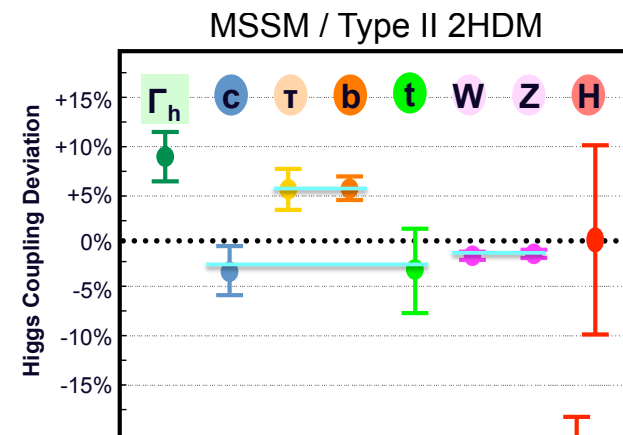
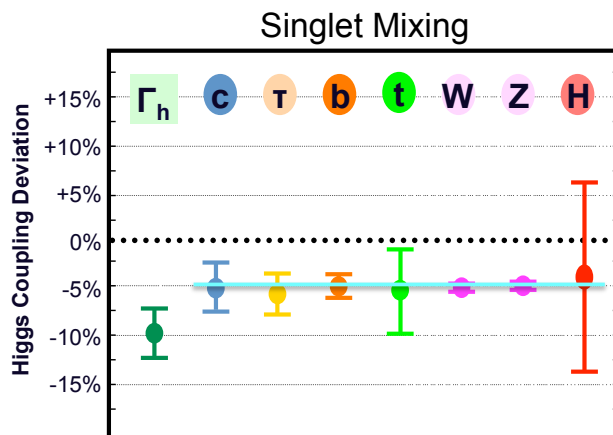
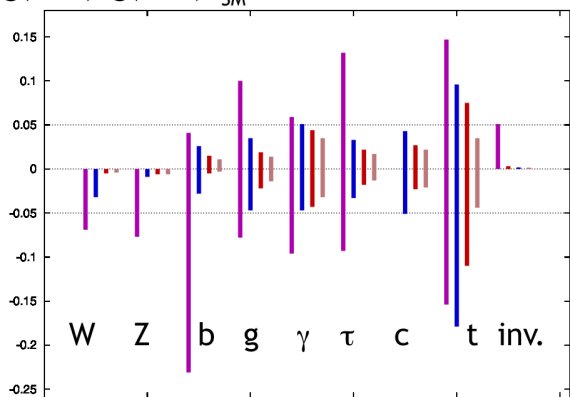
将来的なヒッグス結合の測定精度

$g(hAA)/g(hAA)|_{SM}^{-1}$ LHC/ILC1/ILC/ILCTeV



拡張ヒッグス模型の予言

$g(hAA)/g(hAA)|_{SM}-1$ LHC/ILC1/ILC/ILCTeV



ラグランジアン

任意のアイソスピン j , ハイパーチャージ $Y(=Q-T_3)$ [$m=T_3$] の VEV を持つ ヒッグス 場

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= |D_\mu \phi_{j,m}|^2 = |\{\partial_\mu + ieQA_\mu + ig_Z(T_3 - s_W^2 Q)Z_\mu + i\frac{g}{\sqrt{2}}(T_-W_\mu^+ + T_+W_\mu^-)\}\phi_{j,m}|^2 \\ &= |\{\partial_\mu + ieQ_m A_\mu + ig_Z(m - s_W^2 Q_m)Z_\mu\}\phi_{j,m} \\ &\quad + i\frac{g}{\sqrt{2}}\sqrt{(j+m)(j+1-m)}W_\mu^+ \phi_{j,m-1} + i\frac{g}{\sqrt{2}}\sqrt{(j-m)(j+1+m)}W_\mu^- \phi_{j,m+1}|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_h &\text{---} W_\mu^+ \\ &\text{---} W_\nu^- \\ &= i \frac{2m_W^2}{v} g_{\mu\nu} \\ \phi_h &\text{---} Z_\mu \\ &\text{---} Z_\nu \\ &= i \frac{2m_Z^2}{v} g_{\mu\nu} \end{aligned}$$

ヒッグスのゲージ結合と
ゲージボソン質量の比例関係

SU(2)“アイソスピン”のまとめ

$$[J^a, J^b] = i \epsilon^{abc} J^c \quad \begin{cases} \mathbf{J}^2 |j, m\rangle = j(j+1) |j, m\rangle \\ J^3 |j, m\rangle = m |j, m\rangle \\ j = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots \\ m = -j, -j+1, \dots, j-1, j \end{cases}$$

昇降演算子 $J^\pm \equiv J_1 \pm i J_2$ $[J^3, J^\pm] = \pm J^\pm$

$J^\pm |j, m\rangle = \sqrt{(j \mp m)(j + 1 \pm m)} |j, m \pm 1\rangle$ $[J^+, J^-] = 2 J^3$

j_3 の空間として(2j+1)次元表現

$$|j, m\rangle = \phi_{j,m} = \begin{pmatrix} \varphi_{j,j} \\ \varphi_{j,j-1} \\ \dots \\ \varphi_{j,-j+1} \\ \varphi_{j,-j} \end{pmatrix}$$