

ヒッグス物理入門

柳生 慶

東京理科大 (神楽坂)



2025年9月24日, 東京理科大学 野田キャンパス

ヒッグス物理入門

LETUS



柳生 慶

東京理科大 (神楽坂)

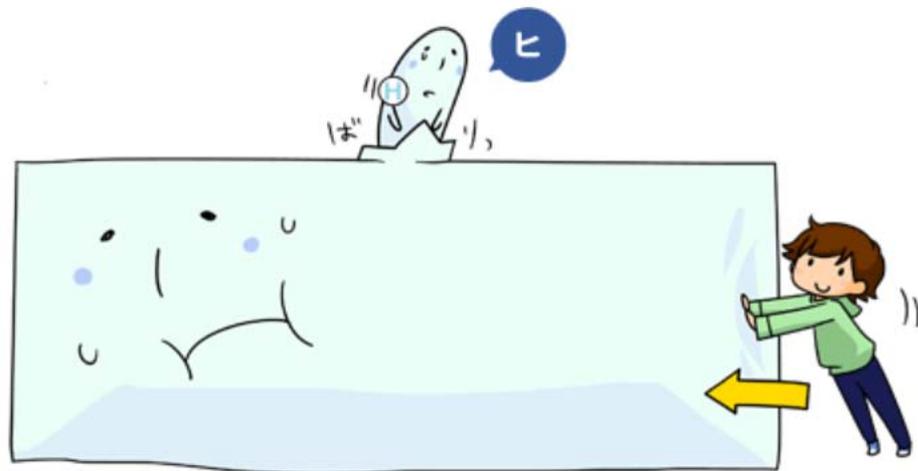
BOX



2025年9月24日, 東京理科大学 野田キャンパス

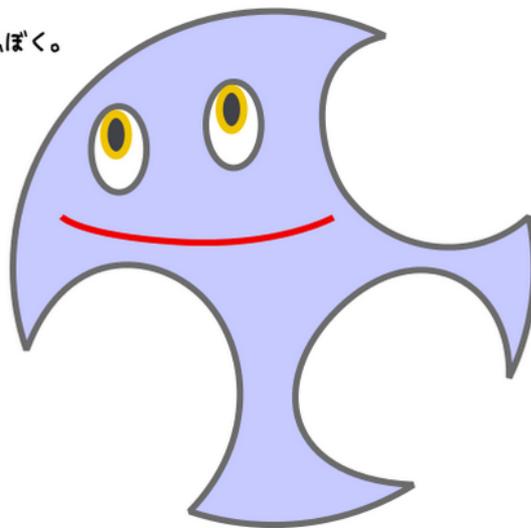


「ヒッグスたん」

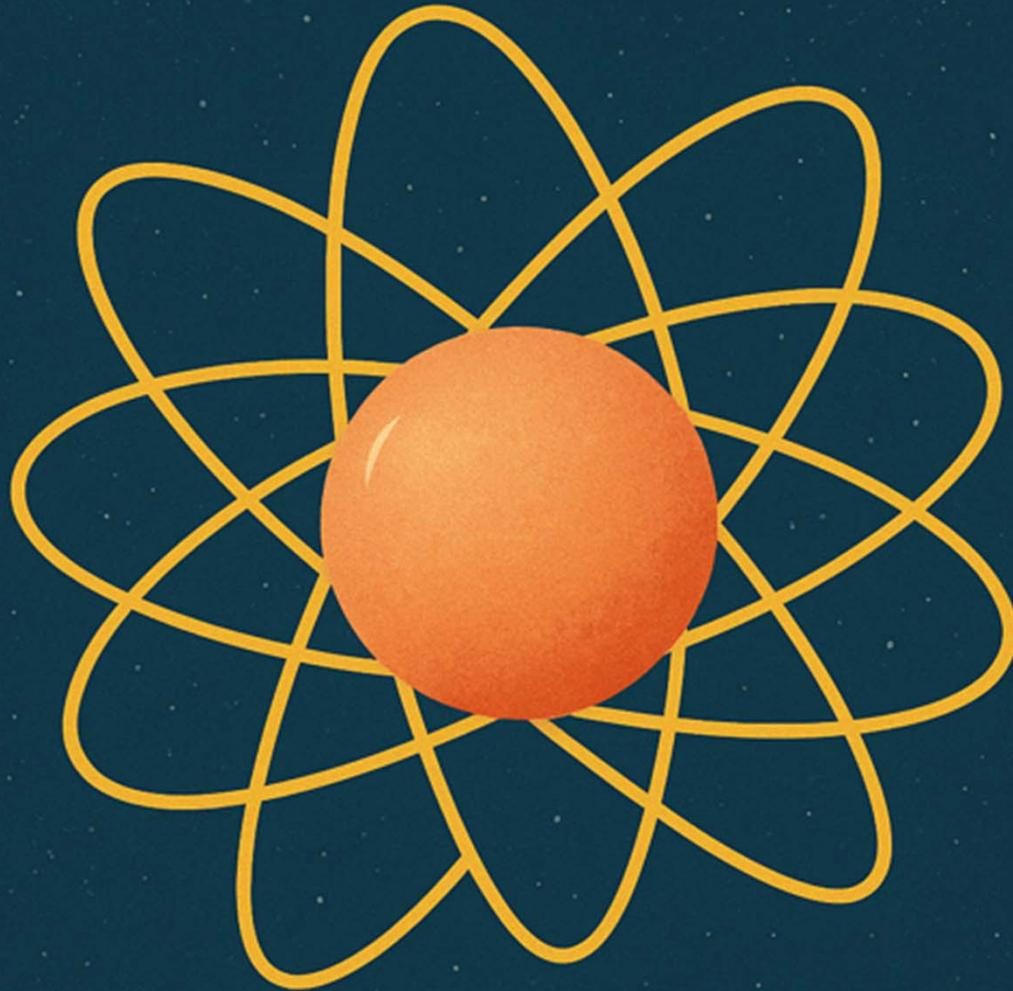


「ヒッグス君」

それでも強く
生きていくんだ、ぼく。

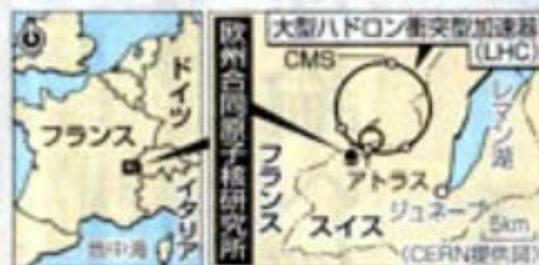


「ヒッグスぬいぐるみ」



HIGGS BOSON

万物に質量与えた「神の粒子」



万物に質量を与える「ヒッグス粒子」とみられる新しい素粒子を
 したと、欧州合同原子核研究所(CERN、セルン)の実験チーム
 日、発表した。ヒッグス粒子の特徴を示しており、「発見」はほぼ
 になった。「神の粒子」とも呼ばれるヒッグス粒子の発見で、物理
 標準理論で予言されていた素粒子が出そろえ、宇宙の成り立ちの解
 もつながらる画期的成果だ。

国際チーム 99.99999%

ヒッグス粒子(ほぼ)確認

年内断定へ追加実験
 実験チームは、東京
 大や名古屋大など日本
 の十六機関も参加する
 「アトラス」チーム
 と、欧米中心の「CM
 S」チーム。
 両チームは、ほぼ光
 速まで加速した陽子同
 士を一千兆回以上衝突
 させ、衝突で生まれる
 粒子や光を観測し、ヒ
 ックス粒子の痕跡を探
 る約・99.999
 もに上回った。

東京新聞

◆中日新聞東京本社
 東京都千代田区外神田二丁目1番4号
 〒100-8085 電話 03(5561)2111

新ドラマ 7月8日 日テレ



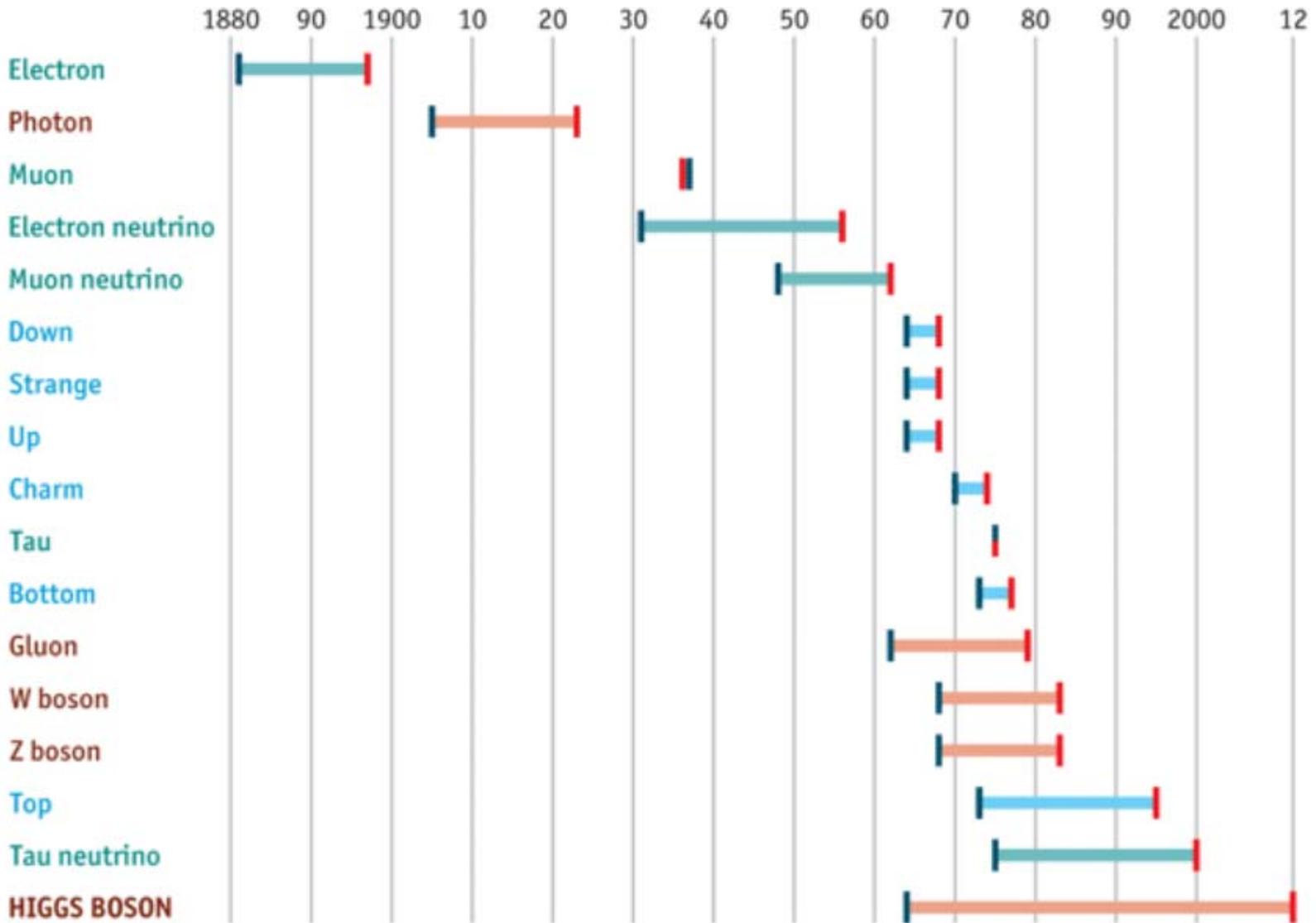
紙面について
 ●電話 03-6910-2201
 (土休祝日除く)
 9:30-17:30
 ●FAX

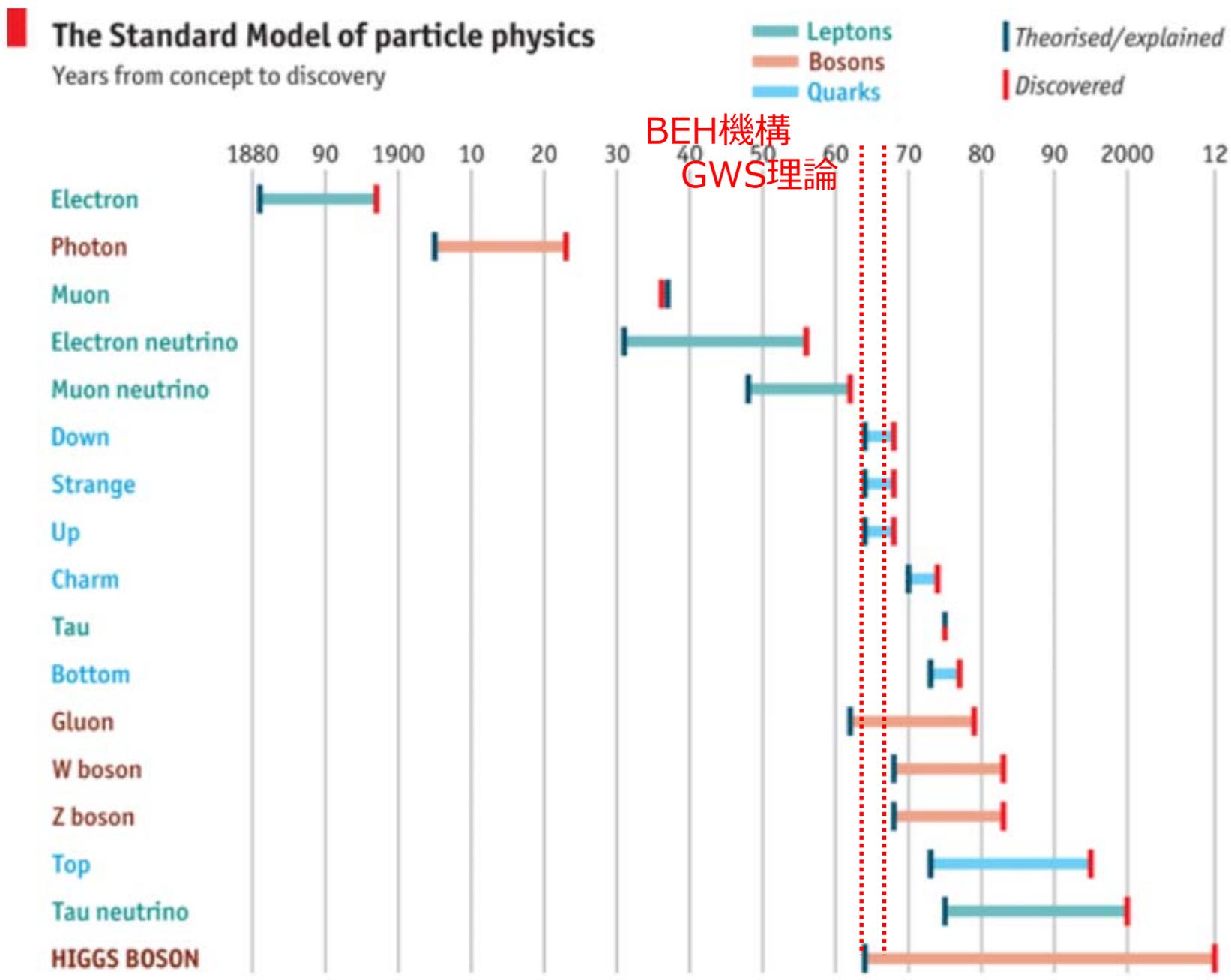
The Standard Model of particle physics

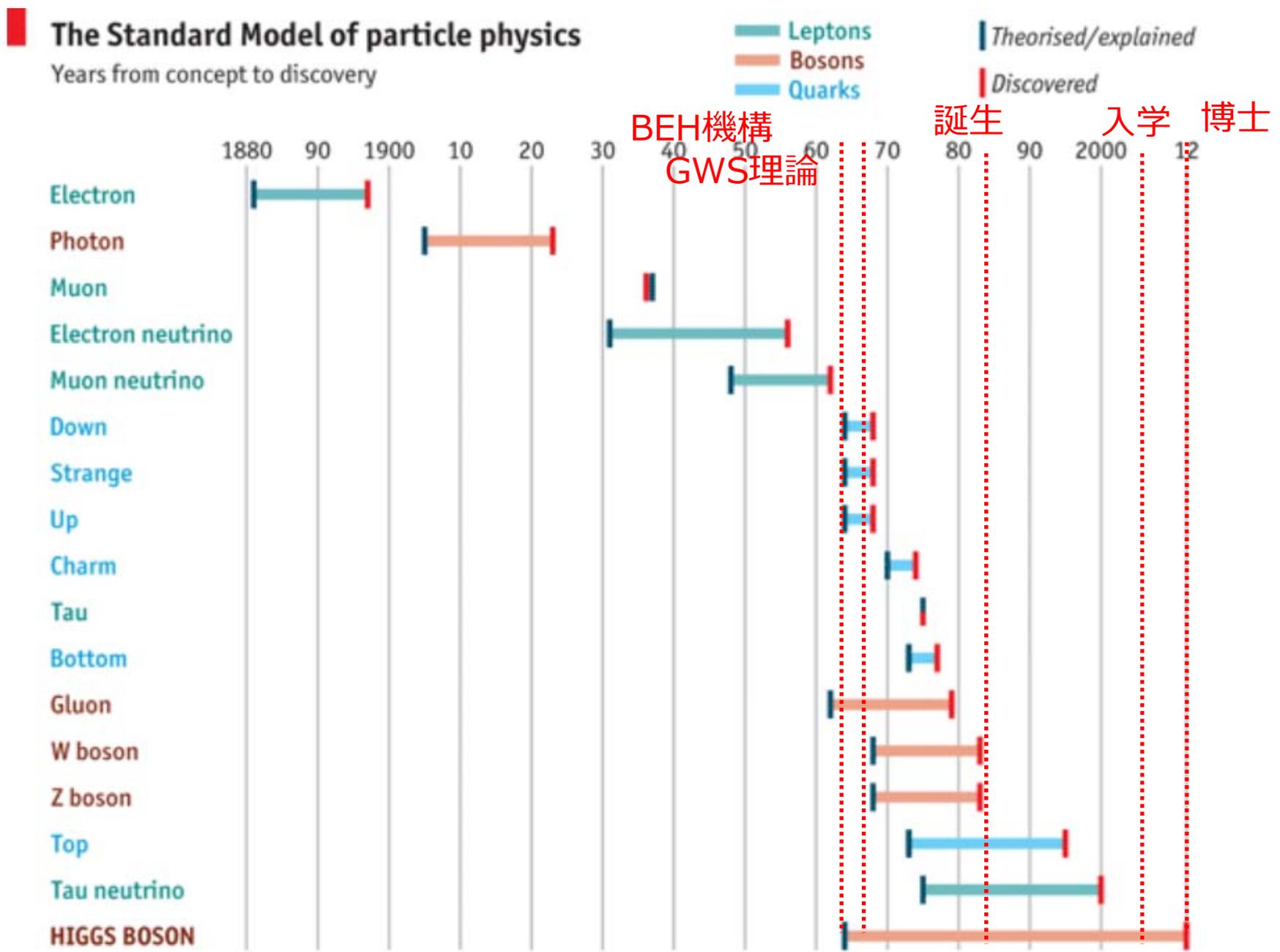
Years from concept to discovery

Leptons
Bosons
Quarks

Theorised/explained
Discovered







Source: The Economist

目次

I. イントロダクション

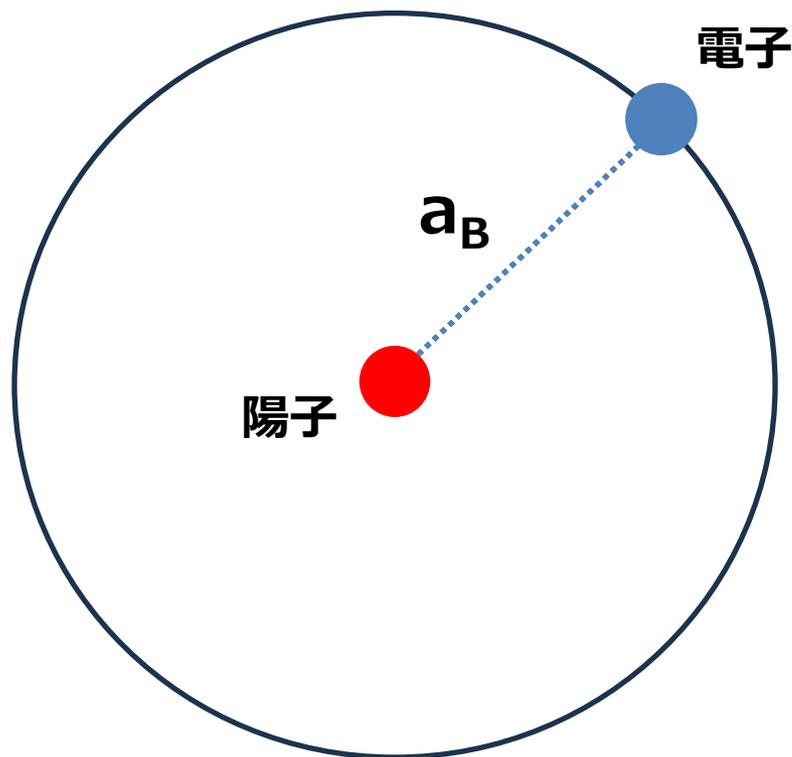
II. なぜヒッグス粒子？

III. 標準理論のヒッグス粒子

IV. ヒッグス物理と標準理論を超える新物理

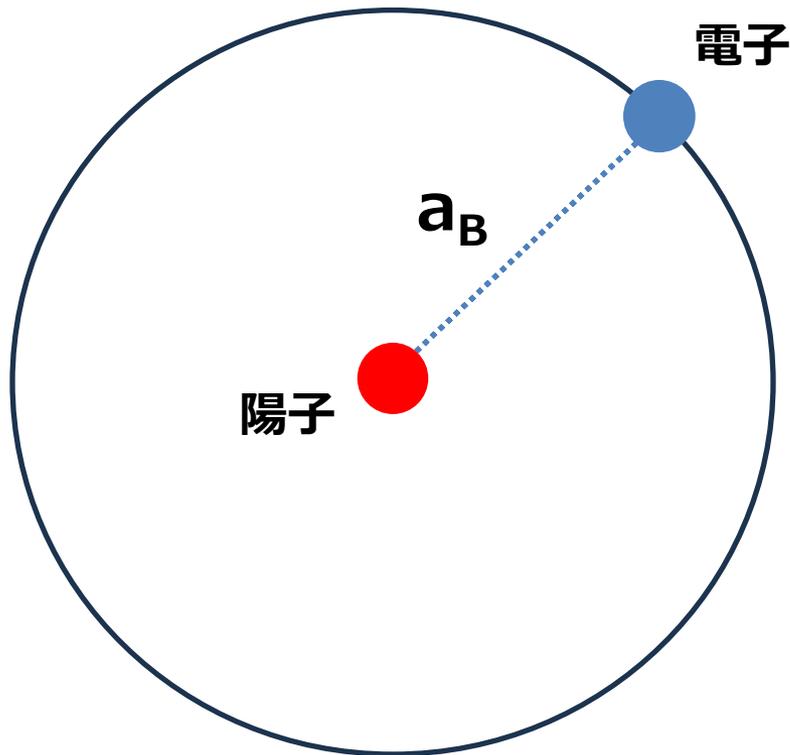
V まとめ

ヒッグス粒子がなかったら？



$$a_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2}$$

ヒッグス粒子がなかったら？



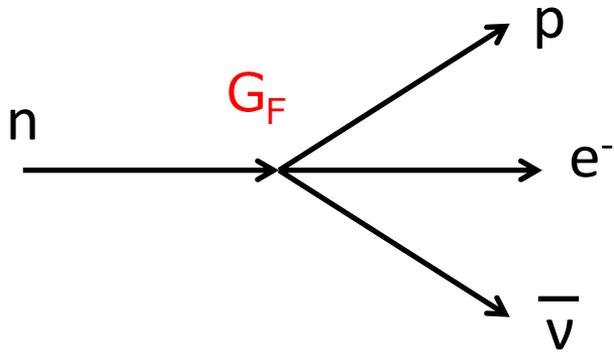
$$a_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2}$$

$$\longrightarrow \infty$$

$m_e \rightarrow 0$

原子が存在できない。

β 崩壊



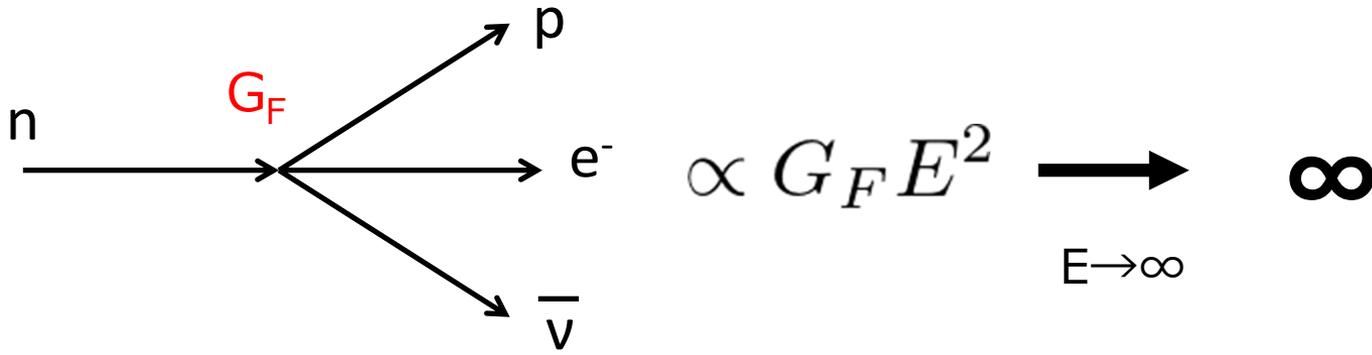
G_F : フェルミ定数 $\sim 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

$$\propto G_F E^2 \xrightarrow{E \rightarrow \infty} \infty$$

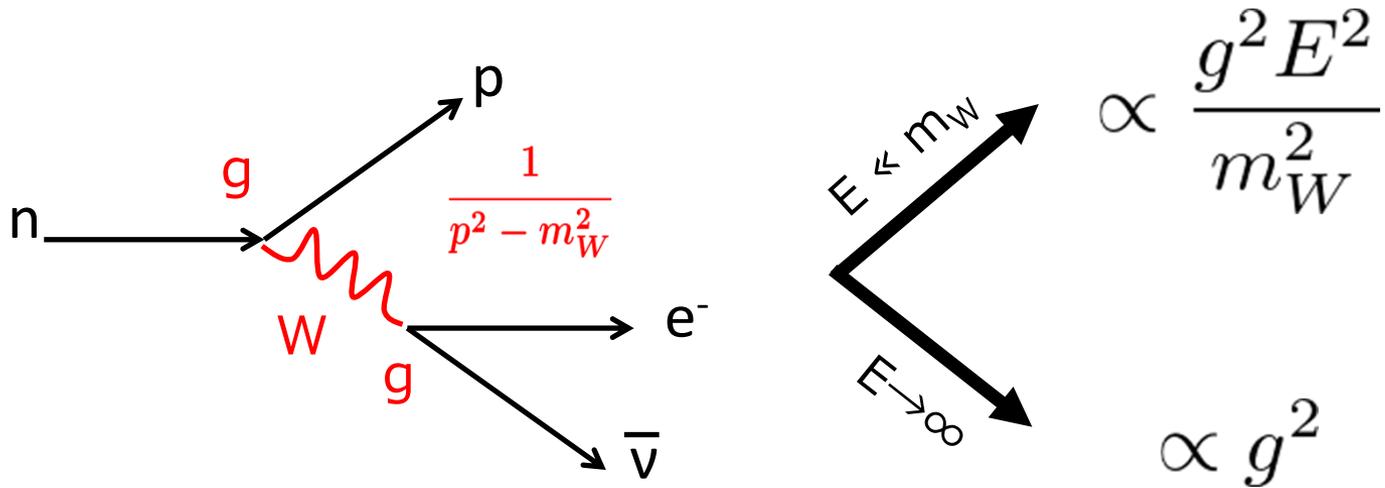


β 崩壊

G_F : フェルミ定数 $\sim 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

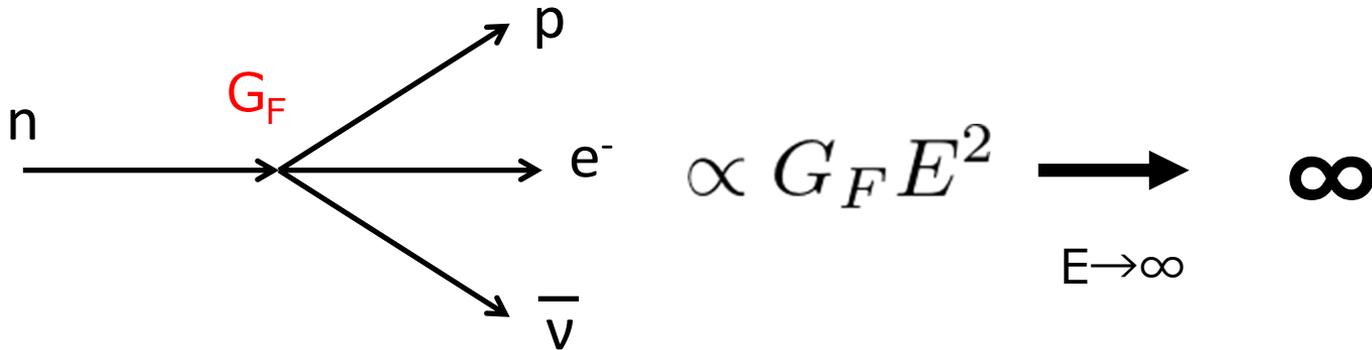


ゲージ理論

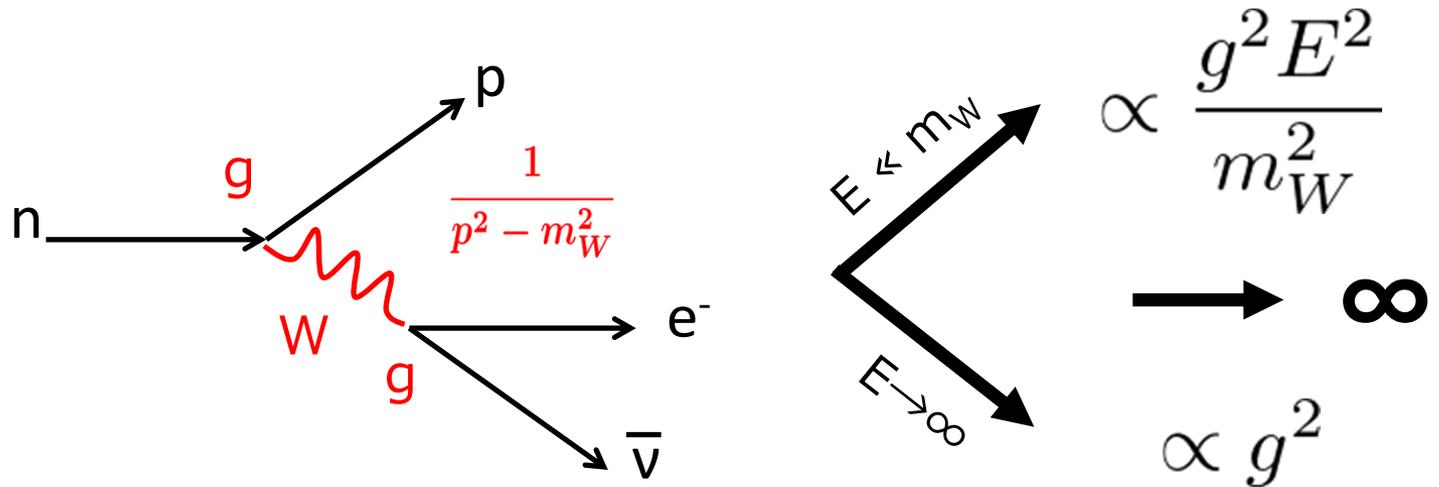


β 崩壊

G_F : フェルミ定数 $\sim 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$



ゲージ理論



ゲージボソンの質量は対称性により禁止されている。

$$N_n(t) \propto e^{-t/\tau_n}$$

Simplified BBN estimate: Y_p as a function of neutron lifetime
(assumes $t_{\text{freeze}}=1$ s, $t_{\text{nuc}}=180$ s, $T_f=0.8$ MeV)

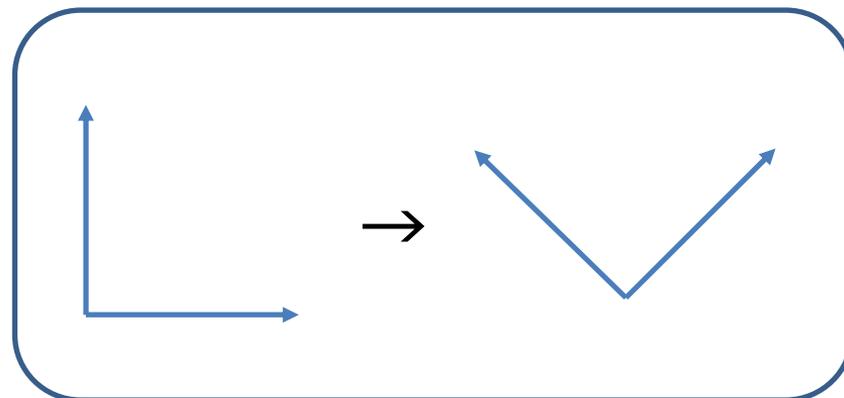


素粒子物理学

登場人物 (場)



対称性 (ローレンツ対称性×内部対称性)

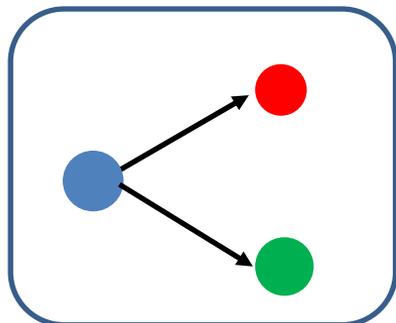


×

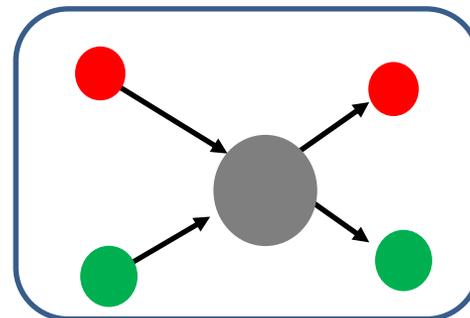


\mathcal{L}

崩壊



散乱



スカラー量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$

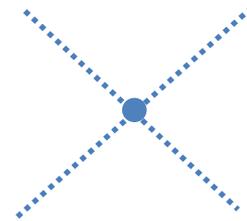
□ 対称性：大局的 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha} \phi$

□ ラグランジアン $\mathcal{L} = (\partial^\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$

□ 運動方程式 $(\partial^2 + m^2 + \lambda |\phi|^2) \phi = 0$

• $\lambda \rightarrow 0$ Klein-Gordon方程式

• $\lambda \neq 0$ 非線形 Klein-Gordon方程式



スカラー量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$

□ 対称性：局所 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha(x)} \phi$

□ ラグランジアン $\mathcal{L} = (\partial^\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi) - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$

スカラー量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$

□ 対称性：局所 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha(x)} \phi$

□ ラグランジアン $\mathcal{L} = \underline{(\partial^\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi)} - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$

スカラー量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$

□ 対称性：局所 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha(x)} \phi$

□ ラグランジアン $\mathcal{L} = \underline{(\partial^\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi)} - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$

$$\partial_\mu \phi \rightarrow \partial_\mu [e^{i\alpha(x)} \phi(x)] = e^{i\alpha(x)} [\partial_\mu \phi + \underline{i(\partial_\mu \alpha) \phi}]$$

スカラー-量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$

□ 対称性：局所 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha(x)} \phi$

□ ラグランジアン $\mathcal{L} = \underline{(\partial^\mu \phi)^* (\partial_\mu \phi)} - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$

$$\partial_\mu \phi \rightarrow \partial_\mu [e^{i\alpha(x)} \phi(x)] = e^{i\alpha(x)} [\partial_\mu \phi + \underline{i(\partial_\mu \alpha) \phi}]$$

$$\Rightarrow D^\mu \phi \equiv (\partial^\mu - ieA^\mu) \phi \rightarrow e^{i\alpha(x)} [\partial^\mu \phi + \underline{i(\partial^\mu \alpha) \phi - ieA'^\mu \phi}]$$

$$\Rightarrow A^\mu \rightarrow A'^\mu = A^\mu + \frac{1}{e} (\partial^\mu \alpha) \quad = -ieA'^\mu \phi$$

スカラー量子電磁力学

□ ラグランジアン

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

$$\mathcal{L} = (D^\mu \phi)^* (D_\mu \phi) - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$$

スカラー量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$, ゲージ場 $A_\mu(x)$

□ 対称性：局所 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha(x)} \phi$

$$A^\mu \rightarrow A'^\mu = A^\mu + \frac{1}{e}(\partial^\mu \alpha)$$

□ ラグランジアン

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

$$\mathcal{L} = (D^\mu \phi)^* (D_\mu \phi) - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$$

スカラー量子電磁力学

□ 登場人物：複素スカラー場 $\phi(x)$, ゲージ場 $A_\mu(x)$

□ 対称性：局所 U(1) 対称性 $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha(x)} \phi$

$$A^\mu \rightarrow A'^\mu = A^\mu + \frac{1}{e}(\partial^\mu \alpha)$$

□ ラグランジアン

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

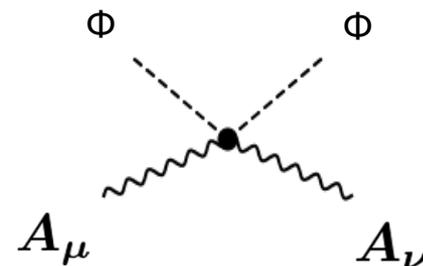
$$\mathcal{L} = (D^\mu \phi)^* (D_\mu \phi) - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2$$

□ 運動方程式

$$j^\nu = ie\phi^* D^\nu \phi + \text{c.c.}$$

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu \quad (D^\mu D_\mu + m^2 + \lambda|\phi|^2)\phi = 0$$

➡ Maxwell方程式



□ ゲージ場の質量は禁止される： $m_A^2 A_\mu A^\mu \rightarrow m_A^2 (A_\mu + \partial_\mu \alpha/e)(A^\mu + \partial^\mu \alpha/e)$

スカラー量子電磁力学

□ ラグランジアン

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

$$\mathcal{L} = \underbrace{(D^\mu \phi)^* (D_\mu \phi) - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}}_{\text{運動項}} - \underbrace{m^2 \phi^* \phi - \frac{\lambda}{2} (\phi^* \phi)^2}_{\text{-ポテンシャル}}$$

運動項

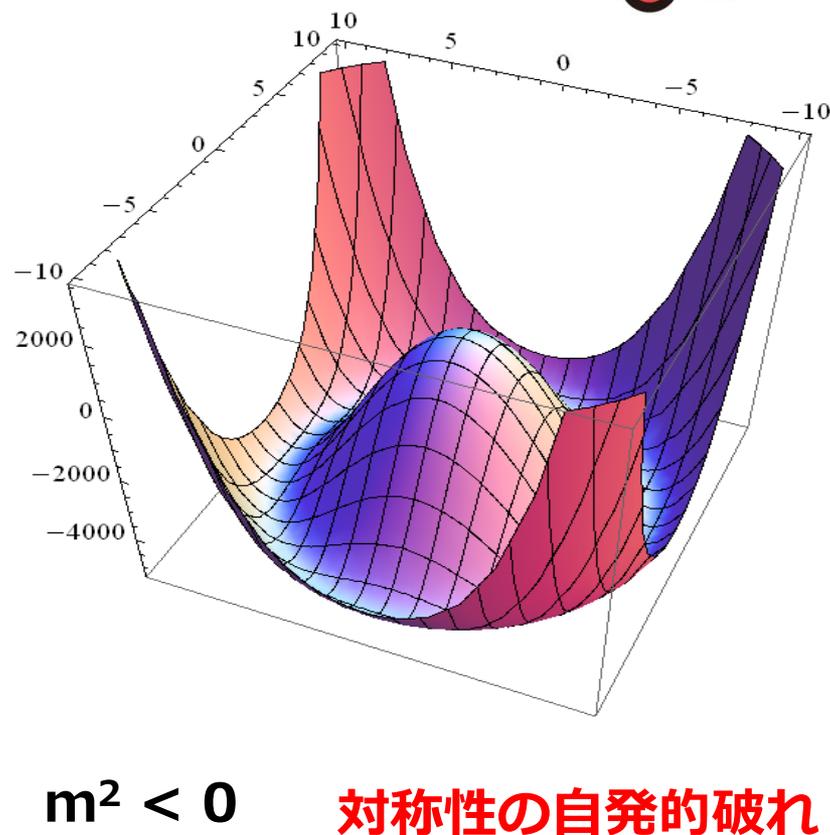
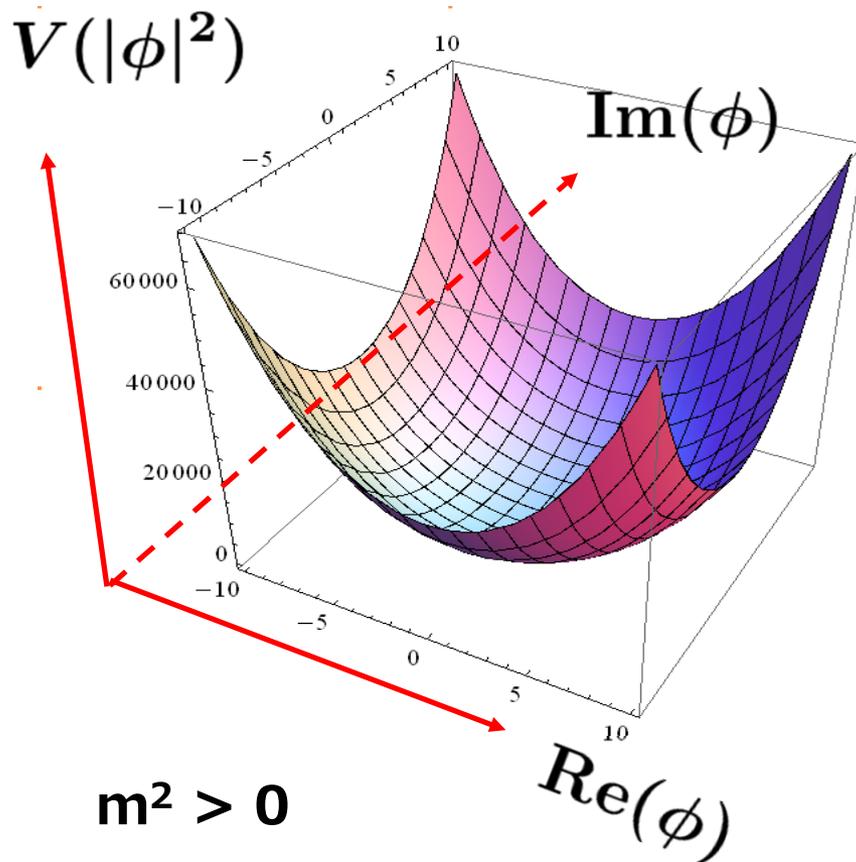
-ポテンシャル

$$V = m^2 |\phi|^2 + \frac{\lambda}{2} (|\phi|^2)^2$$

真空（基底状態）の構造を決定する。

スカラーポテンシャル

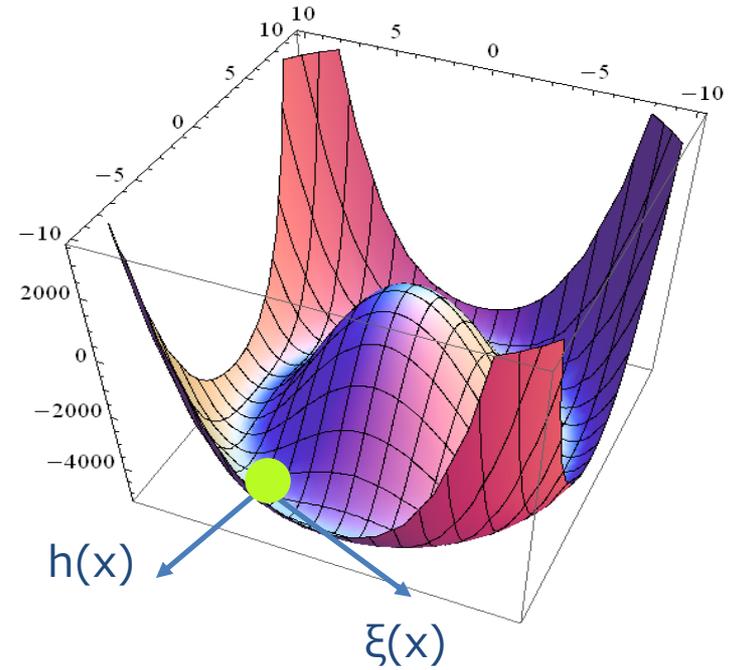
$$V = m^2 |\phi|^2 + \frac{\lambda}{2} (|\phi|^2)^2$$



SQED with SSB

□ 安定な真空の周りで場を展開 :

$$\phi(x) = [h(x) + v]e^{i\xi(x)/v}$$

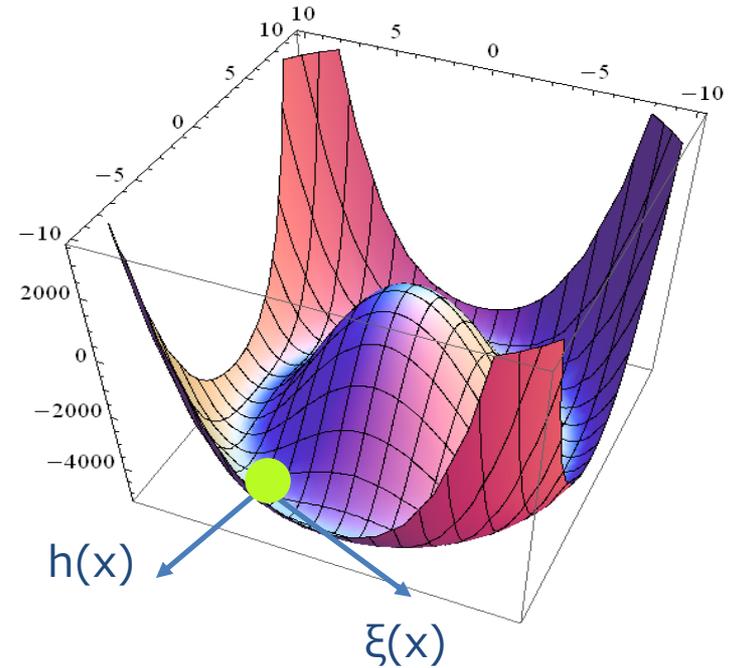


SQED with SSB

□ 安定な真空の周りで場を展開：

$$\phi(x) = [h(x) + v]e^{i\xi(x)/v}$$

南部・ゴールドストン (NG) ボソン



SQED with SSB

□ 安定な真空の周りで場を展開：

$$\phi(x) = [h(x) + v]e^{i\xi(x)/v}$$

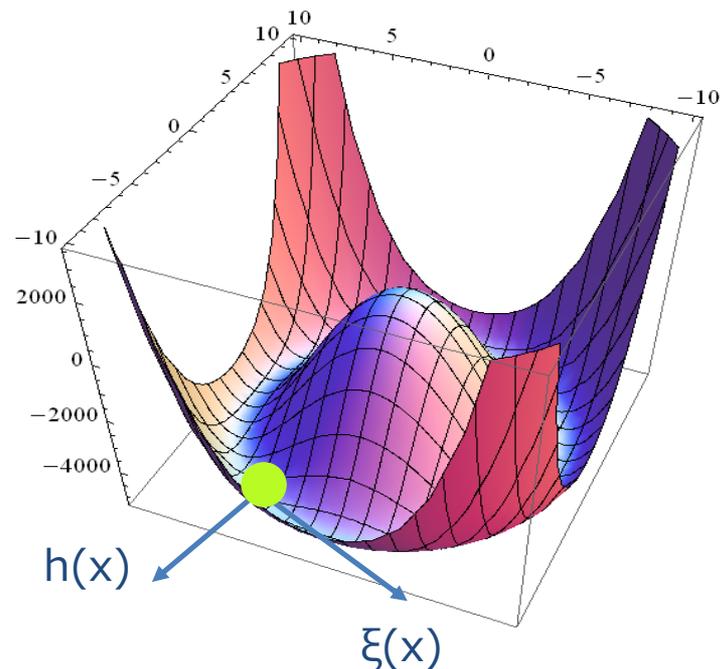
南部・ゴールドストン (NG) ボソン

$$\phi \rightarrow e^{i\alpha(x)} \phi$$

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha(x)$$

$$\phi \rightarrow e^{-\frac{i\xi(x)}{v}} \phi$$

$$A^\mu \rightarrow A^\mu - \frac{1}{ev} \partial^\mu \xi(x)$$



ゲージ不変性を使ってNGボソン ξ を消すことができる。自由度が消えた？

SQED with SSB

□ 安定な真空の周りで場を展開：

$$\phi(x) = [h(x) + v]e^{i\xi(x)/v}$$

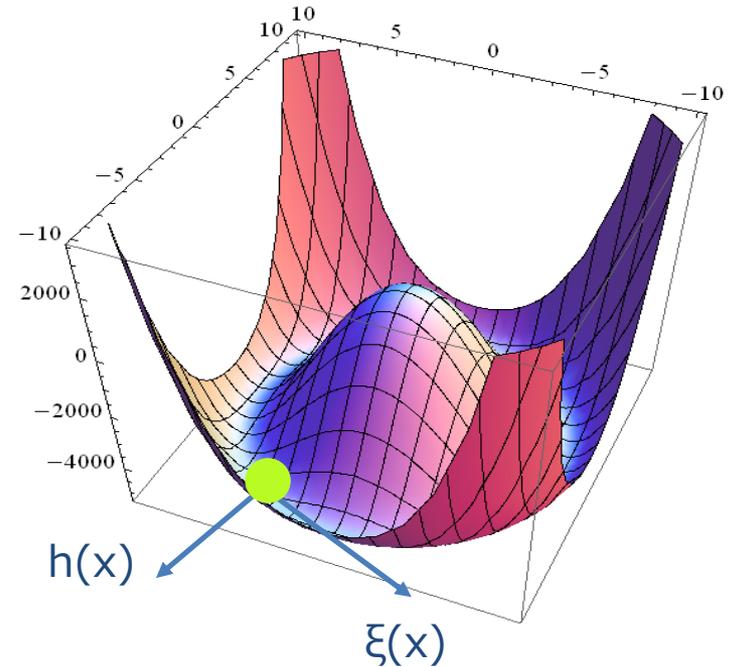
南部・ゴールドストン (NG) ボソン

$$\phi \rightarrow e^{i\alpha(x)} \phi$$

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha(x)$$

$$\phi \rightarrow e^{-\frac{i\xi(x)}{v}} \phi$$

$$A^\mu \rightarrow A^\mu - \frac{1}{ev} \partial^\mu \xi(x)$$



ゲージ不変性を使ってNGボソン ξ を消すことができる。自由度が消えた？

$$D_\mu \phi = (\partial_\mu - ieA_\mu) \phi$$

$$(D_\mu \phi)^* (D^\mu \phi) \rightarrow (ev)^2 A_\mu A^\mu + \dots$$

ゲージ場の質量

NGボソンの自由度はゲージ場の縦波成分に化けた（ヒッグス機構）。
ヒッグス機構の名残として物理的なスカラー場 $h(x)$ が残る。

SQED with SSB

□ 安定な真空の周りで場を展開：

$$\phi(x) = [h(x) + v]e^{i\xi(x)/v}$$

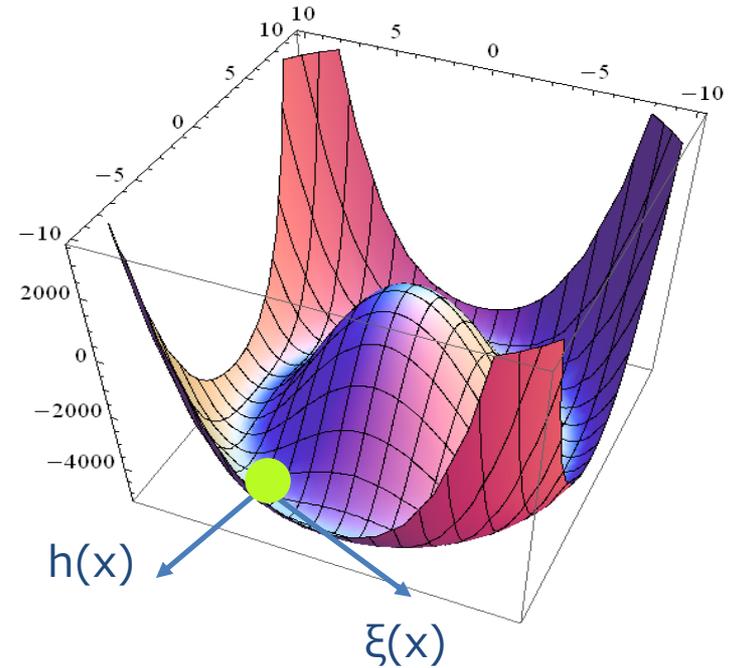
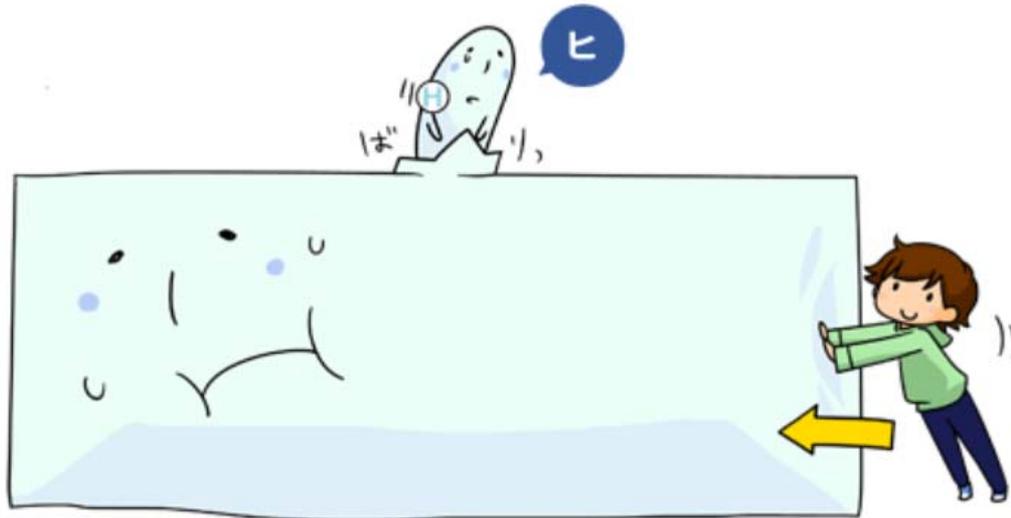
南部・ゴールドストン (NG) ボソン

$$\phi \rightarrow e^{i\alpha(x)} \phi$$

1

$$\phi \rightarrow e^{-\frac{i\xi(x)}{v}} \phi$$

1



が消えた？

けた (ヒッグス機構)。

ヒッグス機構の名残として物理的なスカラー場 $h(x)$ が残る。

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

It is worth noting that an essential feature of the type of theory which has been described in this note is the prediction of incomplete multiplets of scalar and vector bosons.⁸ It is to be expected that this feature will appear also in theories in which the symmetry-breaking scalar fields are not elementary dynamic variables but bilinear combinations of Fermi fields.⁹

目次

I. イントロダクション

II. なぜヒッグス粒子？

III. 標準理論のヒッグス粒子

IV. ヒッグス物理と標準理論を超える新物理

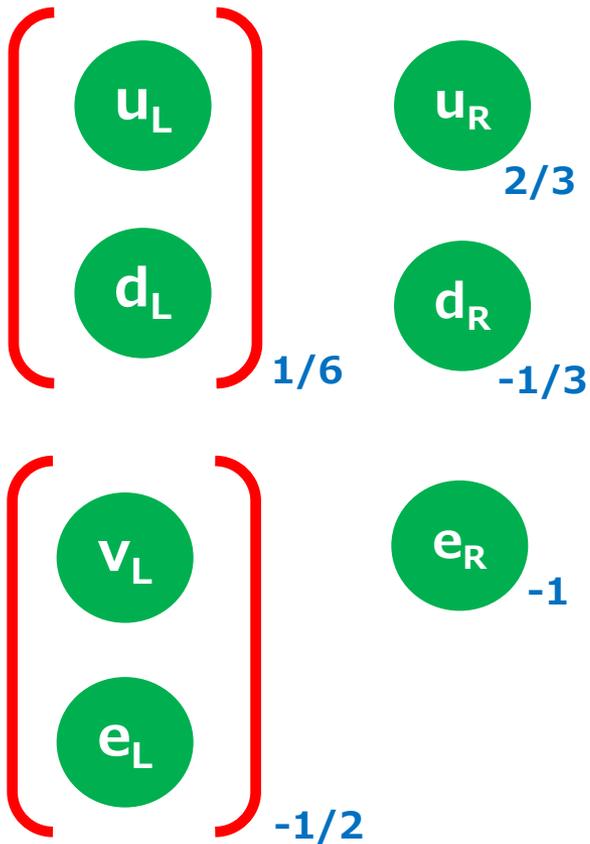
V まとめ

素粒子の標準模型 (電弱理論)

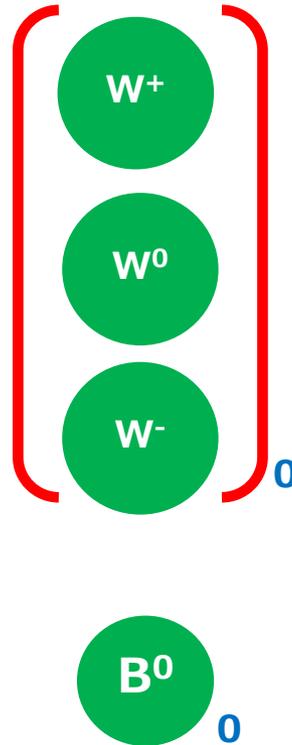
登場人物

対称性：局所 $SU(2)_I \times U(1)_Y$

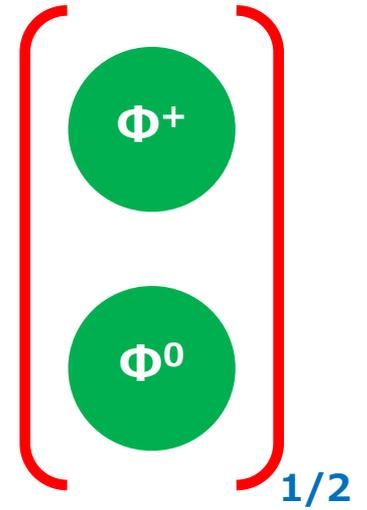
物質場 (スピン1/2)



ゲージ場 (スピン1)



ヒッグス場 (スピン0)



$$Q = I_3 + Y$$

電弱対称性の自発的破れ

ヒッグス場 $\Phi(x)$: SU(2) 2重項

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

ヒッグスポテンシャル

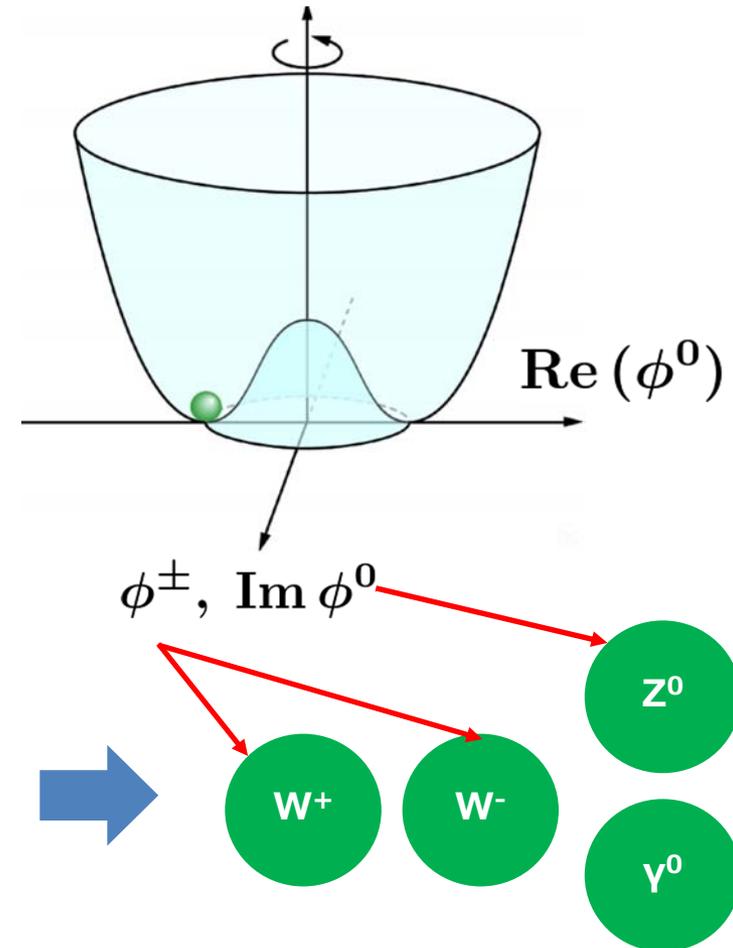
$$\mu^2 < 0, \lambda > 0$$

$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

$$\langle \phi^0 \rangle = v$$

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$

混合



電弱対称性の自発的破れ

ヒッグス場 $\Phi(x)$: SU(2) 2重項

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

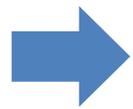
それでも強く生きていくんだぼく。

ヒッグスポテンシャル

$$\mu^2 < 0, \lambda > 0$$

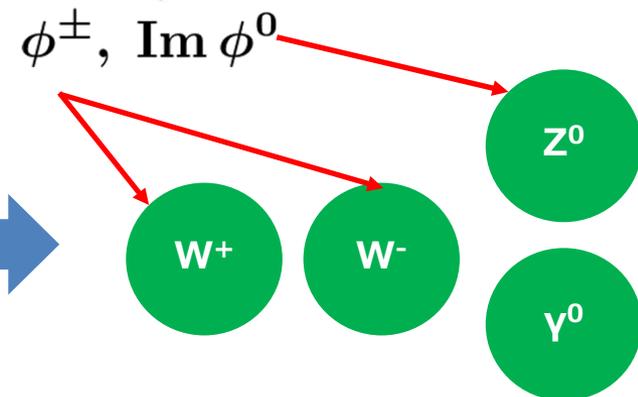
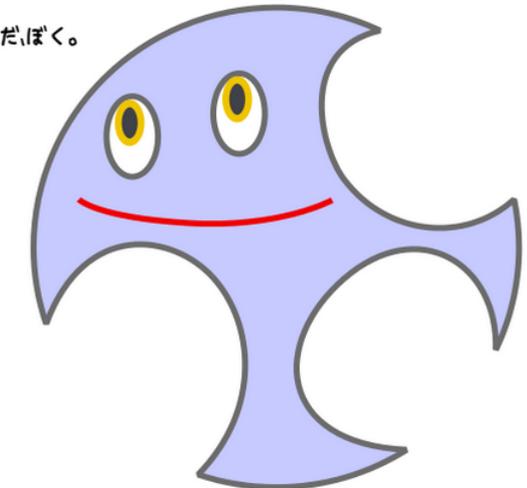
$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

$$\langle \phi^0 \rangle = v$$



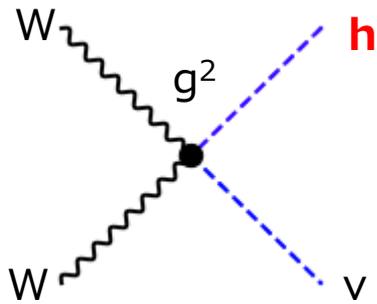
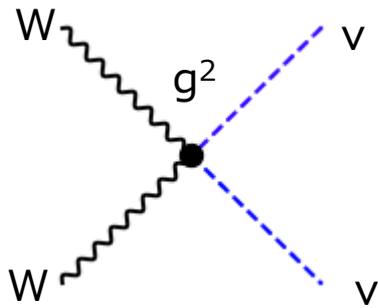
$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$

混合



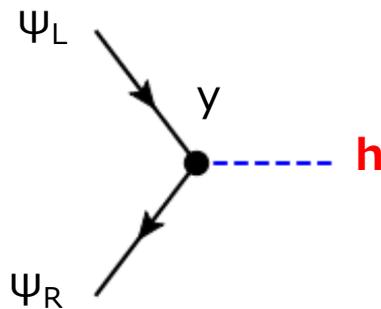
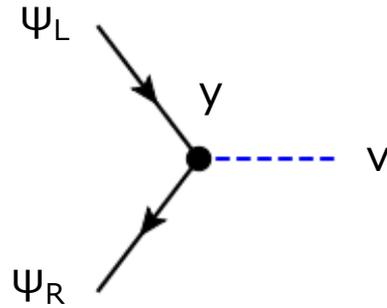
質量の起源

運動項 $|D_\mu \Phi|^2$



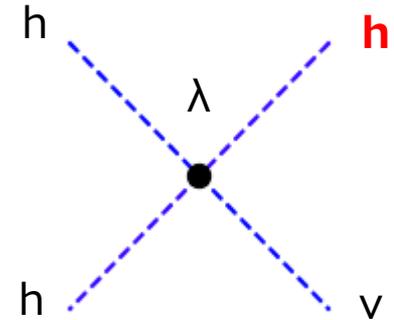
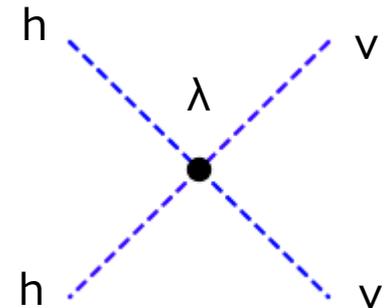
$$g_{hWW} \propto \frac{m_W^2}{v}$$

湯川項 $y \bar{\Psi}_L \Phi \Psi_R$



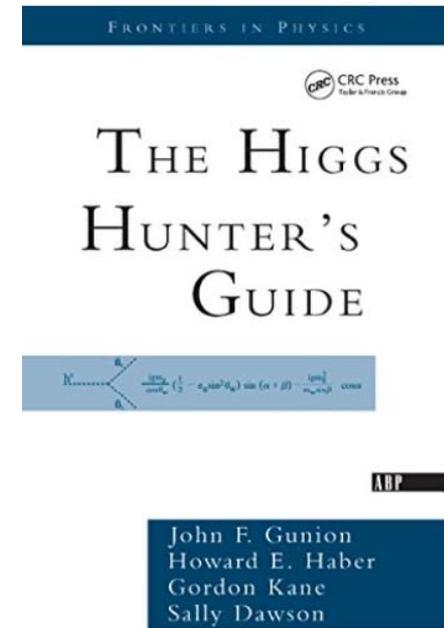
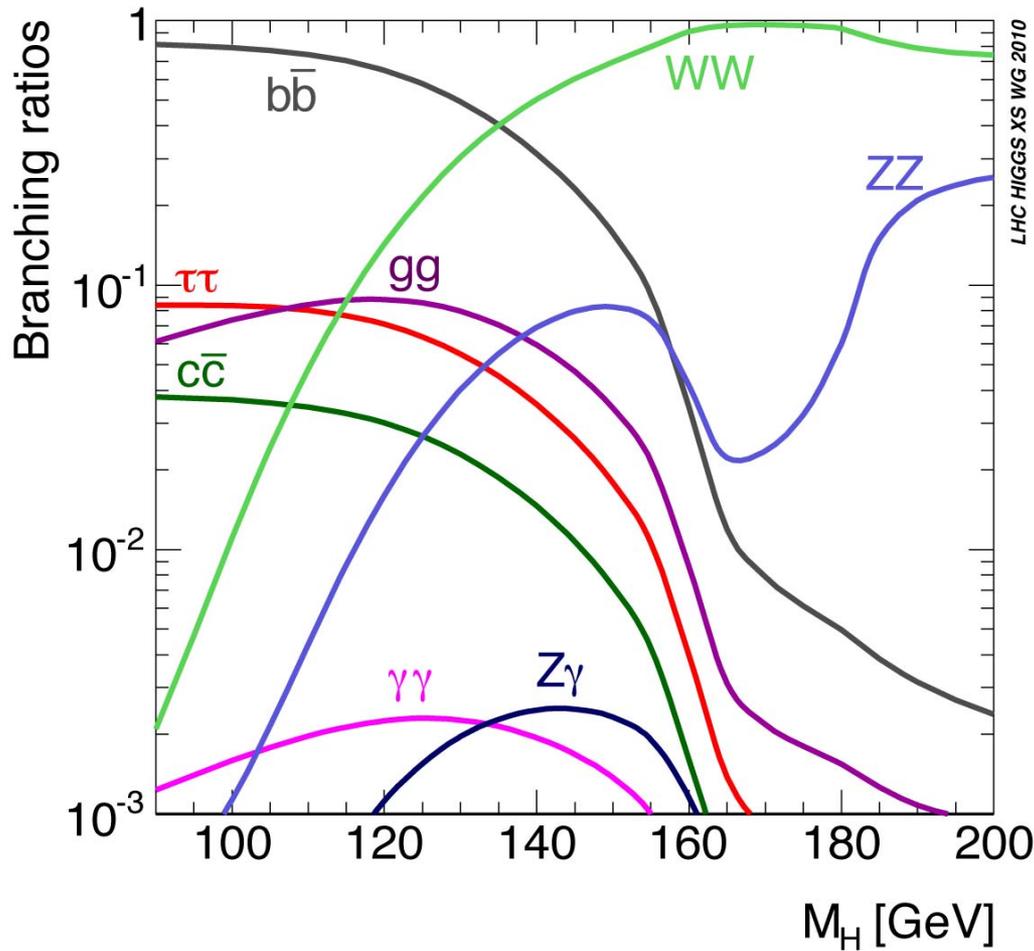
$$g_{hff} \propto \frac{m_f}{v}$$

ポテンシャル $V(\Phi)$



$$g_{hhh} \propto \frac{m_h^2}{v}$$

崩壊分岐比



The Higgs Hunter's Guide (Frontiers in Physics Book 80) (English Edition) 1st Edition, Kindle版

John F. Gunion (著)

★★★★★ 1件のカスタマーレビュー

> その他 (3) の形式およびエディションを表示する

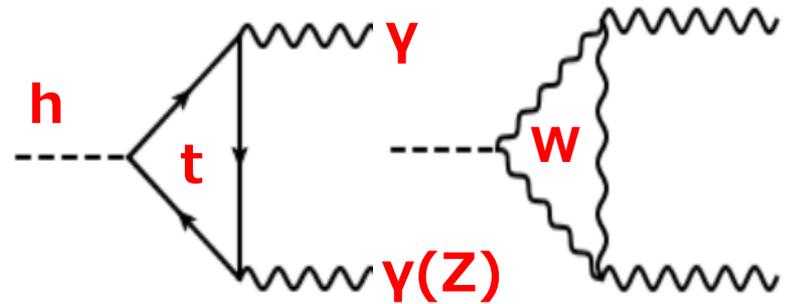
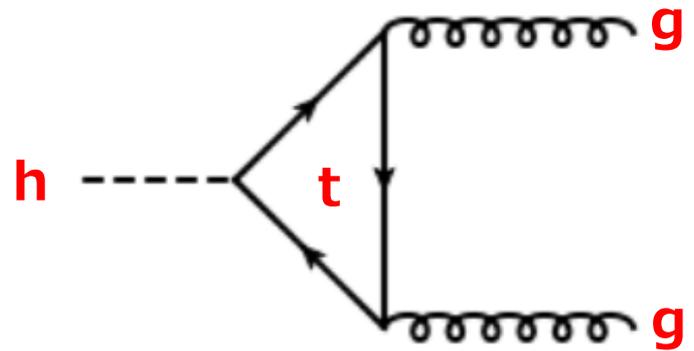
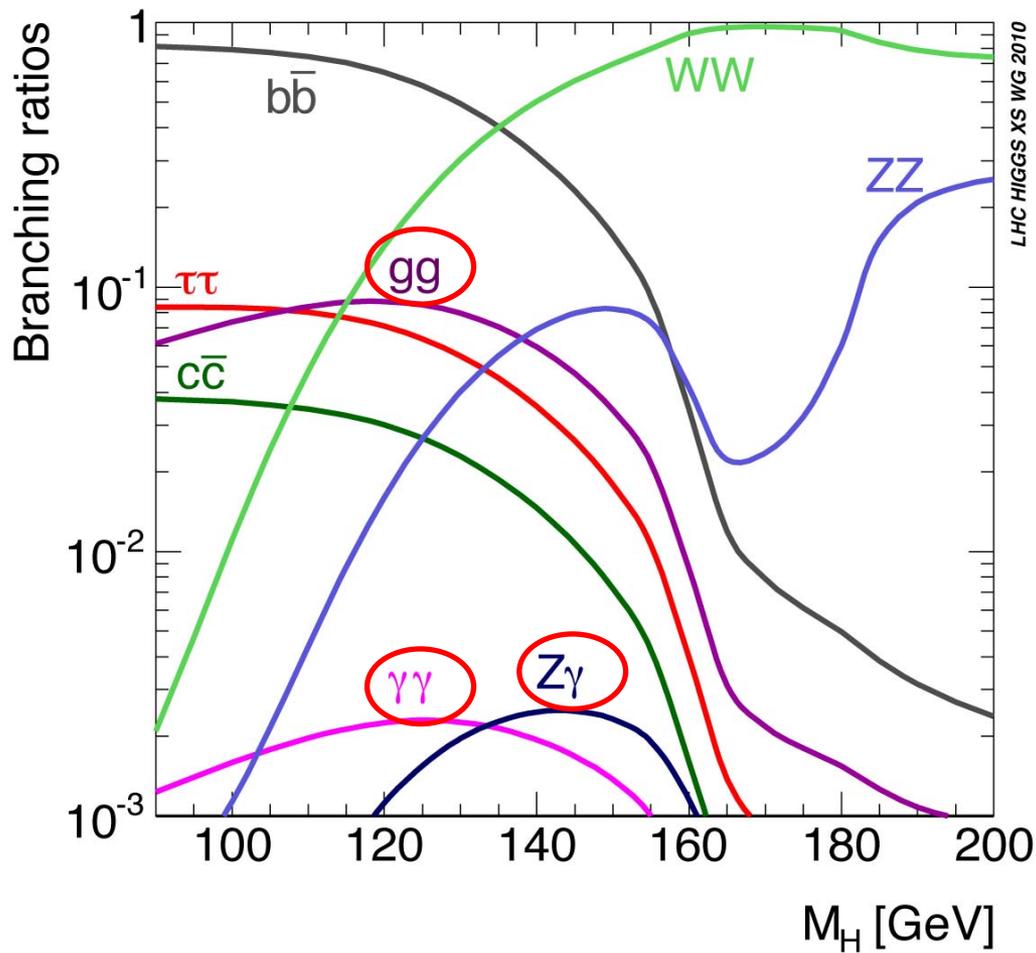
Kindle版
¥ 6,395

ペーパーバック
¥ 6,800

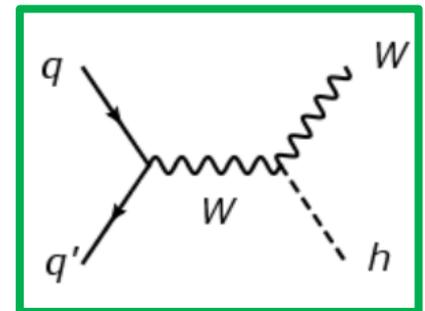
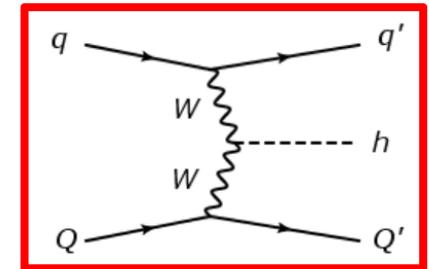
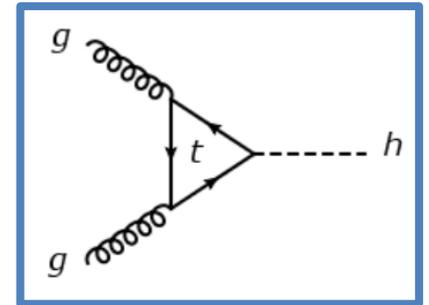
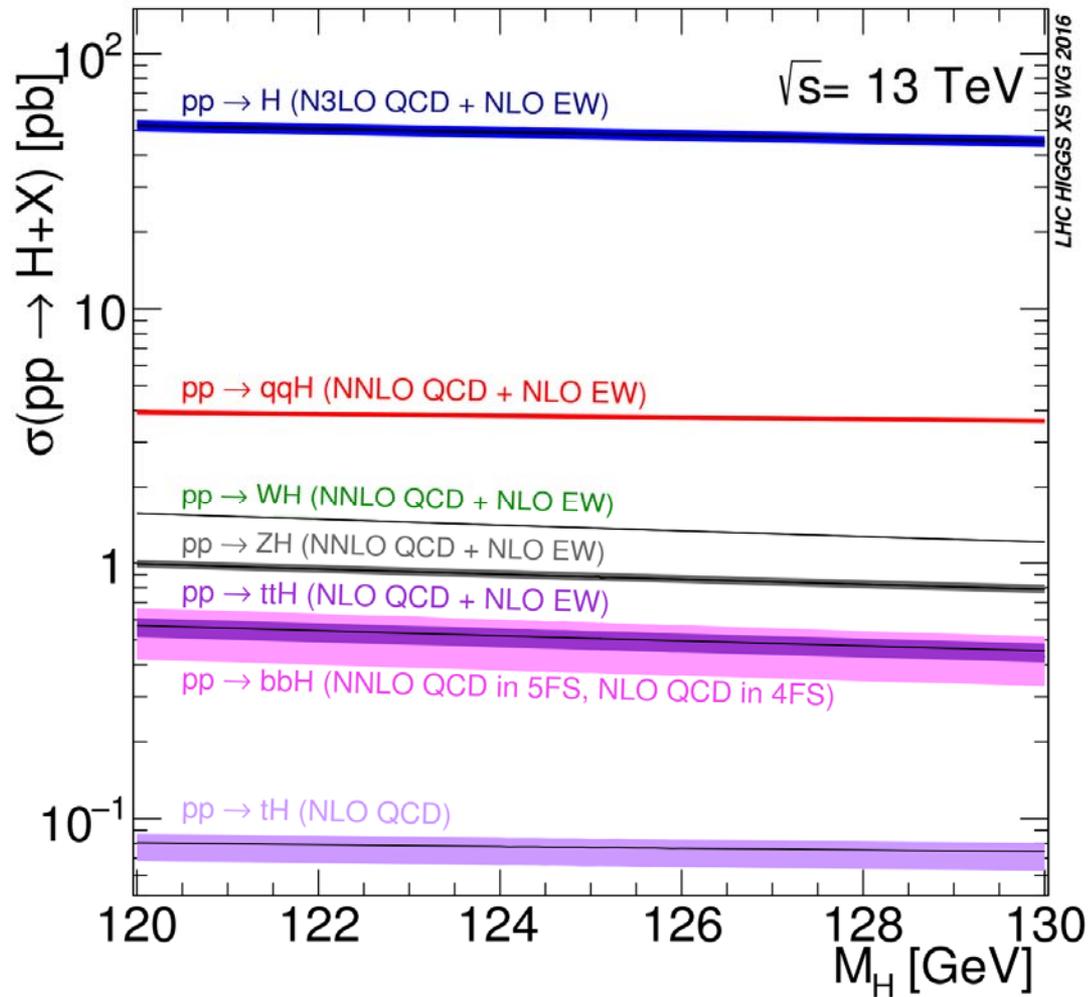
今すぐお読みいただけます: **無料アプリ**

¥ 3,243 より 10 中古品の出品

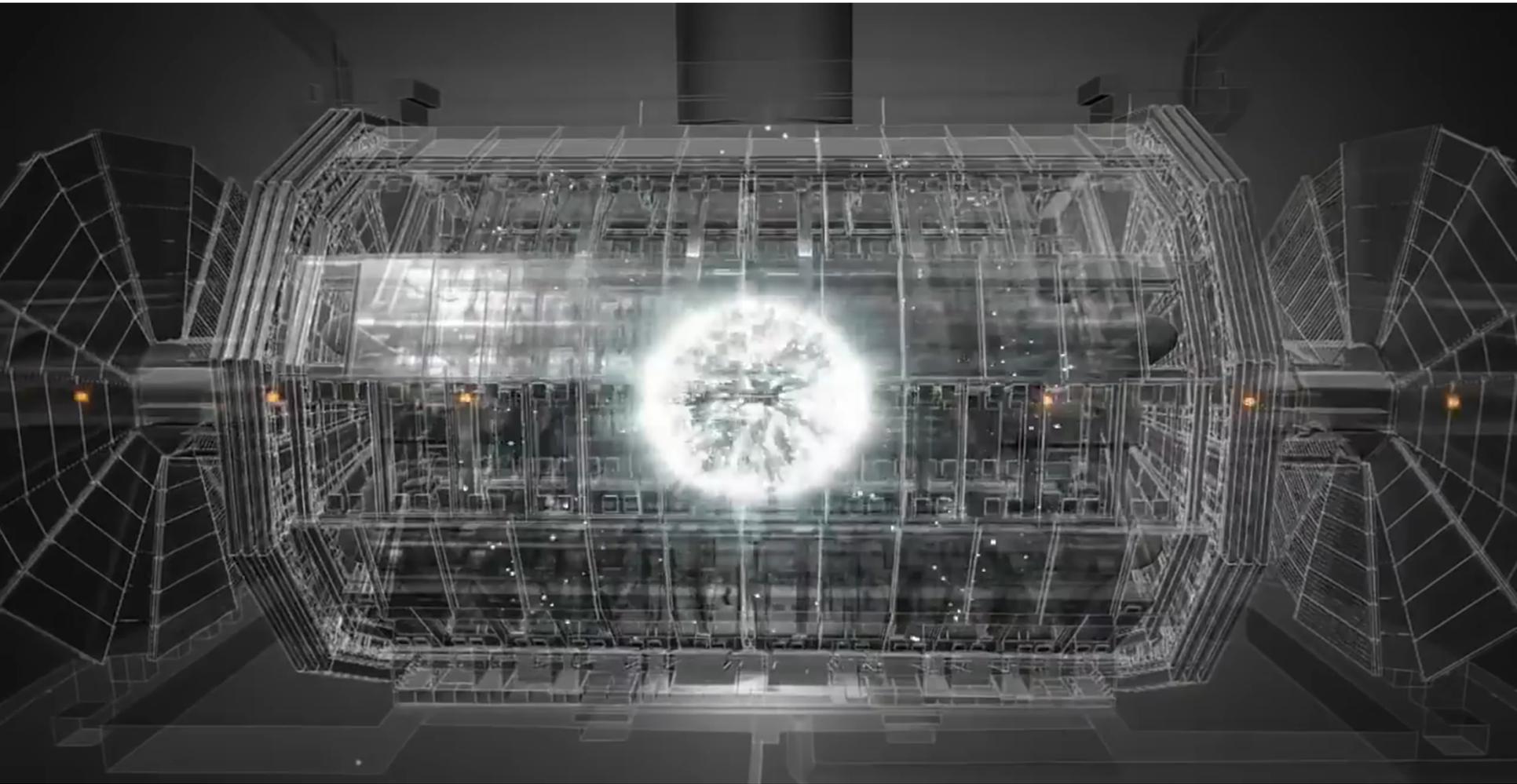
崩壊分岐比



生成斷面積

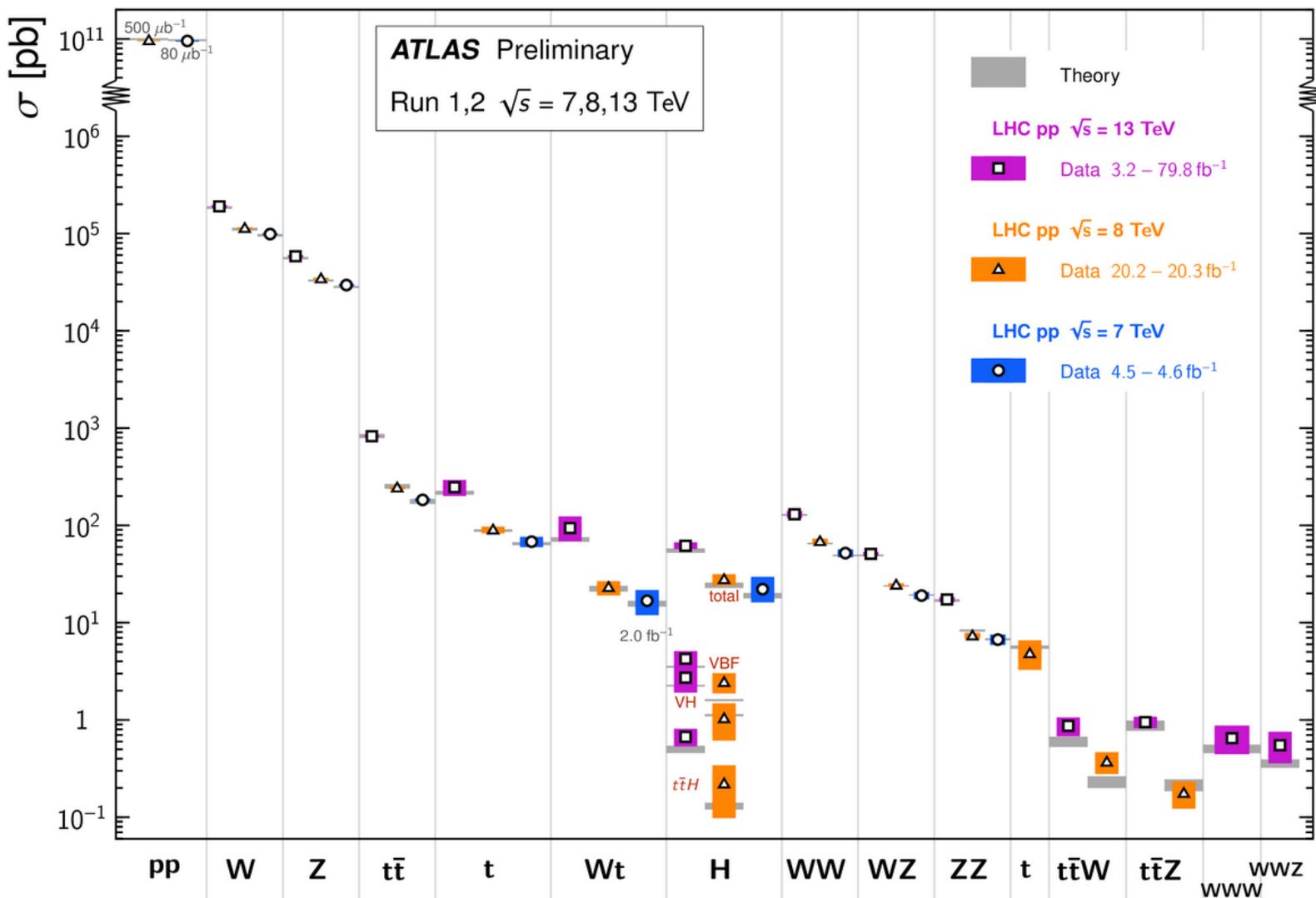


ヒッグス粒子の発見



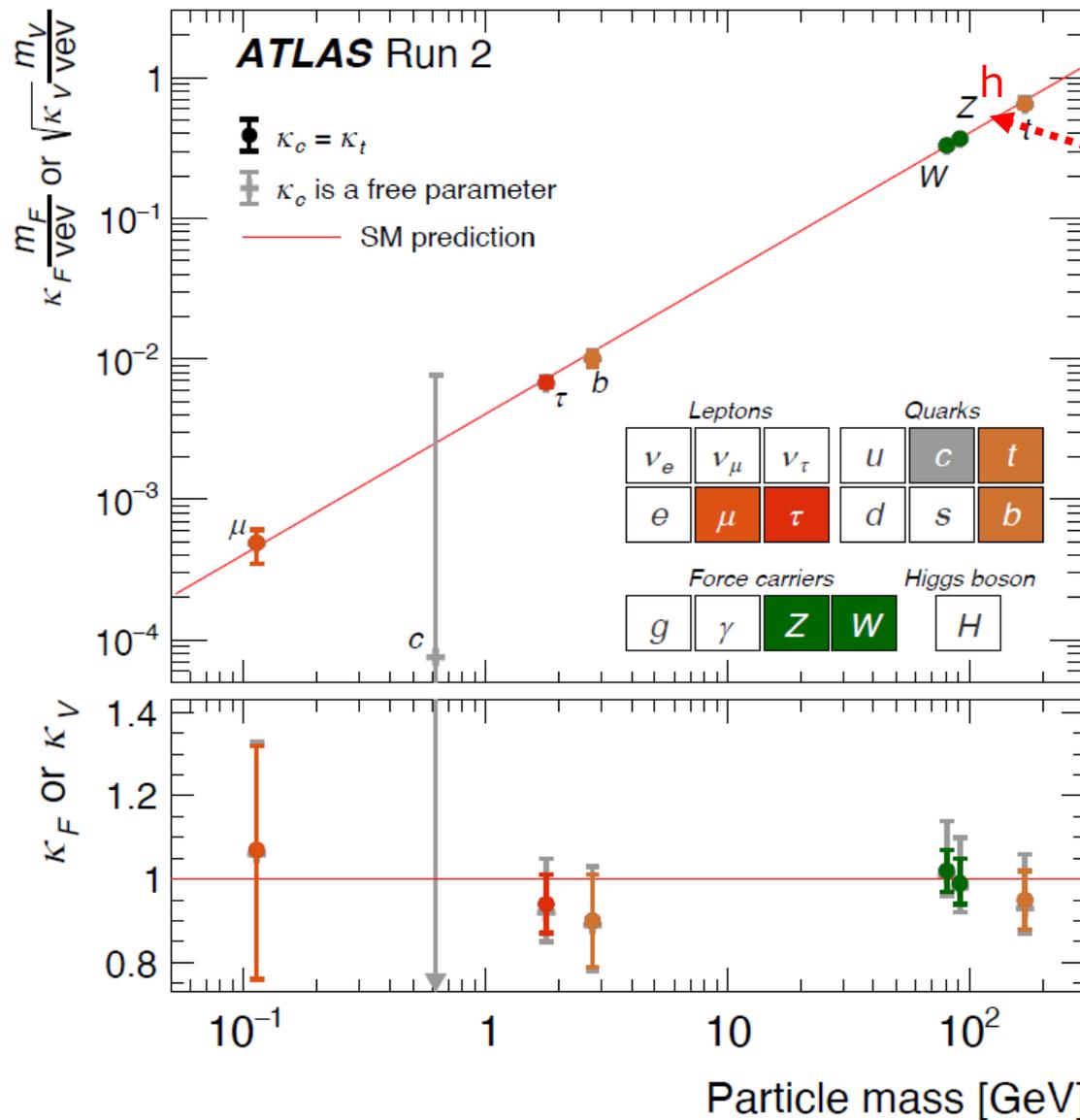
測定された断面積

Standard Model Total Production Cross Section Measurements *Status: May 2020*



質量と結合定数の関係

Nature 607 (2022)



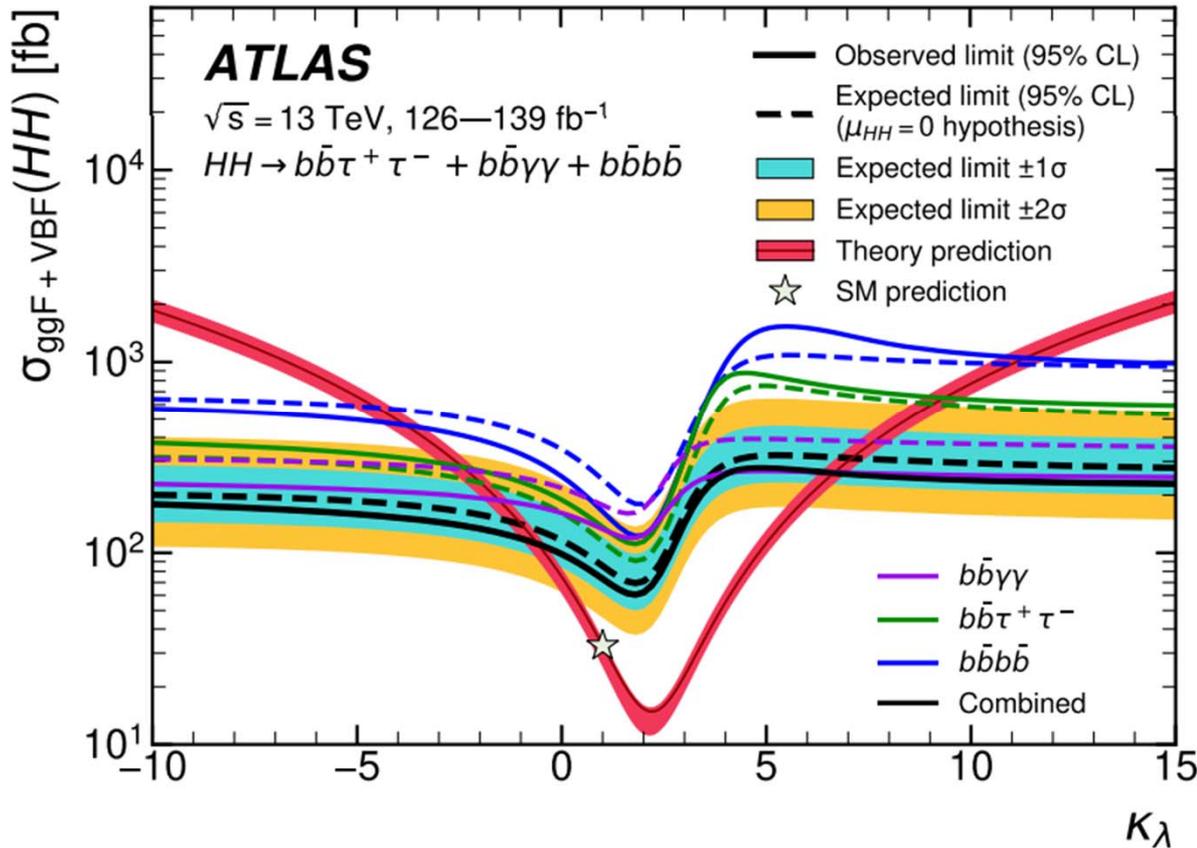
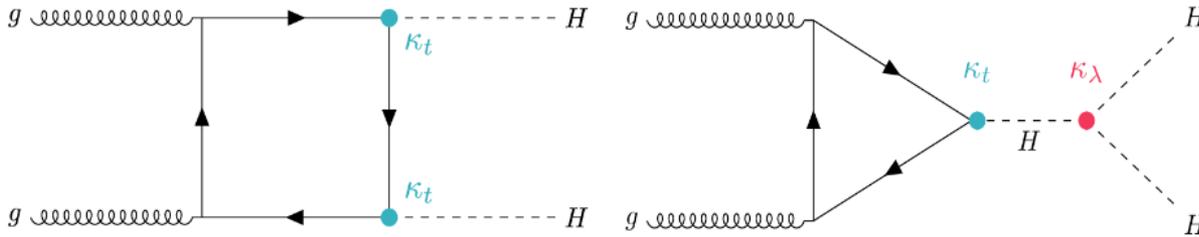
Higgs-self coupling?

Observed (expected) constraints:

$|\kappa_c| < 8.5$ (12.4) @ 95% CL

ヒッグス自己結合

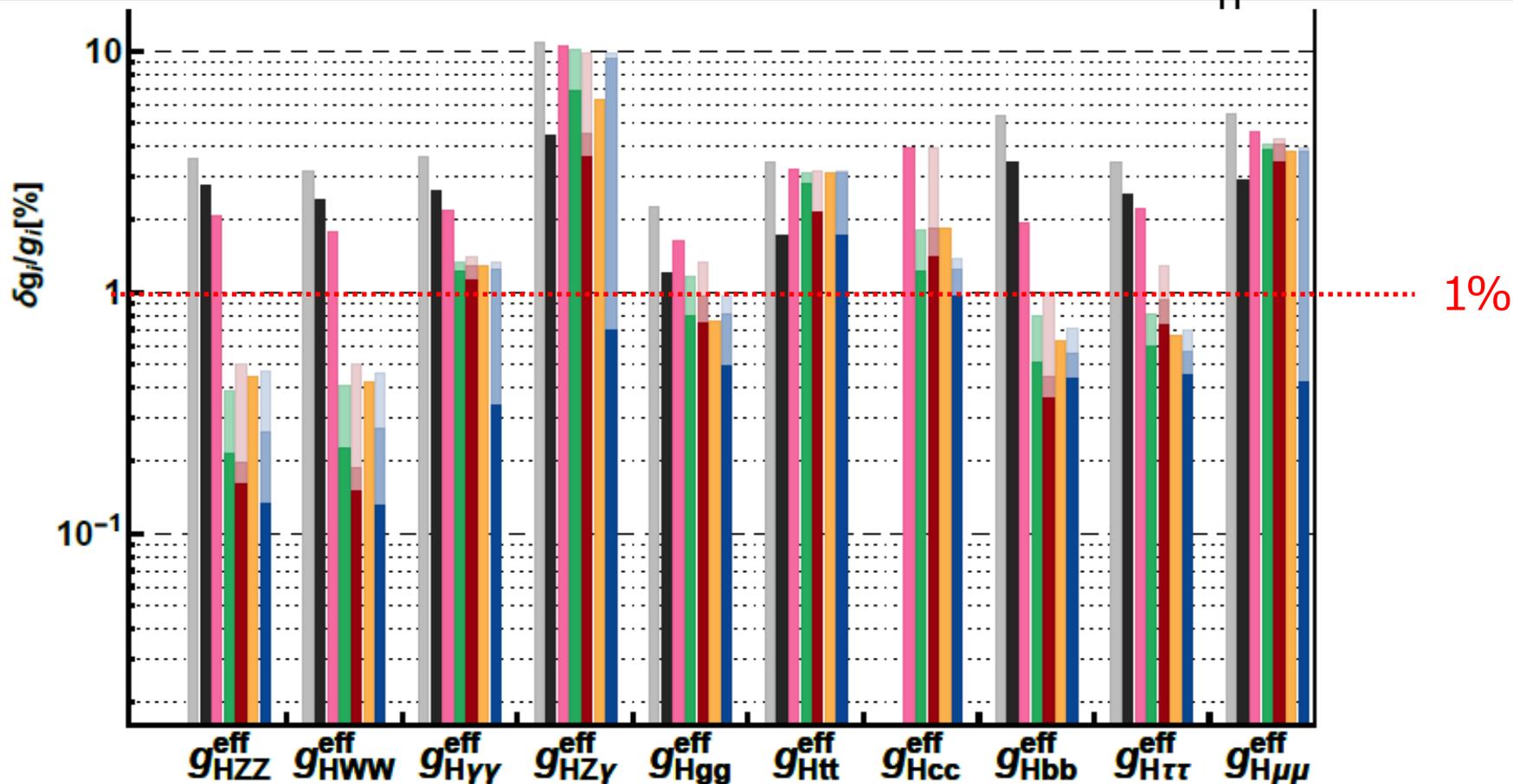
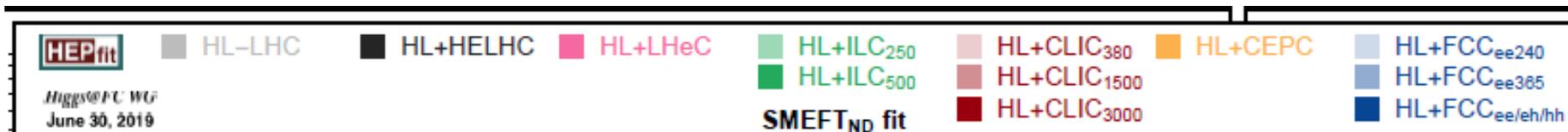
2211.01216 (ATLAS)



$-0.6 < \kappa_\lambda < 6.6$ (95% CL)

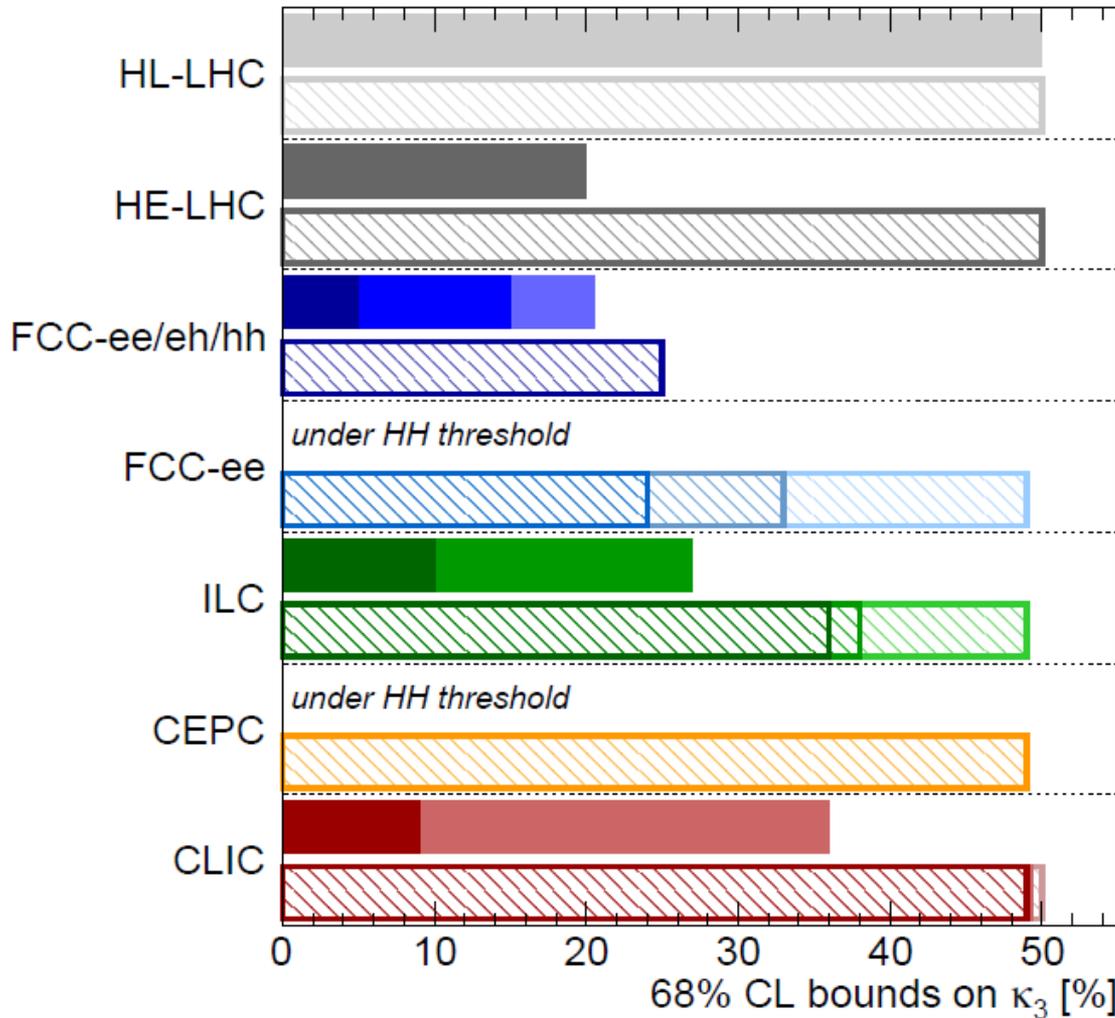
結合定数の測定 (将来)

1905.03764 [hep-ph]



ヒッグス自己結合 (将来)

1905.03764 [hep-ph]



Higgs@FC WG September 2019

di-Higgs		single-Higgs	
HL-LHC	50%	HL-LHC	50%
HE-LHC	[10-20]%	HE-LHC	50%
FCC-ee/eh/hh	5%	FCC-ee/eh/hh	25%
LE-FCC	15%	LE-FCC	n.a.
FCC-eh ₃₅₀₀	-17+24%	FCC-eh ₃₅₀₀	n.a.
		FCC-ee ^{4IP} ₃₆₅	24%
		FCC-ee ₃₆₅	33%
		FCC-ee ₂₄₀	49%
ILC ₁₀₀₀	10%	ILC ₁₀₀₀	36%
ILC ₅₀₀	27%	ILC ₅₀₀	38%
		ILC ₂₅₀	49%
		CEPC	49%
CLIC ₃₀₀₀	-7%+11%	CLIC ₃₀₀₀	49%
CLIC ₁₅₀₀	36%	CLIC ₁₅₀₀	49%
		CLIC ₃₈₀	50%

All future colliders combined with HL-LHC

第2のヒッグス?

2102.13405 [hep-ex]

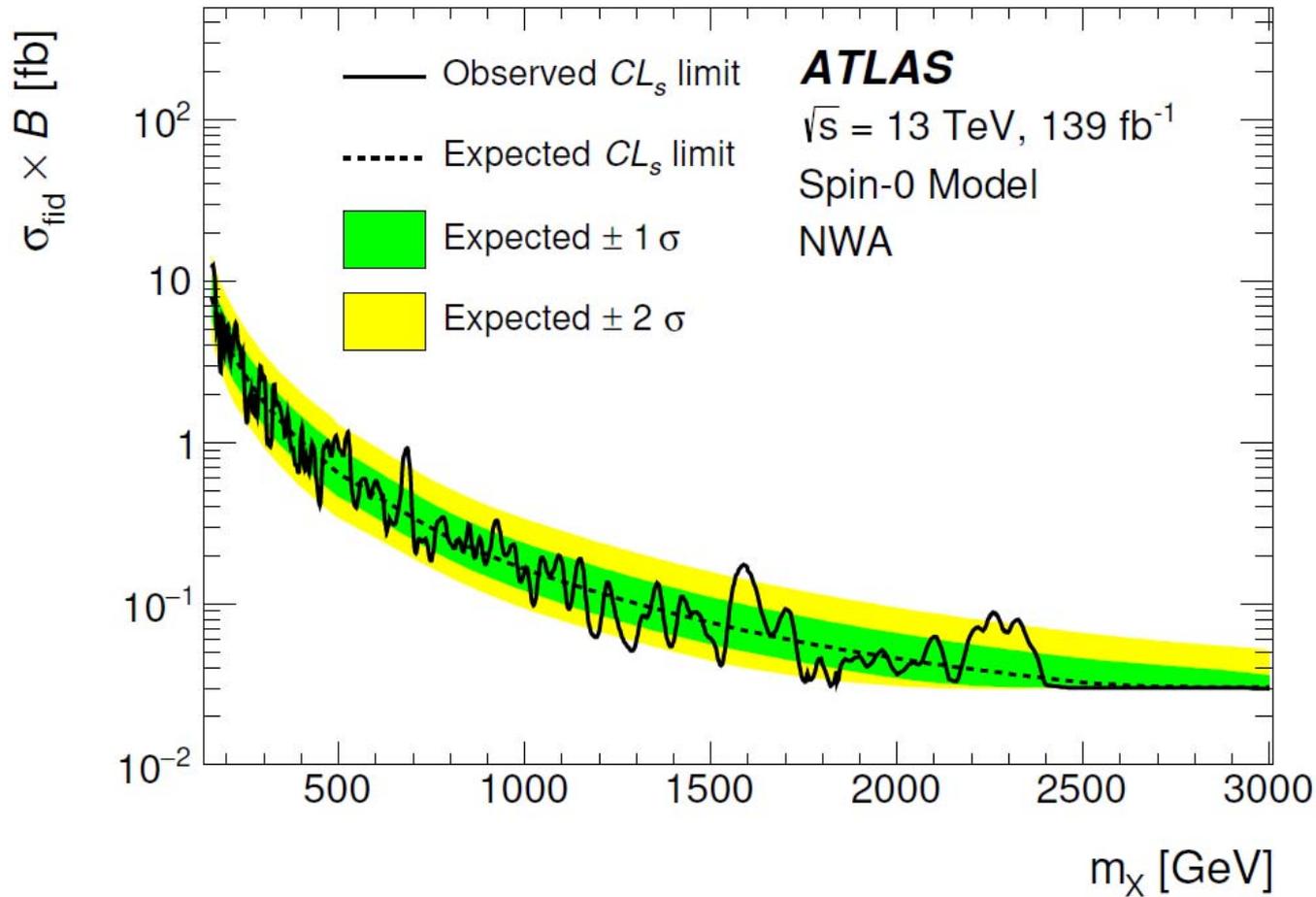
Search for resonances decaying into photon pairs in 139 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector

The ATLAS Collaboration

Searches for new resonances in the diphoton final state, with spin 0 as predicted by theories with an extended Higgs sector and with spin 2 using a warped extra-dimension benchmark model, are presented using 139 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ pp collision data collected by the ATLAS experiment at the LHC. No significant deviation from the Standard Model is observed and upper limits are placed on the production cross-section times branching ratio to two photons as a function of the resonance mass.

第2のヒッグス?

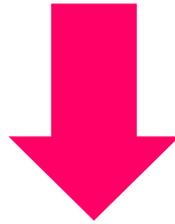
2102.13405 [hep-ex]



For example, $\sigma = \sigma_{\text{SM}}$ & $B_{\gamma\gamma} = 0.1\% \rightarrow \text{Mass} < 1000 \text{ GeV}$ excluded.

標準理論万歳？

- 発見されたヒッグス粒子は現時点で標準理論のヒッグス粒子と無矛盾。
- 標準理論を超える新粒子の発見が現時点でない。



標準理論でよくない？

20世紀初頭にも同じような状況があったような・・・。

目次

I. イントロダクション

II. なぜヒッグス粒子？

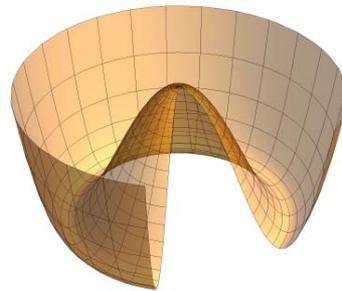
III. 標準理論のヒッグス粒子

IV. ヒッグス物理と標準理論を超える新物理

V まとめ

ヒッグス物理：問題の起源

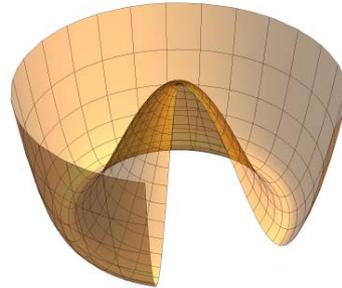
$$V(\Phi) = -\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$



ヒッグス物理：問題の起源

Origin of the negative mass term

$$V(\Phi) = -\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

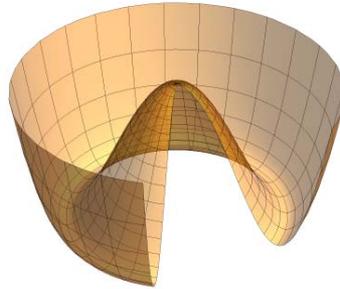
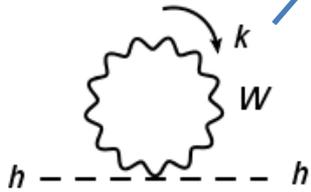


ヒッグス物理：問題の起源

Origin of the negative mass term

$$V(\Phi) = -\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

Elementary scalar?



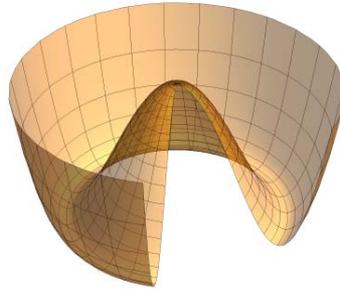
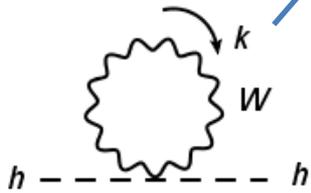
$$m_h^2 \sim \frac{\Lambda^2}{16\pi^2} \gg (125 \text{ GeV})^2$$

ヒッグス物理：問題の起源

Origin of the negative mass term

$$V(\Phi) = -\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

Elementary scalar?



Yukawa coupling? $\frac{y_e}{y_t} \sim 10^{-5}$

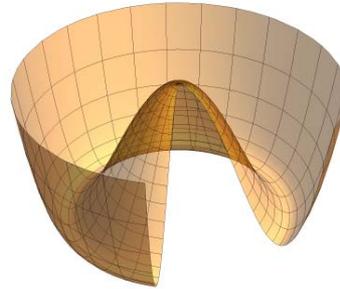
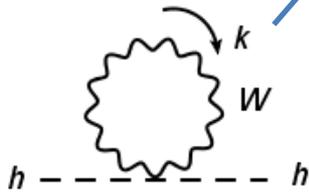
$$m_h^2 \sim \frac{\Lambda^2}{16\pi^2} \gg (125 \text{ GeV})^2$$

ヒッグス物理：問題の起源

Origin of the negative mass term

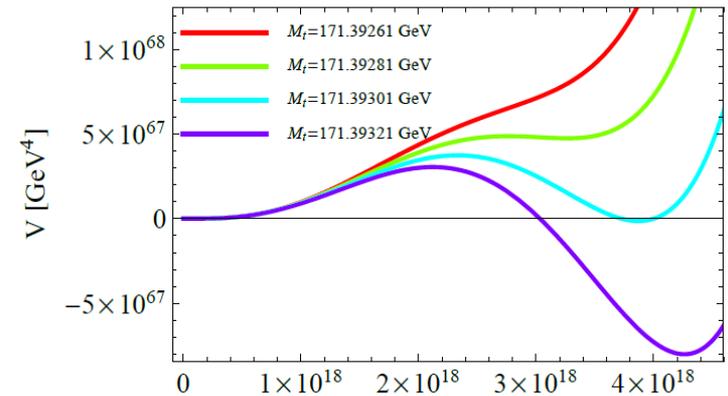
$$V(\Phi) = -\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$$

Elementary scalar?



$$m_h^2 \sim \frac{\Lambda^2}{16\pi^2} \gg (125 \text{ GeV})^2$$

Hamada, Kawai, Oda, Park (2015)



Yukawa coupling? $\frac{y_e}{y_t} \sim 10^{-5}$

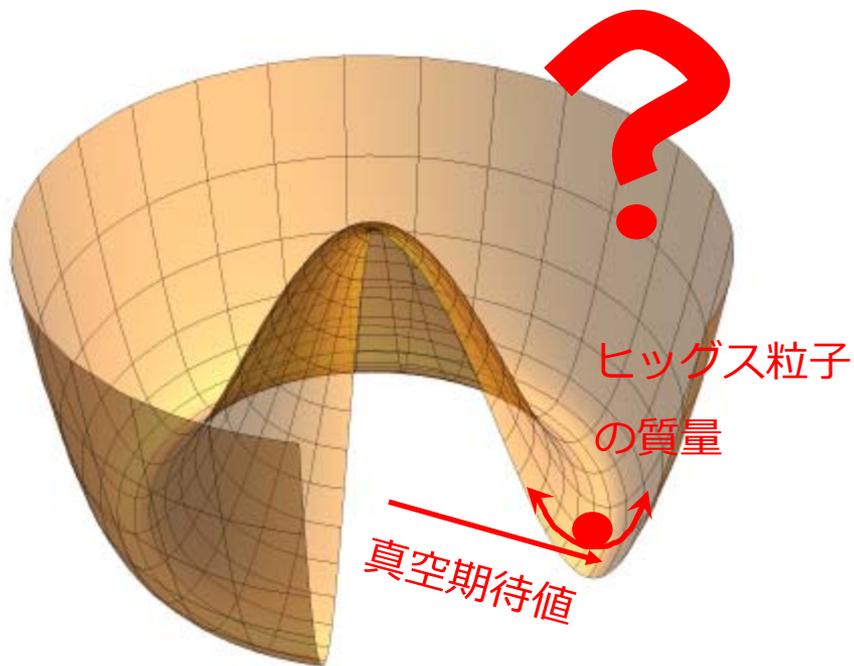
Something behind the Higgs sector

真の構造は何か？

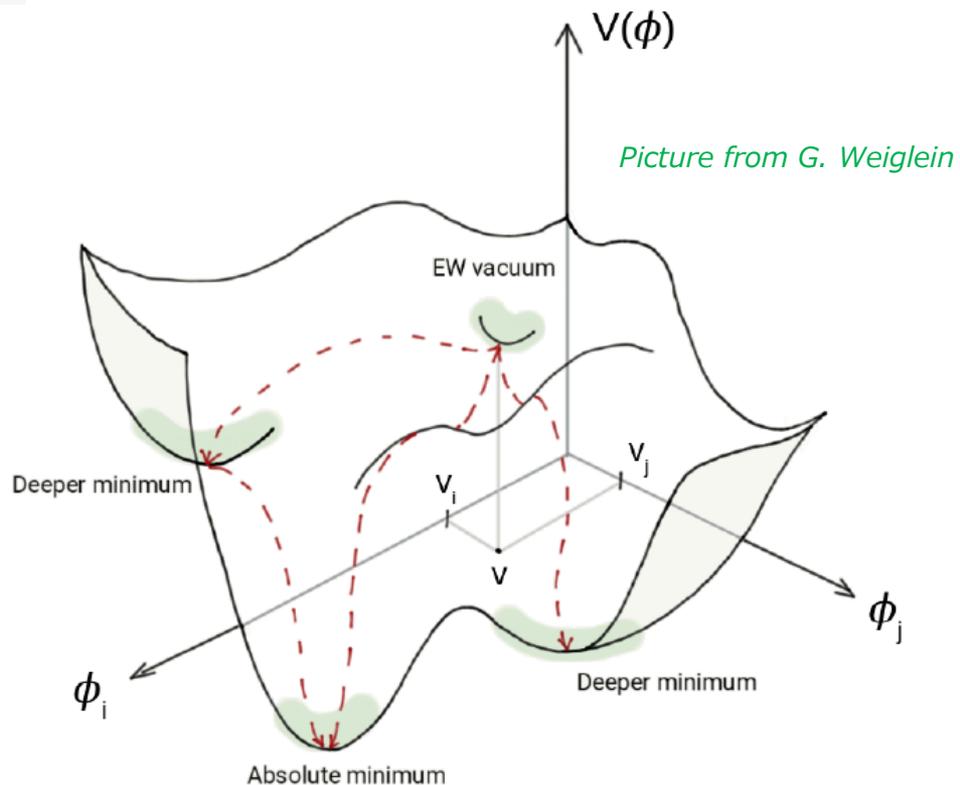
素粒子標準理論

$$V = -\mu^2|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$$

ϕ : 複素スカラー場



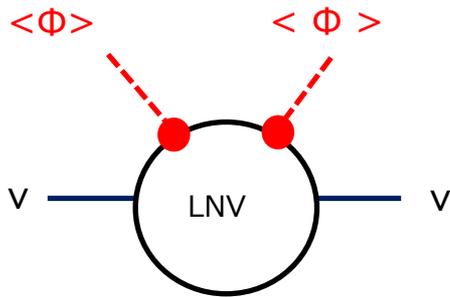
スカラー場が複数個あったら・・・



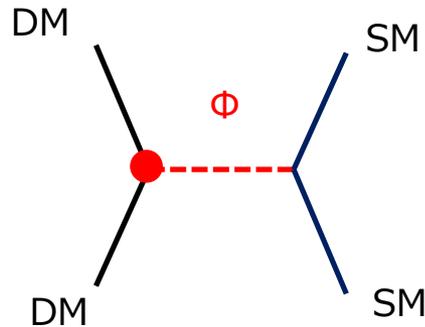
こんな感じかもしれない。

未解決現象とヒッグス物理

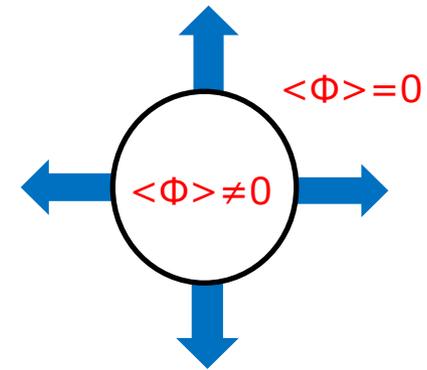
Neutrino masses



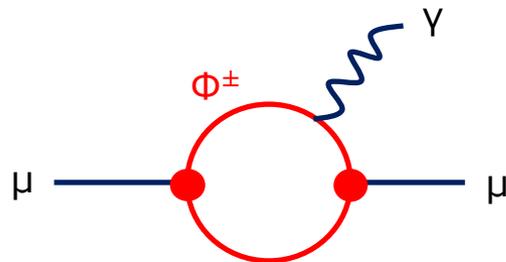
Dark matter



Baryon asymmetry of Universe

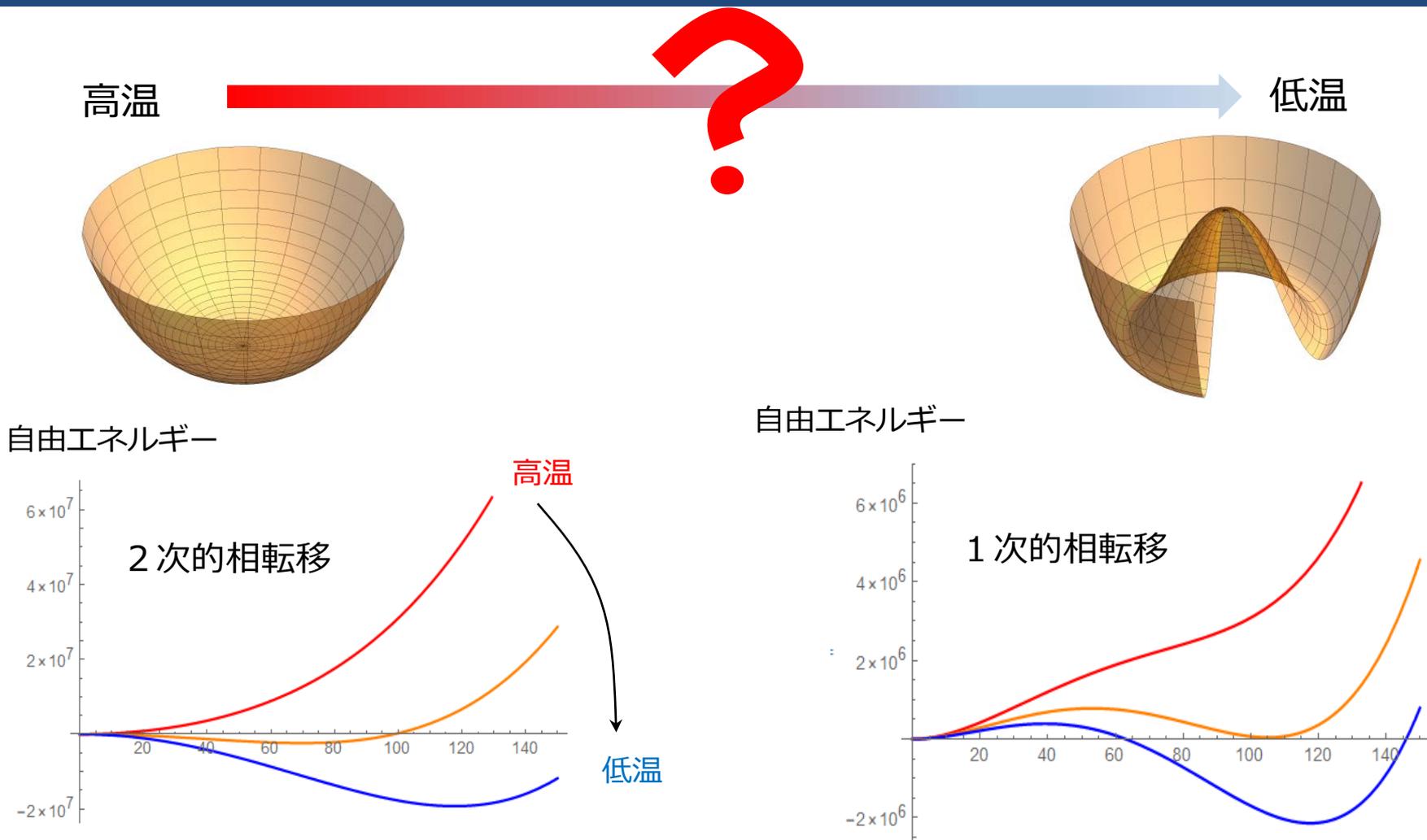


Flavor anomalies



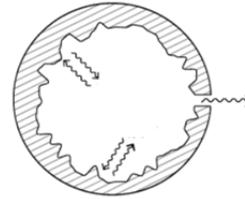
Higgs physics can strongly be related

宇宙論とのつながり：電弱相転移



実はヒッグスセクターに関してほとんど何も分かっていない！

20世紀初頭におけるパラダイムシフト



Black-body Radiation

Classical Theory

- Newton Dynamics
- Maxwell Electromagnetism

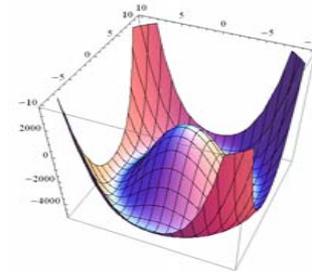
Quantum Theory

- Nuclear Physics
- Particle Physics, ...

Planck's Law

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$$

21世紀におけるパラダイムシフト



Standard Model

- Gauge Principle
- Higgs Mechanism

Higgs Physics

New Physics

- New dynamics
- New symmetries
- Unifications, ...

$$V(\Phi) = -\mu^2|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$$

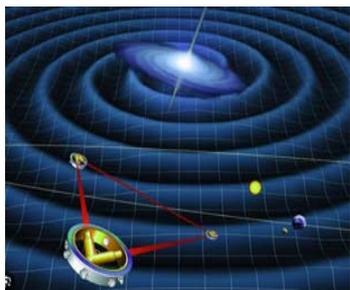
Higgs is a Key to New Physics

様々な実験から立体的に検証

Picture from Web

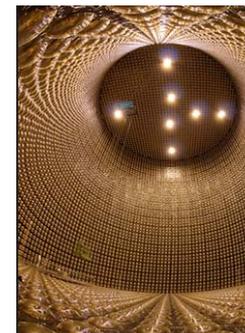
宇宙観測実験

Picture from Web



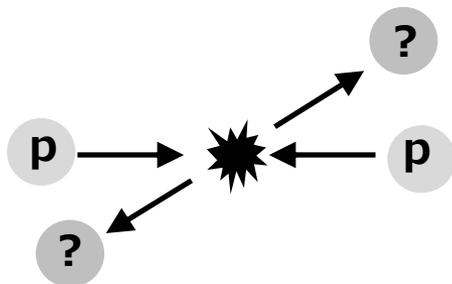
LISA, KAGRA など

フレーバー実験



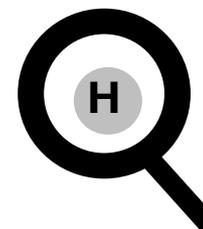
SuperKEKB,
ハイパーカミオカンデ など

高エネルギー加速器実験

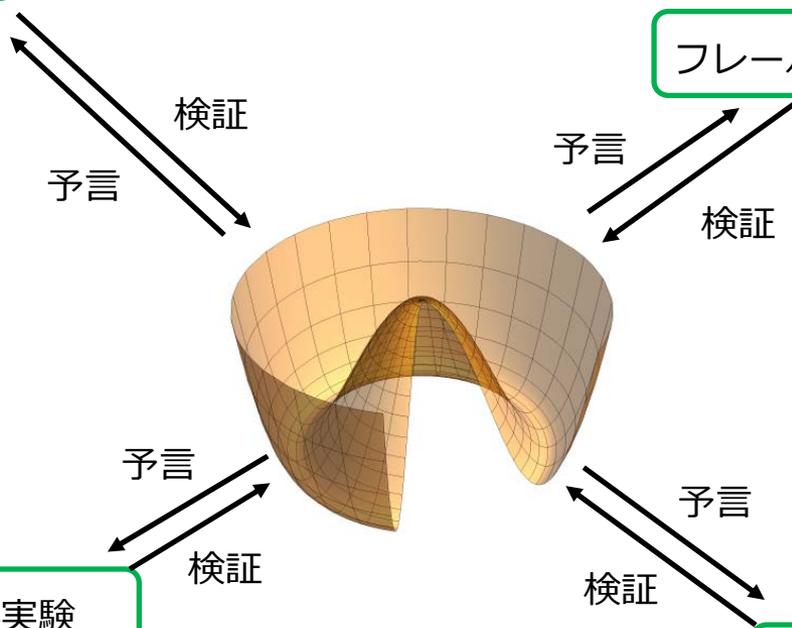


LHC Run3,
高輝度LHC実験,
FCC-hh など

ヒッグスファクトリー実験



ILC,
CEPC,
FCC-ee など



まとめ

- ヒッグス粒子は素粒子の質量起源を与える。
- 2012年にLHC実験で発見され、現時点で標準理論の予言と誤差の範囲内で一致。
- ヒッグス物理を中心として様々な問題や謎が発生している。
- 今後のHL-LHCを始めとする実験でヒッグス物理を通して、新物理への手がかりが得られるかもしれない。