

ヒッグス粒子とはなんだろう

佐賀大学工学系研究科物理科学専攻

船久保 公一

ヒッグス粒子とは？

- 質量の起源、「神の粒子」
- **標準理論**の唯一未発見の粒子
- 2012年7月CERNが「ヒッグス粒子のような粒子」を発見と発表

「ヒッグス粒子とはなにか」を知るためのキーワード

素粒子の標準理論

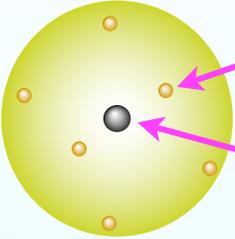
The Standard Model

自発的対称性の破れ

ヒッグス粒子の役割、発見の意義

素粒子の基本法則

原子



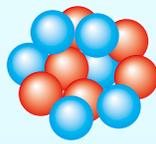
電子 マイナスの電荷
原子核 プラスの電荷

電磁相互作用
(静電気力)

$10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}$ ≪ 可視光の波長 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{m}$

原子より小さい世界は光では「見えない」

原子核

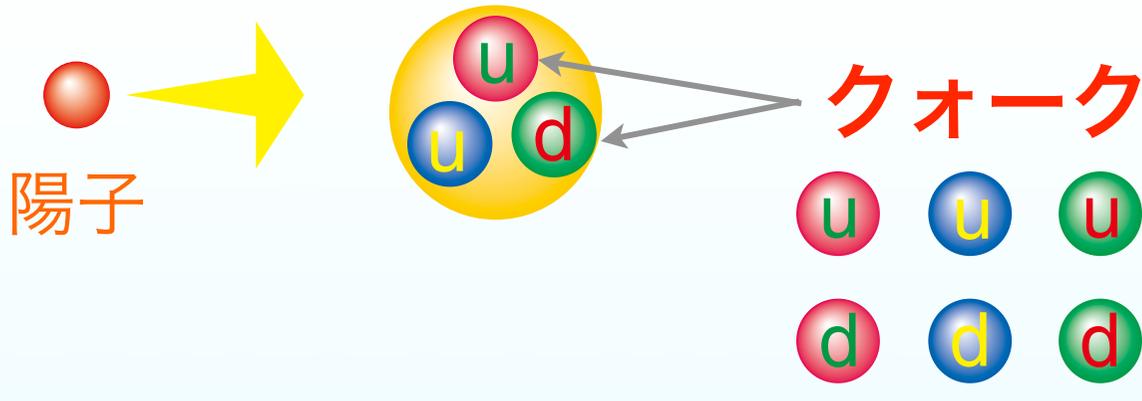


陽子
中性子

$10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$

陽子・中性子から原子核を作る力 強い相互作用

結合エネルギーは原子の100万倍

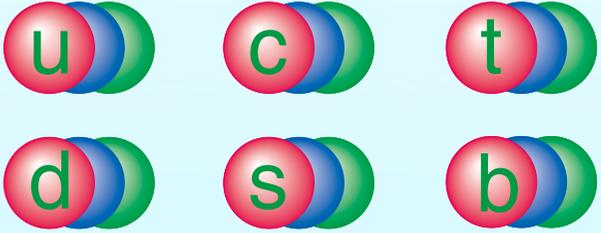


各クォークに3状態
「色」

強い相互作用をする粒子の仲間 **ハドロン**

陽子よりずっと重いハドロン ← 重いクォーク

現在までに **6種類**発見



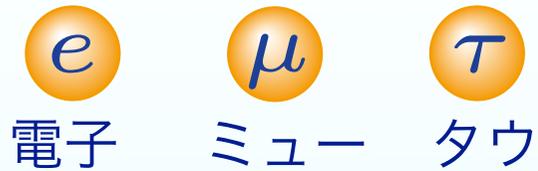
軽い ↔ 重い

重い粒子は加速器で生成
軽い粒子に崩壊

強い相互作用をしない粒子の仲間

レプトン

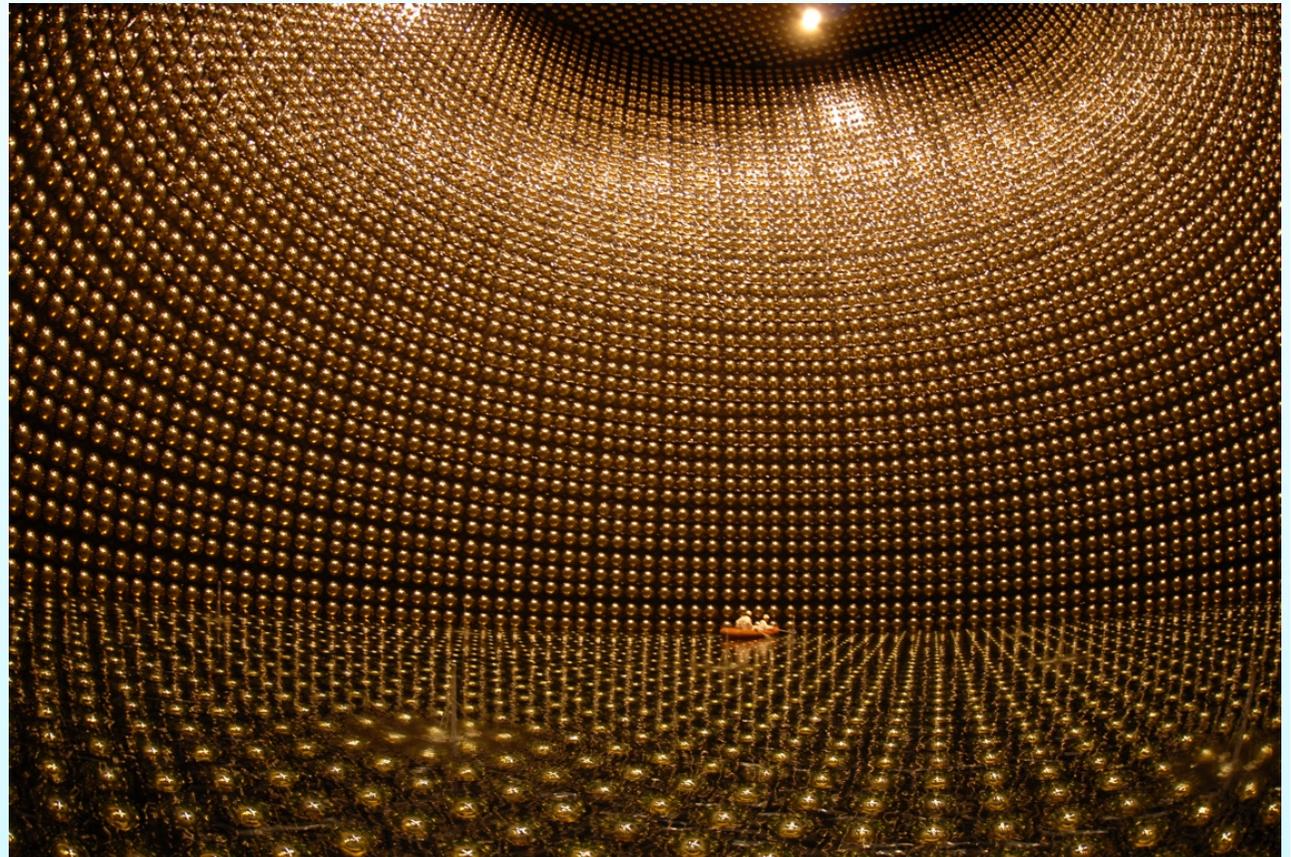
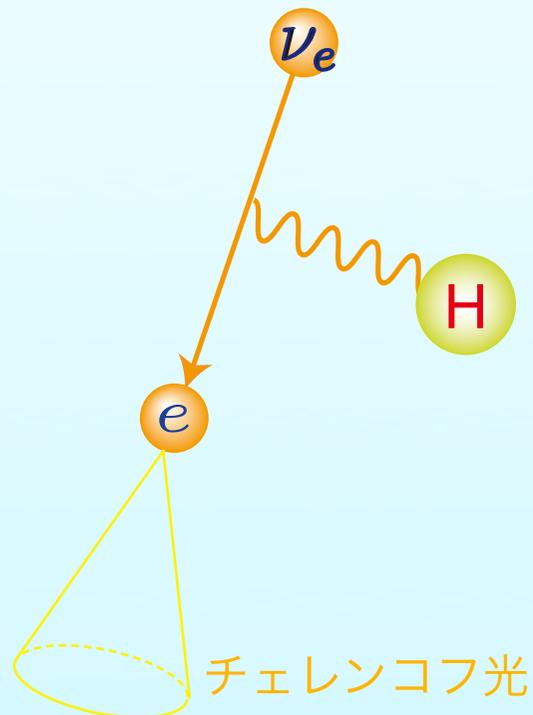
電子と同じ電荷



電荷が無い

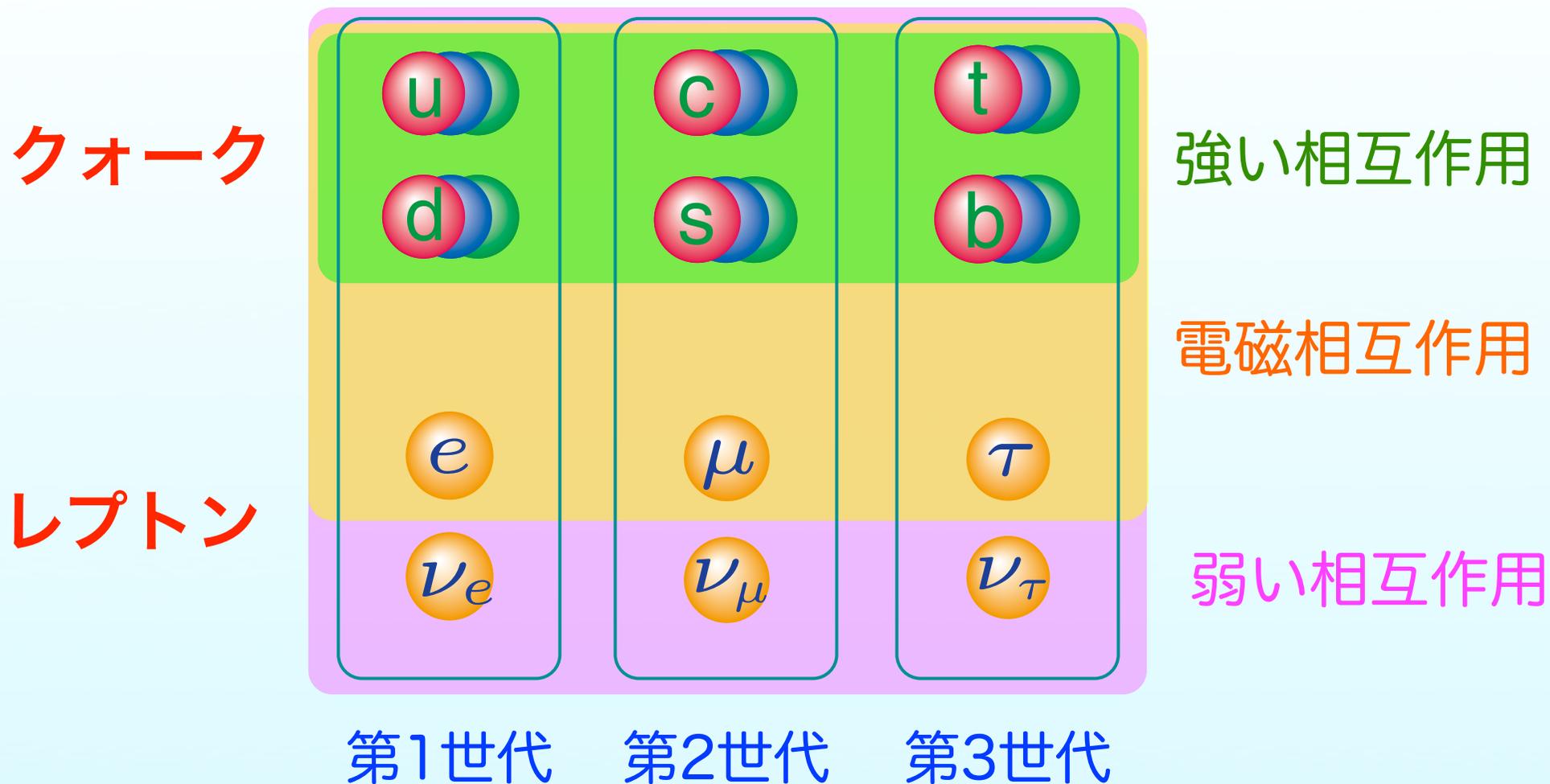


弱い相互作用 だけ



写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

相互作用に着目してまとめると、



小林・益川の論文発表時
1973年

u, d, s クォーク
第1, 2世代のレプトン

場と粒子

素粒子を記述する理論 = **場の量子論**

この理論形式の正しさは、実験により

11桁の精度でチェックされている

素粒子ごとに場

場の揺らぎ = 粒子

電磁場 ↔ 光子 (光の粒子)

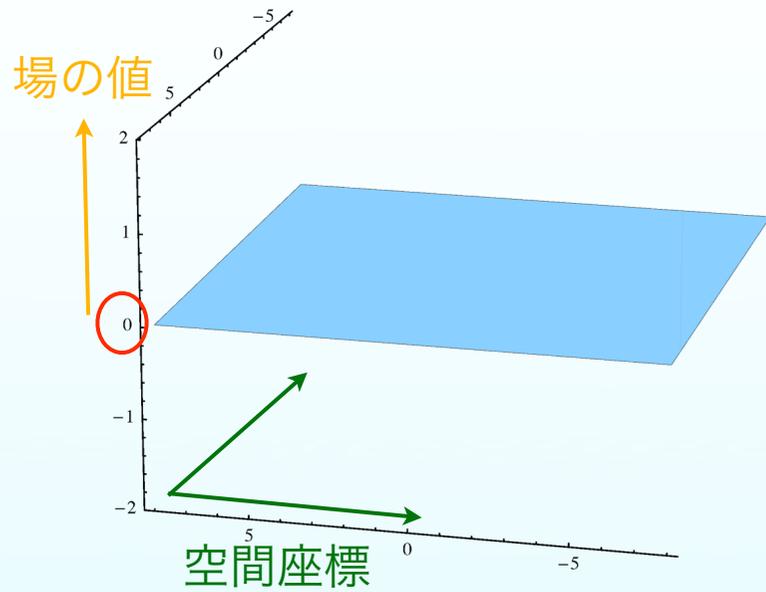
電子場 ↔ 電子

アップ・クォーク場 ↔ アップ・クォーク

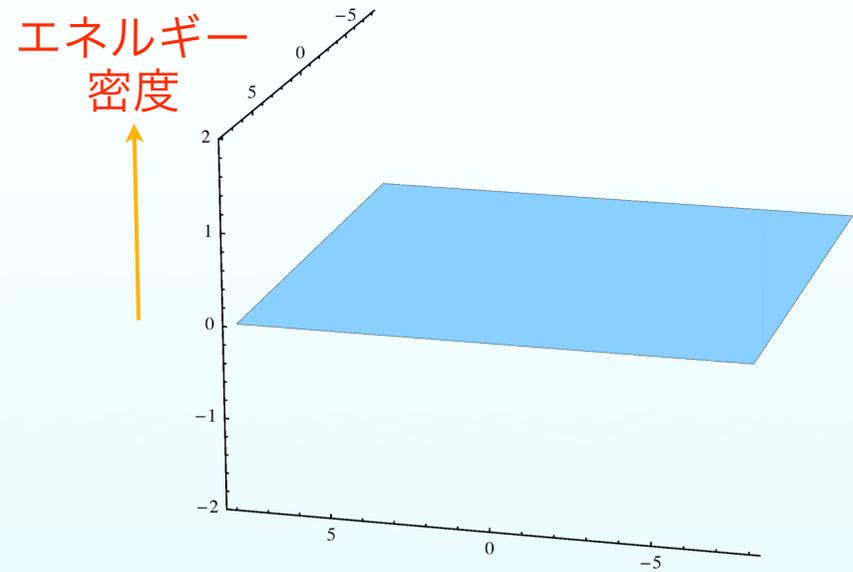
ヒッグス場 ↔ **ヒッグス粒子**

この区別が重要！

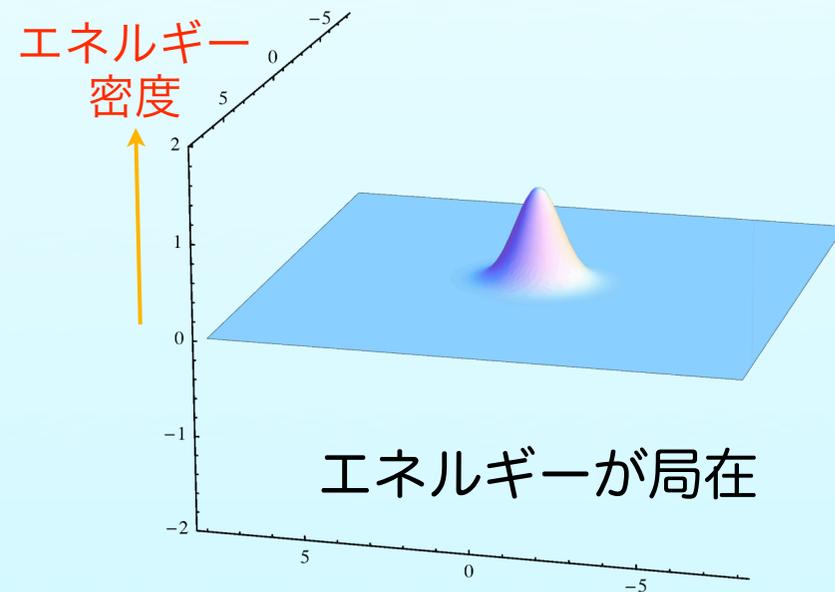
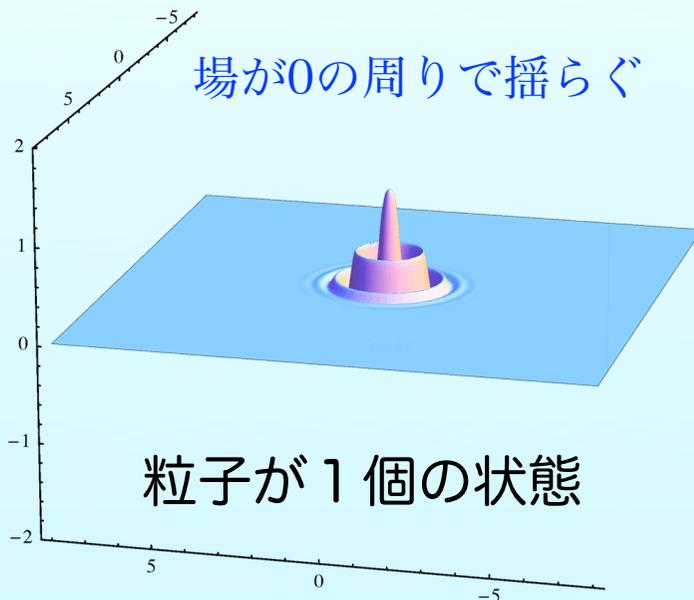
場と粒子のイメージ



真空 = 粒子がない状態



至る所、エネルギー = 0



粒子の質量、電荷とは？

質量 m ← 1 粒子状態のエネルギー E と運動量 p の関係

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

$c =$ 光速

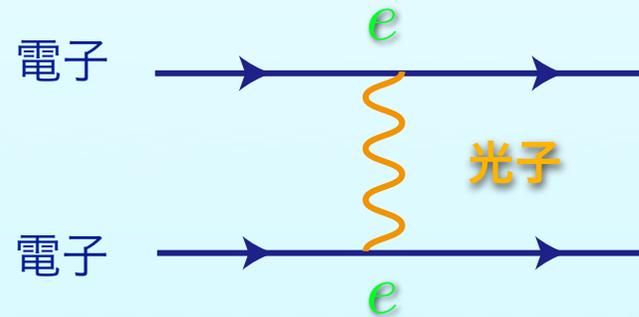
$$p = 0 \rightarrow E = mc^2$$

重く他の粒子に崩壊する粒子の質量は、
出てくる全粒子のエネルギー・運動量から決める。

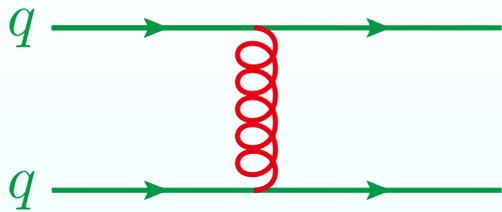
電荷 電子の電荷 = 電子と電磁場の相互作用の強さ

e

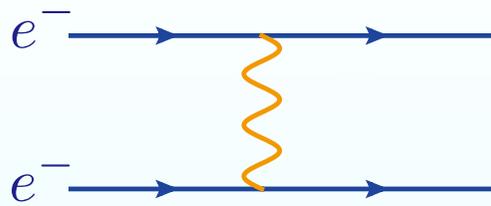
場の量子論では、
電子と電子の間で
力を媒介する粒子が
交換される



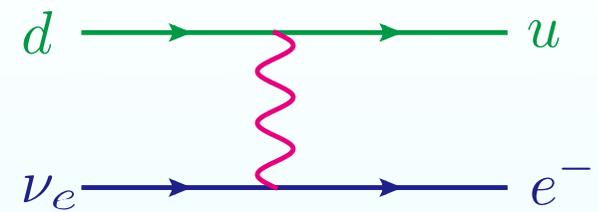
強い相互作用



電磁相互作用



弱い相互作用



グルーオン

光子

W, Z粒子

伝える粒子 = **ゲージ粒子 (ゲージ場)**

ゲージ対称性を実現するために必要

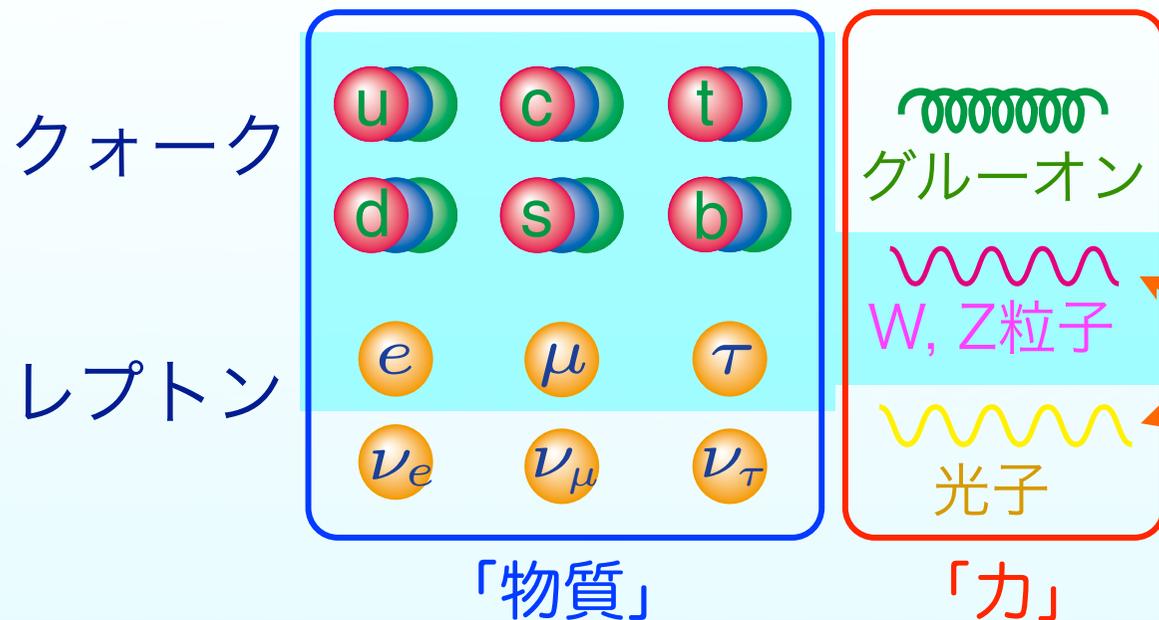
グルーオン、光子は質量は無いが、

弱い相互作用を媒介する**WとZ粒子は非常に重い**

陽子の80-90倍の質量

素粒子の標準理論

相互作用を決める対称性
ゲージ対称性



「色」の対称性

電弱対称性

「色」の対称性 グルーオン

電弱対称性

W, Z, 光子
クォーク、レプトン

質量を禁止

自発的対称性の破れ ← ヒッグス「場」

電磁対称性

光子だけ無質量

電磁と弱の分離

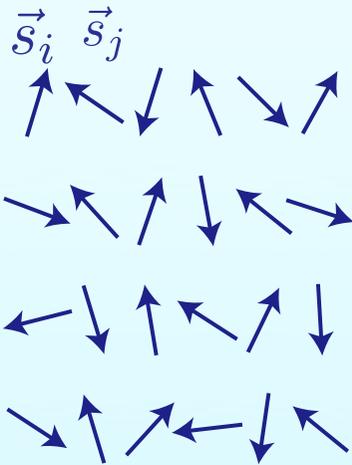
自発的対称性の破れ

理論の対称性が、実現される状態では破られること

例 磁性体 (磁石) 小さな磁石の集合

エネルギー = $-k \sum_{\langle i,j \rangle} \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j$ が最小の状態が実現

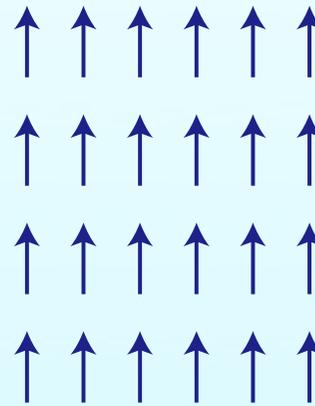
再近接対



エネルギー:大

磁化 (磁石の強さ) = 0

ベクトルの内積 → 空間回転の下で対称



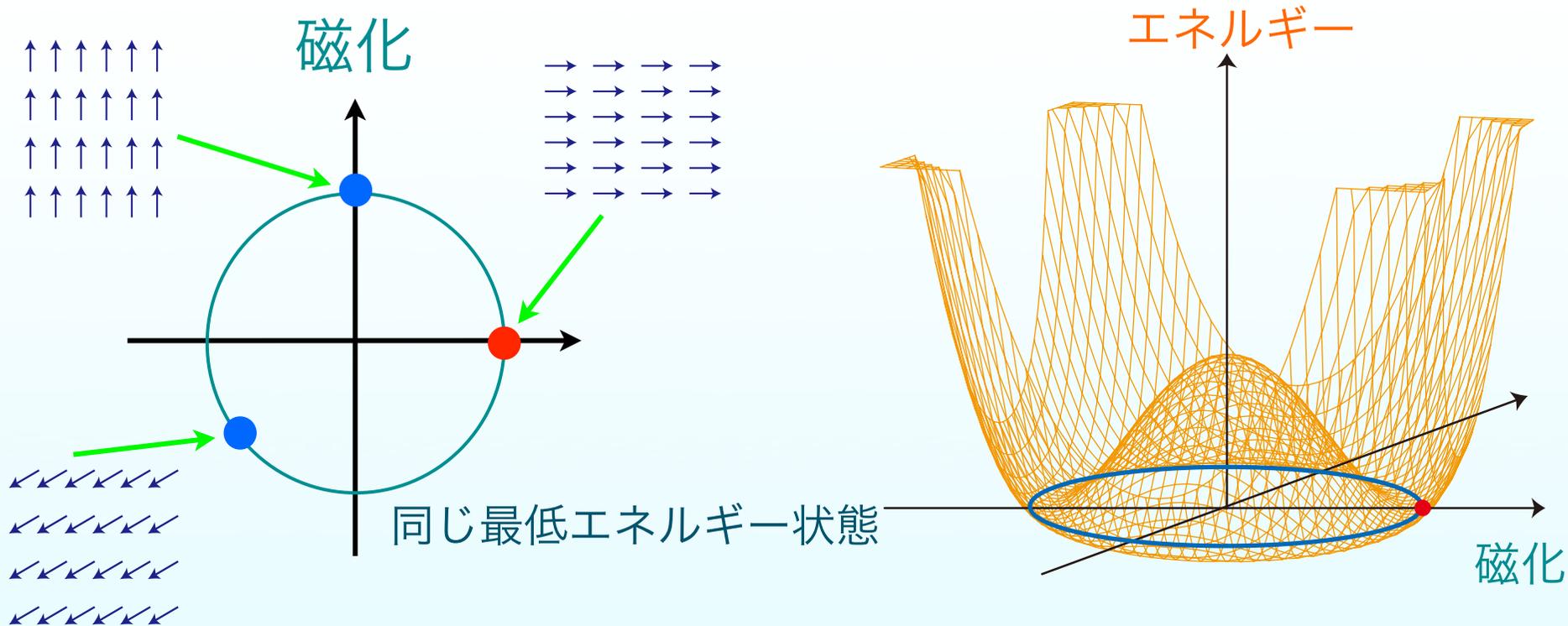
エネルギー:小

磁化 ≠ 0

どの方向に揃うかわからないが、一旦揃うと最低エネルギー



回転対称性が自発的に破れる



自然界の基本法則はシンプル → 高い対称性



現実の自然界の多様性 → 破れた対称性

素粒子物理で最初に考えたのは南部さん

破れる対称性の種類によって現象が異なる

南部さんの仕事

Nambu and Jona-Lasinio, Phys. Rev. (1961)

陽子と中性子の理論の、
ある種の対称性が自発的に破れる

カイラル対称性



質量の無い粒子が出現

南部-ゴールドストーン(NG)粒子

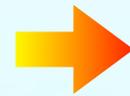
||

パイ中間子

ヒッグスの仕事

ある種の間が値を持つことで
自発的に破れる対称性が

ゲージ対称性



NG粒子は現れない

Physics Letters 12 (1964)

ゲージ粒子が質量を持つ

Phys. Rev. Lett. 13 (1964)

ヒッグス機構

クォークやレプトンの質量の出現は、**電弱統一理論**の中で

ワインバーグなど (1967)

磁化 → ヒッグス場

真空中で一定の値を持つ

2成分

4成分

電磁場が一定の値を持つと
エネルギー無限大

回転
対称性

標準理論の電弱対称性が自発的に破れると、

クォーク・レプトン

W^+ , W^- , Z 光子

ヒッグス場の1成分と
相互作用する場の全て

ヒッグス場の
3成分

クォーク・レプトン

W^+ , W^- , Z

質量の起源

ニュートリノを除く

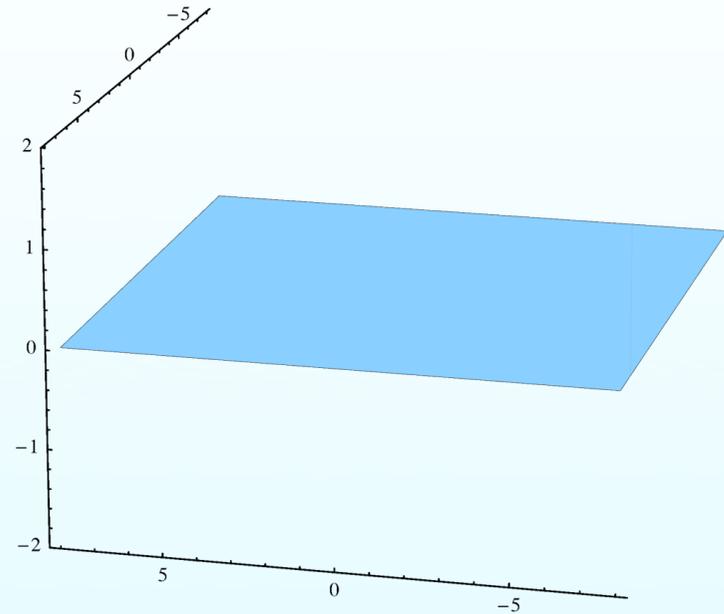
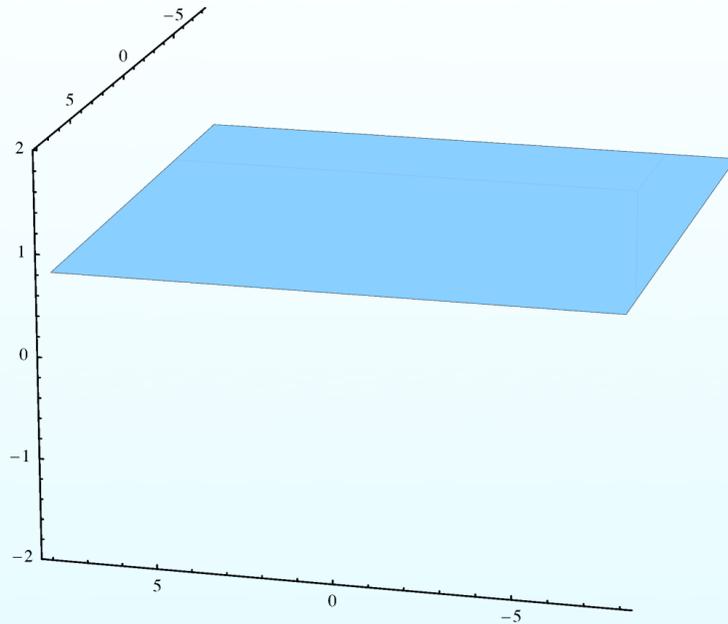
このヒッグス場の揺らぎ = ヒッグス粒子

ヒッグス場のイメージ

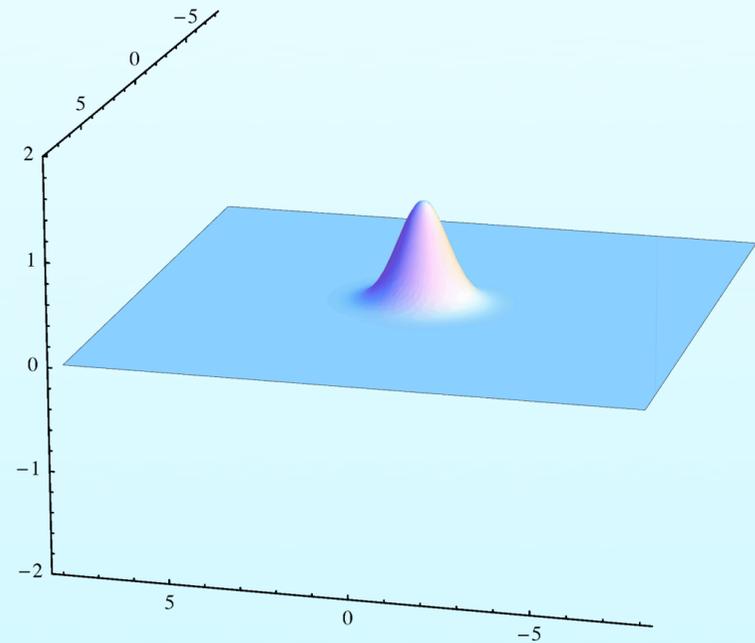
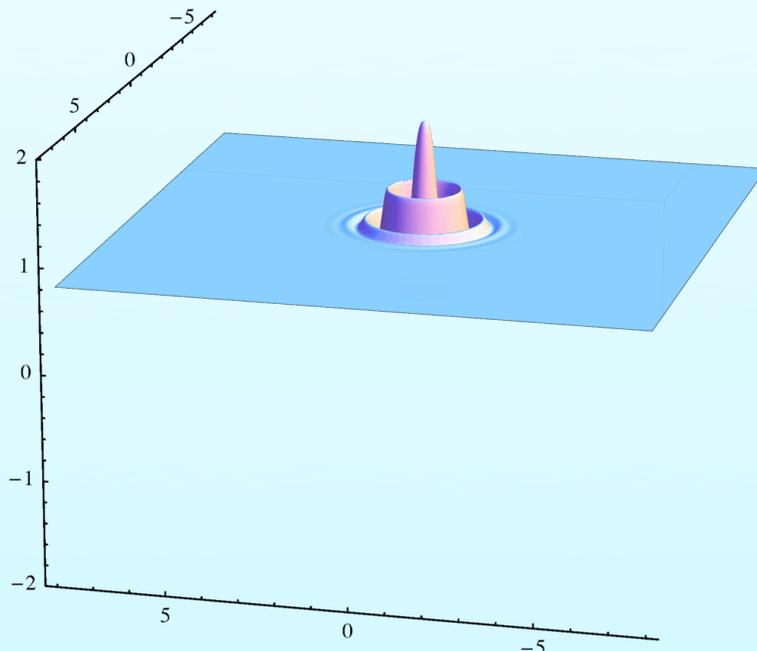
場の値

エネルギー密度

真空



1 粒子
状態



粒子が獲得する質量は、

ヒッグス場との相互作用の強さに比例

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	$+\frac{2}{3}$	u 2-3MeV	c 1.27GeV	t 172GeV
	$-\frac{1}{3}$	d 4-6MeV	s 101MeV	b 4.2GeV
荷電 レプトン	-1	e 0.51MeV	μ 106MeV	τ 1.8GeV

ウィーク・ボソン	
W^+, W^-	Z
80GeV	91GeV

ヒッグス粒子は、
 トップ・クォーク、
 W、Z粒子
 との相互作用が強い

$E = mc^2$ を使ってエネルギーに換算

1GeV = 1000MeV

eV=電子ボルト, 1eV=1.6x10⁻¹⁹ジュール

陽子の質量は938MeV

3つのクォークで10%

標準理論を記述する式

様々な過程の起こる確率を計算できる。

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{SM}} = & \bar{q}_{AL} i\gamma^\mu D_\mu q_{AL} + \bar{d}_{AR} i\gamma^\mu D_\mu d_{AR} + \bar{l}_{AL} i\gamma^\mu D_\mu q_{Al} + \bar{e}_{AR} i\gamma^\mu D_\mu e_{AR} \\
 & - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^s G^{s\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\
 & + (D_\mu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi + \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \frac{\lambda}{4} (\Phi^\dagger \Phi)^2 \\
 & + \left(y_{AB}^{(u)} \bar{q}_{AL} \tilde{\Phi} u_{BR} + y_{AB}^{(d)} \bar{q}_{AL} \Phi d_{BR} + y_{AB}^{(e)} \bar{l}_{AL} \Phi e_{BR} + \text{h.c.} \right)
 \end{aligned}$$

自発的対称性が起こると、

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{SM}} = & \bar{u}_A (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_A^{(u)}) u_A + \bar{d}_A (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_A^{(d)}) d_A + \bar{e}_A (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_A^{(e)}) e_A + \bar{\nu}_A i\gamma^\mu \partial_\mu P_{L\nu A} \\
 & - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^s G^{s\mu\nu} - \frac{1}{4} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} - \frac{1}{2} W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} + m_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_Z^2 Z_\mu Z^\mu \\
 & + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} m_H^2 \phi^2 - \frac{\lambda}{4} (4v_0 \phi^3 + \phi^4) \\
 & + g_3 \left(\bar{u}_A \gamma^\mu \frac{\lambda^s}{2} u_A + \bar{d}_A \gamma^\mu \frac{\lambda^s}{2} d_A \right) G_\mu^s + e \left(\frac{2}{3} \bar{u}_A \gamma^\mu u_A - \frac{1}{3} \bar{d}_A \gamma^\mu d_A - \bar{e}_A \gamma^\mu e \right) A_\mu \\
 & + \frac{g_2}{\cos \theta_W} \left\{ \bar{u}_A \gamma^\mu \left(\frac{1}{2} P_L - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) u_A + \bar{d}_A \gamma^\mu \left(-\frac{1}{2} P_L + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) d_A \right. \\
 & \quad \left. + \bar{\nu}_A \gamma^\mu \frac{1}{2} P_{L\nu A} + \bar{e}_A \gamma^\mu \left(-\frac{1}{2} P_L + \sin^2 \theta_W \right) e_A \right\} Z_\mu \\
 & + \frac{g_2}{\sqrt{2}} (\bar{u}_A \gamma^\mu V_{AB} P_L d_B + \bar{\nu}_A \gamma^\mu P_L e_A) W_\mu^+ + \frac{g_2}{\sqrt{2}} (\bar{d}_A V_{AB}^\dagger \gamma^\mu P_L u_B + \bar{e}_A \gamma^\mu P_{L\nu A}) W_\mu^- \\
 & - \left(\frac{m_A^{(u)}}{v_0} \bar{u}_A u_A + \frac{m_A^{(d)}}{v_0} \bar{d}_A d_A + \frac{m_A^{(e)}}{v_0} \bar{e}_A e_A \right) \phi + 4 \left(\frac{m_Z^2}{2v_0^2} Z_\mu Z^\mu + \frac{m_W^2}{v_0^2} W_\mu^+ W^{-\mu} \right) (2v_0 \phi + \phi^2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SM}} = & \bar{q}_{AL} i\gamma^\mu D_\mu q_{AL} + \bar{d}_{AR} i\gamma^\mu D_\mu d_{AR} + \bar{l}_{AL} i\gamma^\mu D_\mu q_{AL} + \bar{e}_{AR} i\gamma^\mu D_\mu e_{AR} \\
& - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^s G^{s\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\
& + (D_\mu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi + \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \frac{\lambda}{4} (\Phi^\dagger \Phi)^2 \\
& + \left(y_{AB}^{(u)} \bar{q}_{AL} \tilde{\Phi} u_{BR} + y_{AB}^{(d)} \bar{q}_{AL} \Phi d_{BR} + y_{AB}^{(e)} \bar{l}_{AL} \Phi e_{BR} + \text{h.c.} \right)
\end{aligned}$$

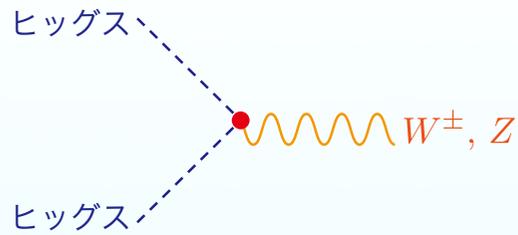
$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SM}} = & \bar{u}_A (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_A^{(u)}) u_A + \bar{d}_A (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_A^{(d)}) d_A + \bar{e}_A (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_A^{(e)}) e_A + \bar{\nu}_A i\gamma^\mu \partial_\mu P_L \nu_A \\
& - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^s G^{s\mu\nu} - \frac{1}{4} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} - \frac{1}{2} W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} + m_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_Z^2 Z_\mu Z^\mu \\
& + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} m_H^2 \phi^2 - \frac{\lambda}{4} (4v_0 \phi^3 + \phi^4) \\
& + \underbrace{g_3 \left(\bar{u}_A \gamma^\mu \frac{\lambda^s}{2} u_A + \bar{d}_A \gamma^\mu \frac{\lambda^s}{2} d_A \right) G_\mu^s}_{\text{強い相互作用}} + \underbrace{e \left(\frac{2}{3} \bar{u}_A \gamma^\mu u_A - \frac{1}{3} \bar{d}_A \gamma^\mu d_A - \bar{e}_A \gamma^\mu e \right) A_\mu}_{\text{電磁相互作用}}
\end{aligned}$$

弱い
相互作用

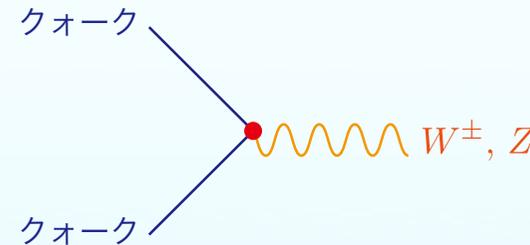
$$\begin{aligned}
& + \frac{g_2}{\cos \theta_W} \left\{ \bar{u}_A \gamma^\mu \left(\frac{1}{2} P_L - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) u_A + \bar{d}_A \gamma^\mu \left(-\frac{1}{2} P_L + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) d_A \right. \\
& \quad \left. + \bar{\nu}_A \gamma^\mu \frac{1}{2} P_L \nu_A + \bar{e}_A \gamma^\mu \left(-\frac{1}{2} P_L + \sin^2 \theta_W \right) e_A \right\} Z_\mu \quad \text{小林-益川行列} \\
& + \frac{g_2}{\sqrt{2}} (\bar{u}_A \gamma^\mu V_{AB} P_L d_B + \bar{\nu}_A \gamma^\mu P_L e_A) W_\mu^+ + \frac{g_2}{\sqrt{2}} (\bar{d}_A V_{AB}^\dagger \gamma^\mu P_L u_B + \bar{e}_A \gamma^\mu P_L \nu_A) W_\mu^- \\
& - \left(\frac{m_A^{(u)}}{v_0} \bar{u}_A u_A + \frac{m_A^{(d)}}{v_0} \bar{d}_A d_A + \frac{m_A^{(e)}}{v_0} \bar{e}_A e_A \right) \phi + 4 \left(\frac{m_Z^2}{2v_0^2} Z_\mu Z^\mu + \frac{m_W^2}{v_0^2} W_\mu^+ W^{-\mu} \right) (2v_0 \phi + \phi^2)
\end{aligned}$$

W, Zとヒッグス場の相互作用 = 電弱相互作用

対称性で決まる **普遍的な形**



= W, Zとクォークやレプトンの相互作用



相互作用の大きさは知られていた

1983年に **理論の予測** 通りの質量のWとZが発見された

@ CERN-SPS 450GeV $p\bar{p}$

電弱対称性が自発的に破れた結果、

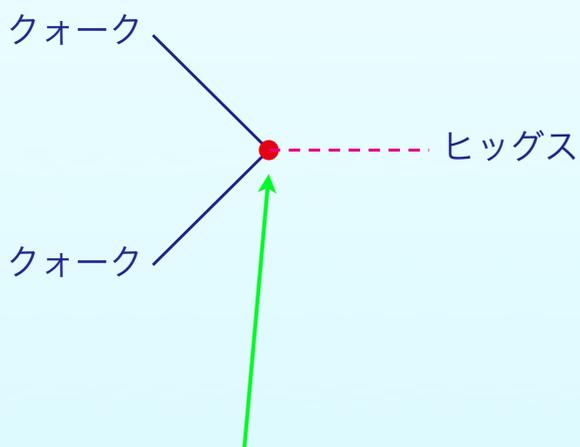
WとZが質量を持つ

ヒッグス機構が正しいことの状況証拠

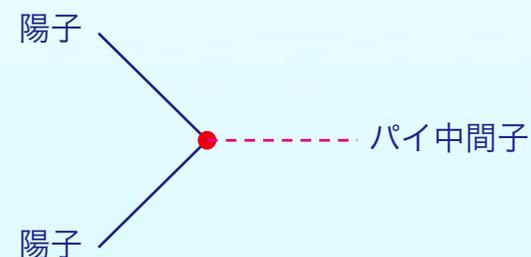
● 全てのクォークと荷電レプトンの質量もヒッグス機構の結果なら文句無し。

● クォークやレプトンの質量は既知だが、ヒッグス場との相互作用は測られていない。

ヒッグス粒子を作ったことが無かった。

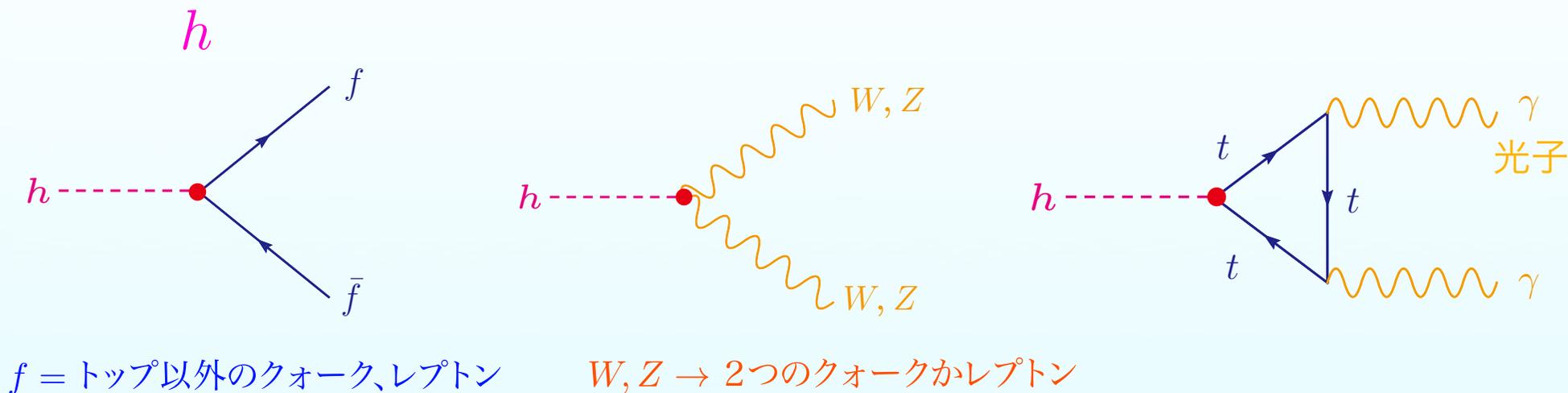


湯川相互作用



強さはクォーク・レプトンの質量に比例

ヒッグス場と他の場の相互作用の強さを知るには、
ヒッグス粒子の様々な崩壊確率（分岐比）を測ればよい。



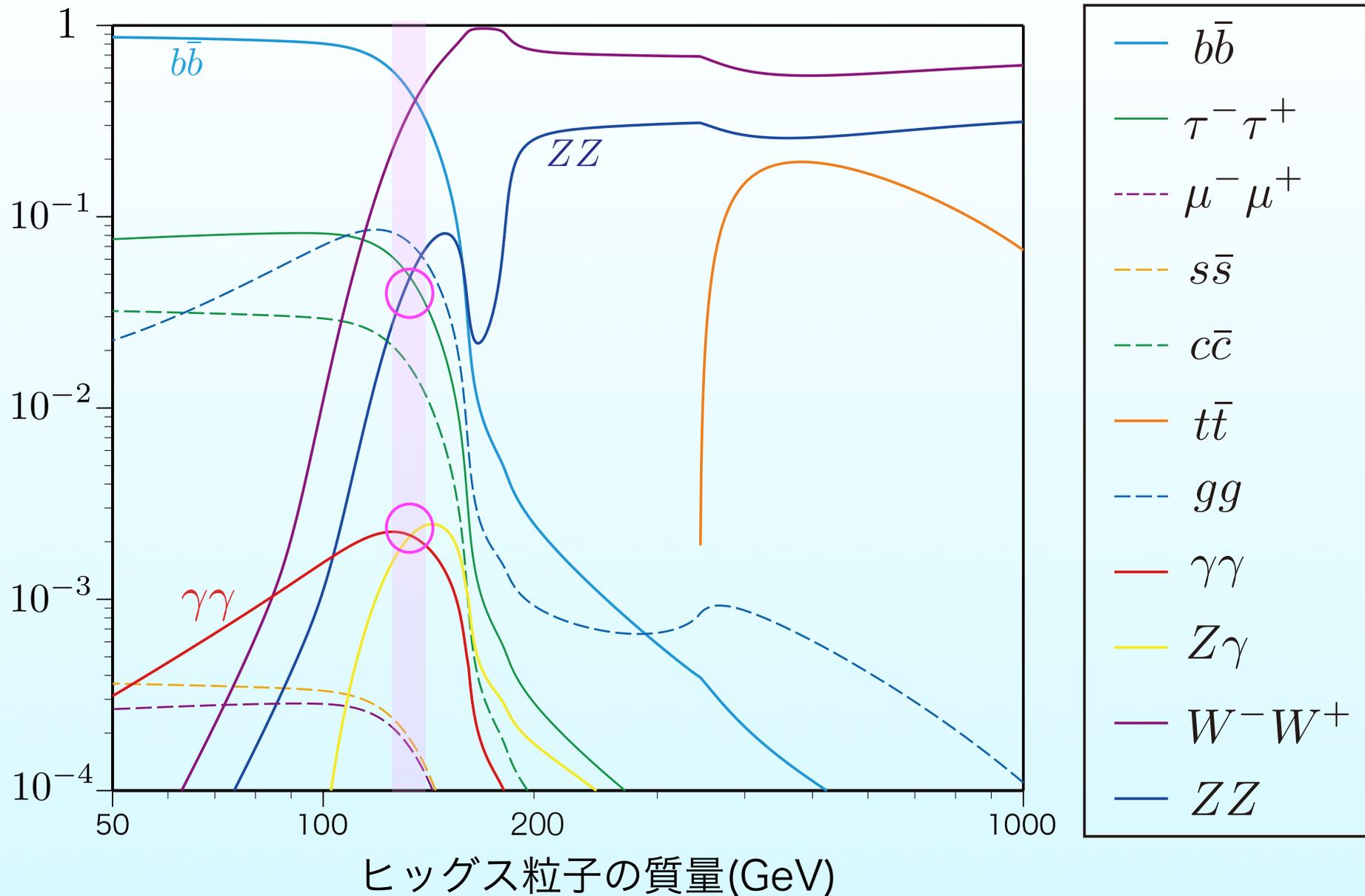
分岐比の例

$$Br(h \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\text{2つの光子に崩壊したヒッグス粒子の数}}{\text{生成されたヒッグス粒子の数}}$$

標準理論では、粒子の質量とヒッグス場との相互作用に比例関係があり、
計算で予言可能。

大学院生の演習問題レベル

標準理論におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比



ILCのような加速器実験ができれば
ヒッグス粒子の性質を詳細に調べられる。

- ヒッグスの電弱ゲージ相互作用
- ヒッグスとクォーク・レプトンとの湯川相互作用
- ヒッグスの質量
- ヒッグスの自己相互作用

互いに関係



標準理論の新しい検証

ヒッグス関係の物理はこれから

これまでの加速器実験の結果と標準理論は合っている。

ニュートリノ質量とダークマターは標準理論に無い！

ニュートリノ振動

超新星、背景放射の揺らぎ

標準理論の拡張が必要

ヒッグス場と宇宙

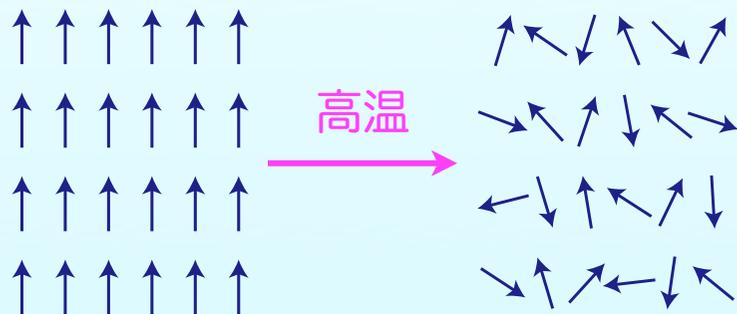
現在の宇宙

ヒッグス場が一定の値

クォーク、レプトン、W、Zが質量を持つ

初期宇宙では？

磁性体のように対称性が回復する**相転移**が起こる



$T >$ キュリー温度

Fe: 1043K

ミクロな記述は同じ
状態が変わる

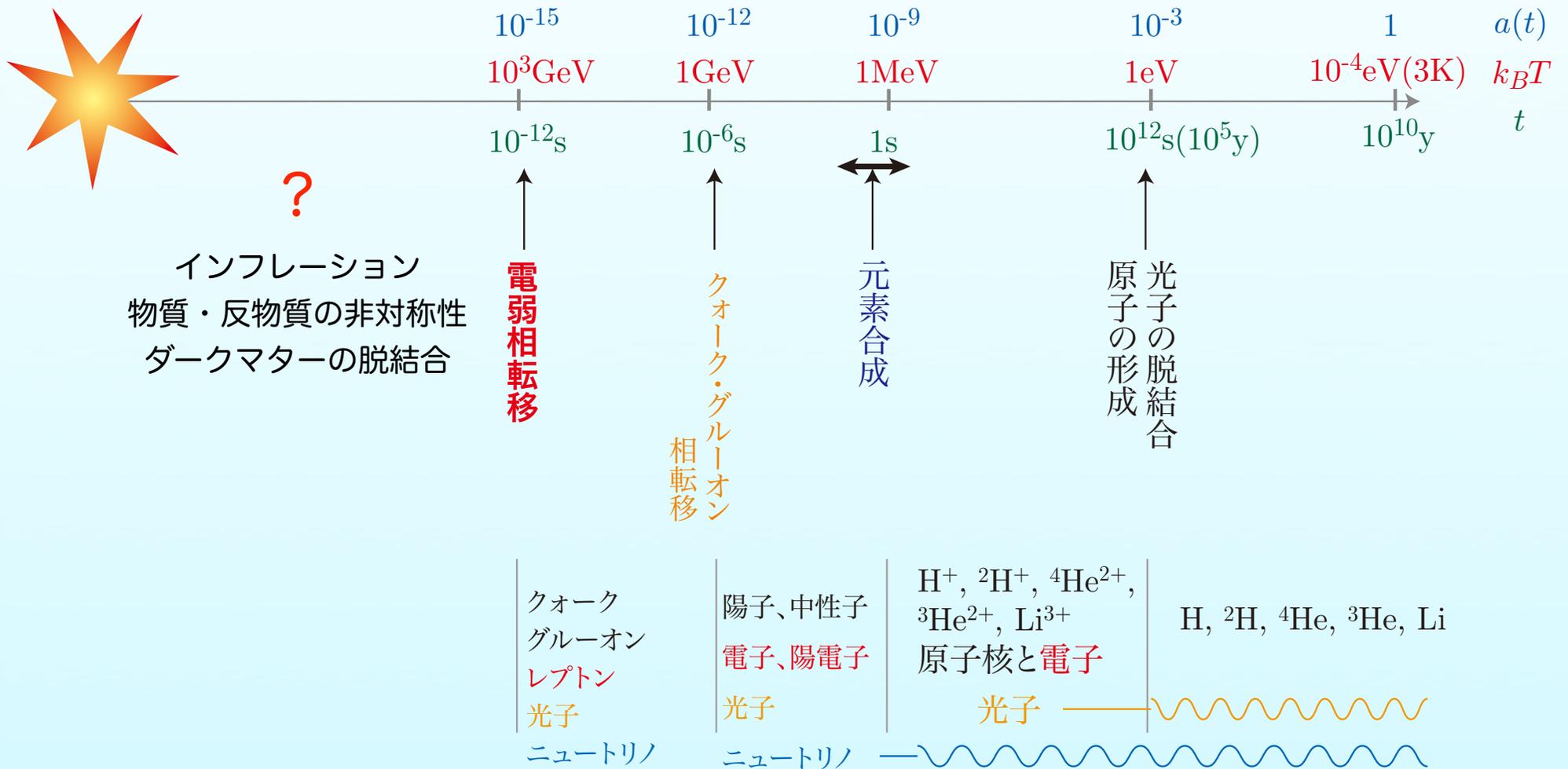
水の気相・液相転移

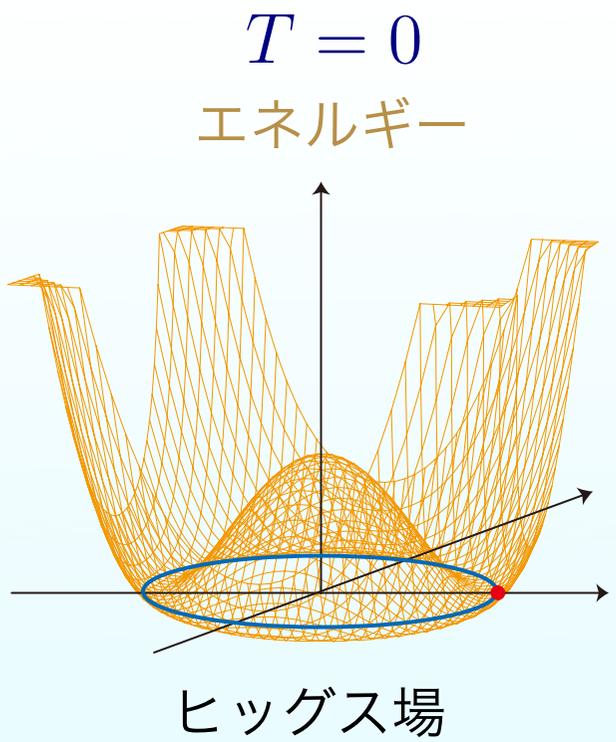
凝結
蒸発

H₂O 圧力や体積が変わる

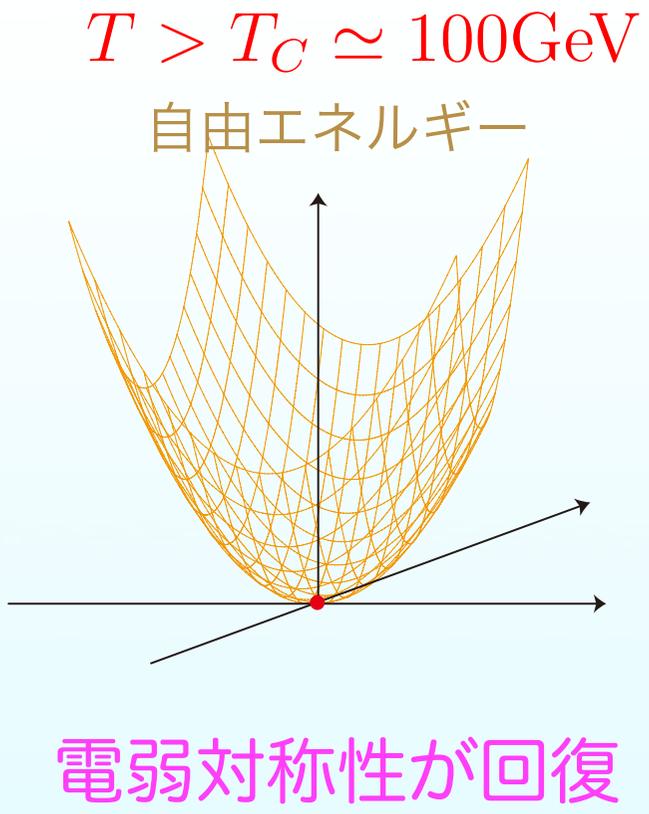
時間をさかのぼると

現在 $T=2.7\text{K}$ ($2.4 \times 10^{-4}\text{eV}$) **宇宙背景放射**
 光子の脱結合 $T=3000\text{K}$ (0.26eV)





電弱相転移
→
約100GeV



相転移の性質はヒッグスの物理と関係している

標準理論のヒッグス粒子(125GeV)なら静かな相転移
 拡張した理論なら「激しい」相転移

物質・反物質の非対称性の生成 } を伴う可能性も
 重力波の生成

まとめ

- ヒッグス場は標準理論における電弱対称性の自発的破れを引き起こす。

自然界では電磁・弱い相互作用は分離

- その励起であるヒッグス粒子の存在は当然視されてきた。ヒッグス粒子の質量は標準理論の枠内では予言不可能。
- ヒッグス粒子の性質の詳細は、**標準理論の先にある新しい物理**の解明のキーである。
- 宇宙の温度が 100GeV (10^{15} 度)より高いときの初期宇宙の解明にも必要。