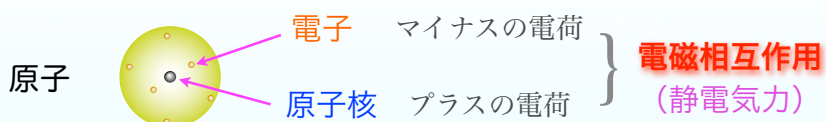


# 素粒子物理とヒッグス粒子

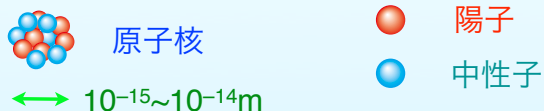
佐賀大学工学系研究科物理科学専攻

船久保 公一

## 素粒子の基本理論



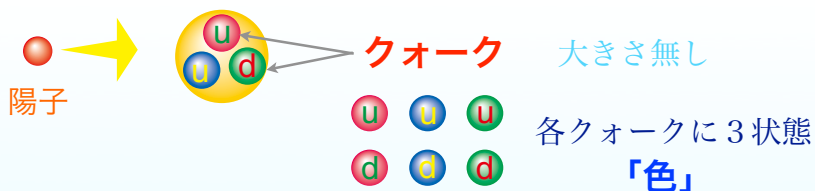
←→  $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}$  ≪ 可視光の波長  $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{m}$   
X線の波長  $10^{-11} \sim 10^{-8} \text{m}$



←→  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$

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



**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

電子と同じ電荷



電子 ミュー タウ

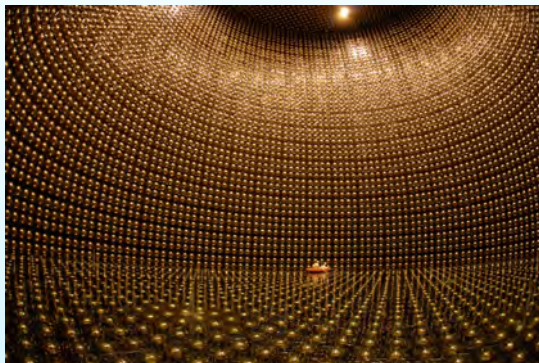
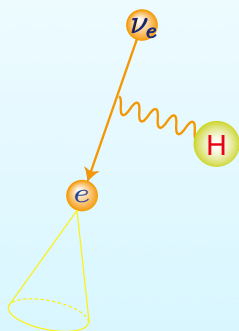
電荷が無い



**レプトン**  
大きさ無し

ニュートリノ

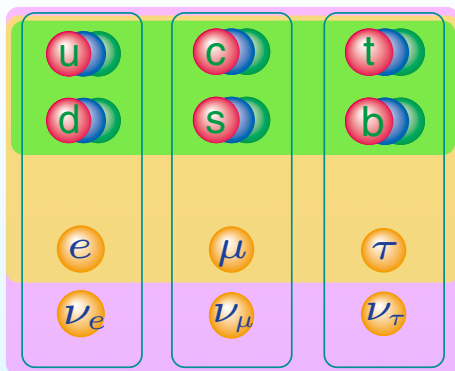
弱い相互作用 だけ



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

## これまでの素粒子のまとめ

クォーク



強い相互作用

電磁相互作用

レプトン

弱い相互作用

第1世代 第2世代 第3世代

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

## 素粒子とその相互作用の記述

素粒子といっても「粒」が見える訳ではない。

20世紀以降  
の物理の根幹

量子論：粒子の位置と運動量間の不確定性関係  
物理量の観測値は確率的に決まる

相対論：質量・エネルギーの等価性  $E = mc^2$

場の量子論

「場」は素粒子の種類ごと、空間を満たしている

粒子, 反粒子 = 場の励起状態

例 光子 = 電磁場の励起

光子の反粒子 = 光子

強い相互作用      電磁相互作用      弱い相互作用

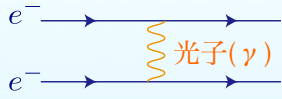


グルーオン

光子

W, Z粒子

粒子が伝える **ゲージ粒子 (ゲージ場)**



$$V(r) = \frac{-1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

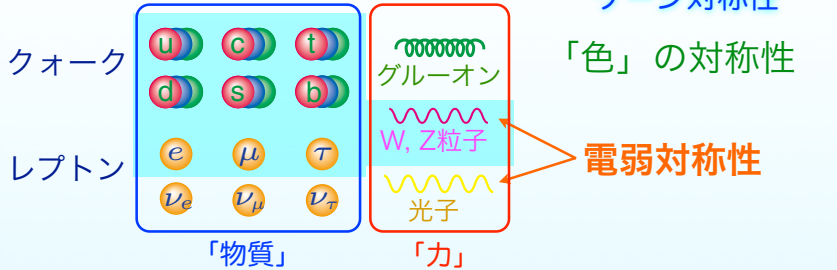
素粒子の基本法則 (運動方程式) は **対称性の原理** で決まっている

←→ 規則性、保存の法則

理論のパラメータは、  
相互作用の強さを決める数少ない定数だけ!

## 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    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**

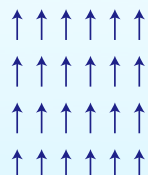
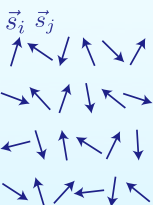
## 自発的対称性の破れ

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

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

↑  
ベクトルの内積 → **空間回転**の下で対称



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

エネルギー: 大

エネルギー: 小

**回転対称性が**

磁化 (磁石の強さ) = 0

磁化 ≠ 0

**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**

特別講演会「ヒッグス粒子」2012年7月18日 10 素粒子物理とヒッグス粒子

**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 → 質量の無い粒子が出現

カイラル対称性 → 南部-ゴールドストーン粒子

||

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 → NG粒子は現れない

ゲージ対称性 → 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)

特別講演会「ヒッグス粒子」2012年7月18日 11 素粒子物理とヒッグス粒子

磁化 → ヒッグス場 真空で一定の値を持つ

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

クォーク・レプトン	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z	光子	全て無質量
↓	↓	↓	↓
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 <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z		<b>質量の起源</b>

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

特別講演会「ヒッグス粒子」2012年7月18日 12 素粒子物理とヒッグス粒子

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

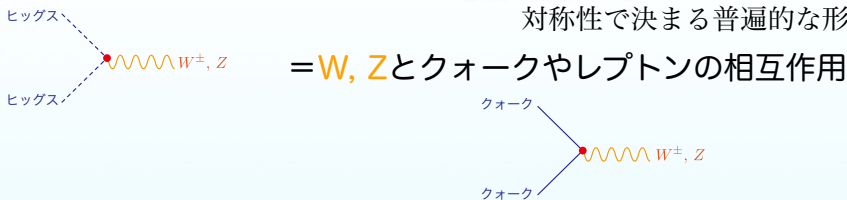
	電荷	第1世代	第2世代	第3世代	ウィーク・ボソン	
クォーク	$+\frac{2}{3}$	$u$	$c$	$t$	$W^+, W^-$	$Z$
		2-3MeV	1.27GeV	172GeV	80GeV	91GeV
クォーク	$-\frac{1}{3}$	$d$	$s$	$b$		
		4-6MeV	101MeV	4.2GeV		
荷電レプトン	-1	$e$	$\mu$	$\tau$		
		0.51MeV	106MeV	1.8GeV		

$E = mc^2$ を使ってエネルギーに換算  
 1GeV = 1000MeV  
 陽子の質量は938MeV

ヒッグス粒子は、  
 トップ・クォーク、W、Z  
 との相互作用が強い

## 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



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  $p\bar{p}$

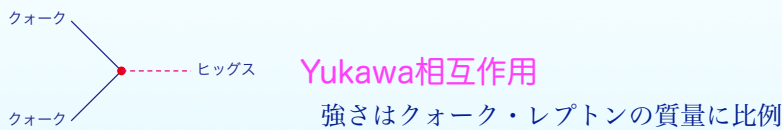
電弱対称性が自発的に破れた結果、  
 WとZが質量を持つ

## ヒッグス機構が正しいことの状況証拠

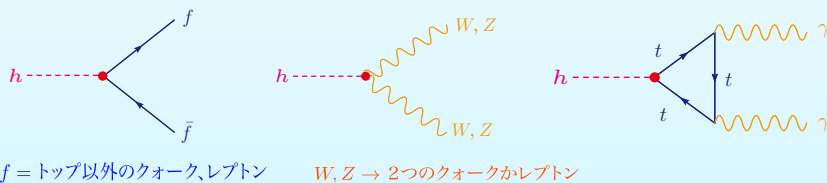
ヒッグス場を使わない自発的対称性の破れの可能性もある

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。

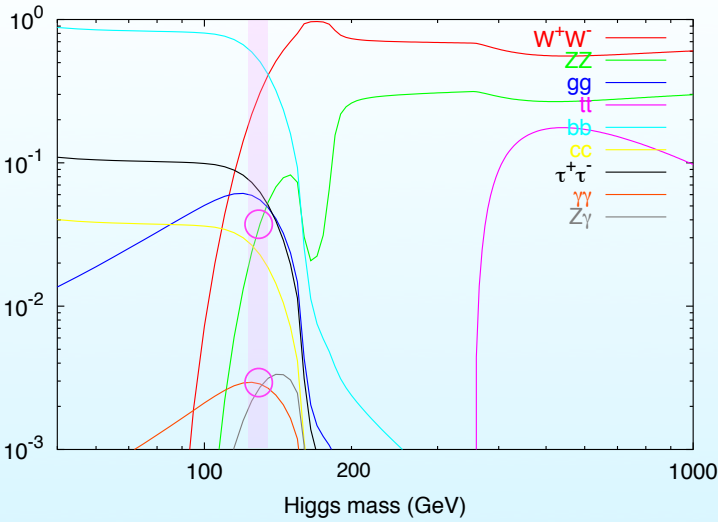


ヒッグス粒子の様々な崩壊確率 (分岐比) を測ればよい。



# 標準理論におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比

Branching Ratio of the SM Higgs boson

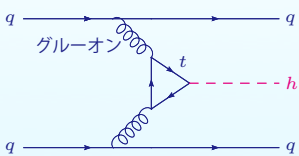


## 分岐比の例

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

## 生成過程

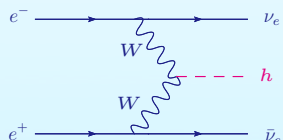
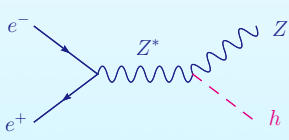
### LHC



入射クォークのエネルギーは確率的にしか決まらない

生成される粒子数が膨大でヒッグスから来た粒子の特定が難しい

### ILC, LEP



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

この後の杉山さんのお話

**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**

## 標準理論の先にある物理

拡張した理論の幾つかは、ヒッグス場の数が多い。

標準理論：4成分が1つ → 4成分が2つ (+2成分が1つ)  
etc.

- ★クォーク・レプトンの質量と湯川相互作用の関係が変わる。
- ★「ヒッグス粒子」が複数個。(荷電、中性とも)
- ★ダークマターを含む未知の粒子を予言。
- ★真空の構造、真空エネルギー
- ★etc.

**ヒッグスの物理は、  
新しい物理のヒントである。**

## ヒッグス場と宇宙

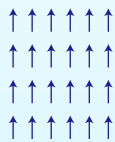
現在の宇宙

ヒッグス場が一定の値

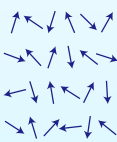
クォーク、レプトン、W、Zが質量を持つ

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



高温



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

$T >$  キュリー温度

Fe: 1043K

H<sub>2</sub>O 圧力や体積が変わる

初期宇宙

## ビッグバン宇宙論

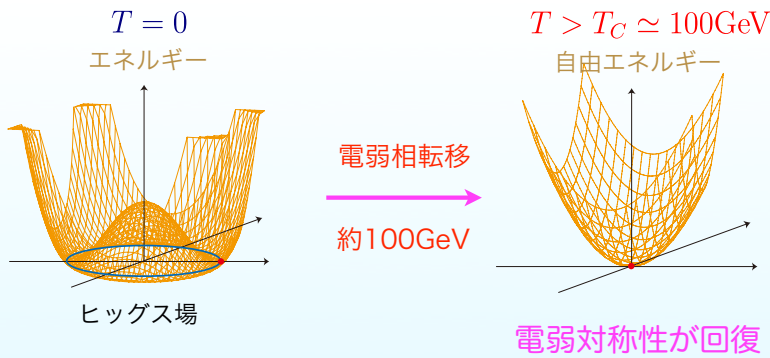
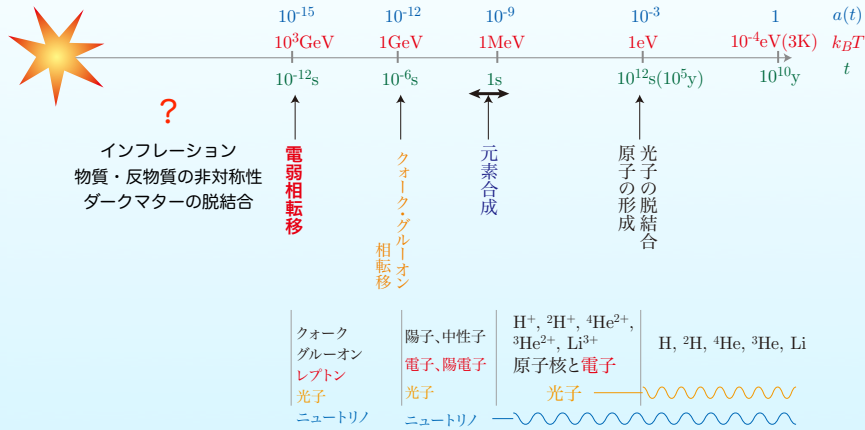
高温・高密度のプラズマ  
膨張により自然に冷却

- 空間の膨張
- 宇宙背景放射
- 軽元素合成

詳しくは...

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  $T=3000\text{K}$  ( $0.26\text{eV}$ )



### 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( $125\text{GeV}$ )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  
 重力波の生成 } を伴う可能性も

## 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 $100\text{GeV}$ ( $10^{15}$ 度)より高いときの初期宇宙の解明にも必要。