

# 素粒子物理の新展開

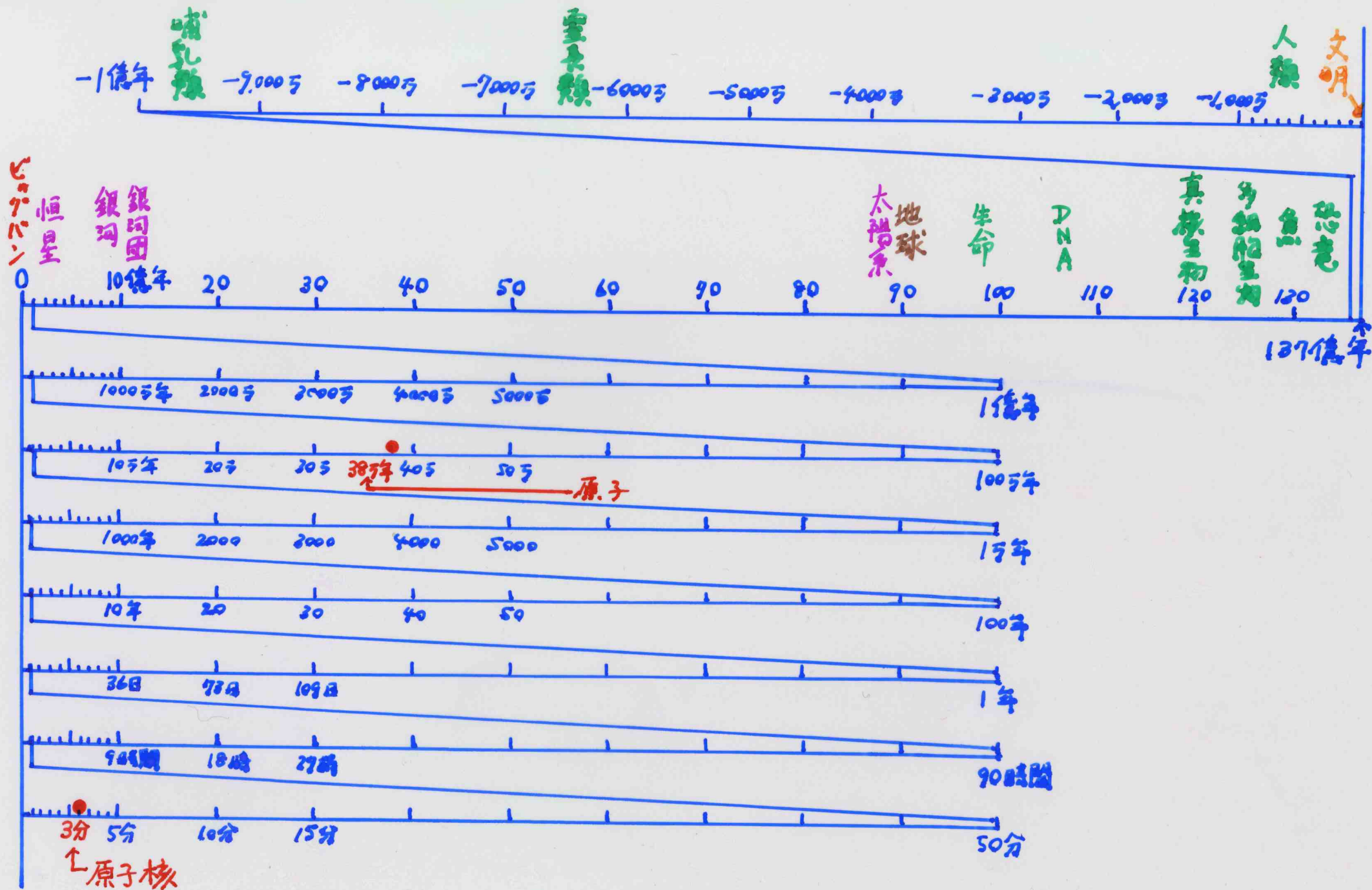
2004年11月3日 東京大学 宇田講堂

一般公開講演会 「素粒子物理の最前線」

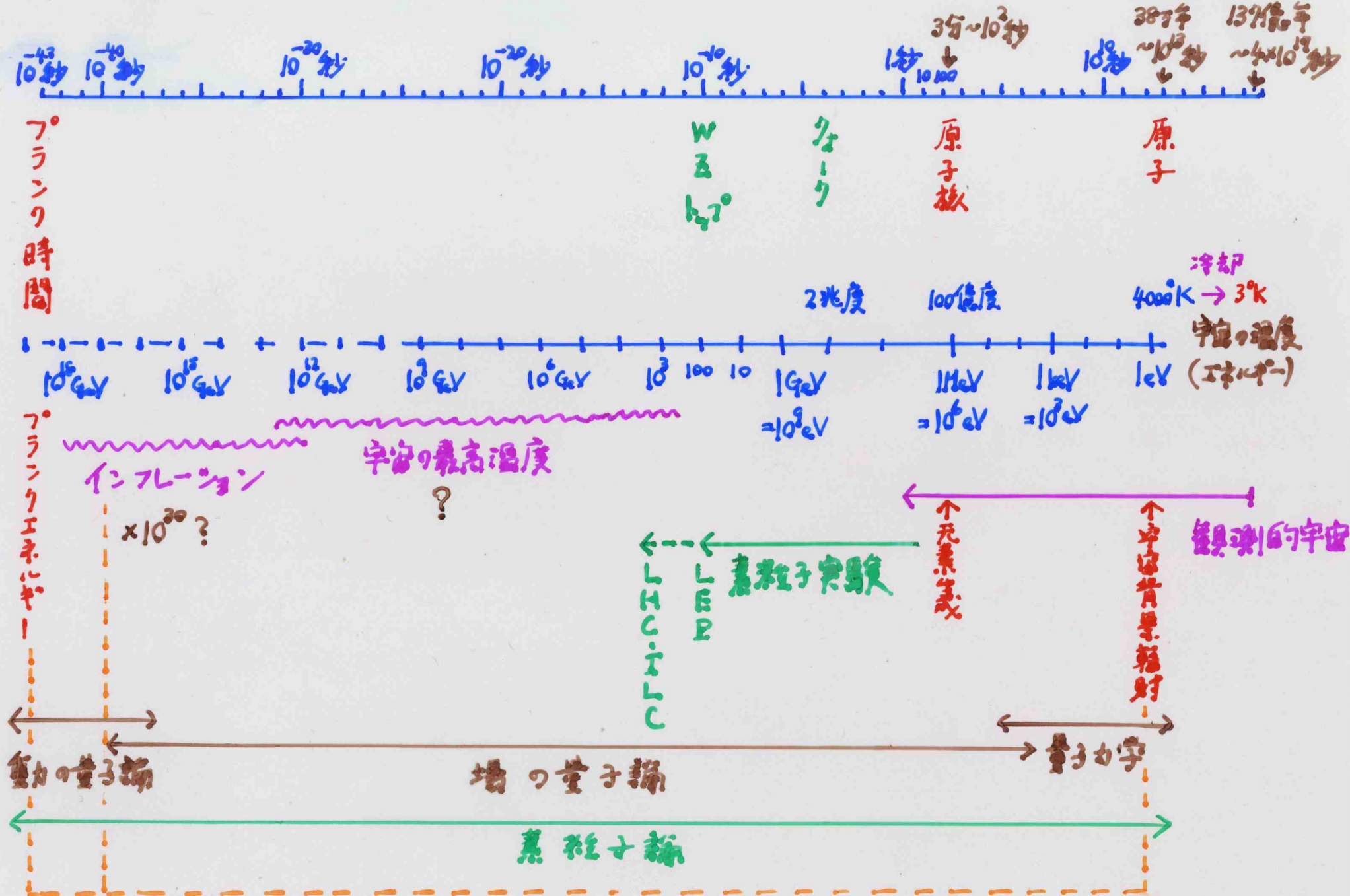
高エネルギー加速器研究機構(KEK)

萩原 薫

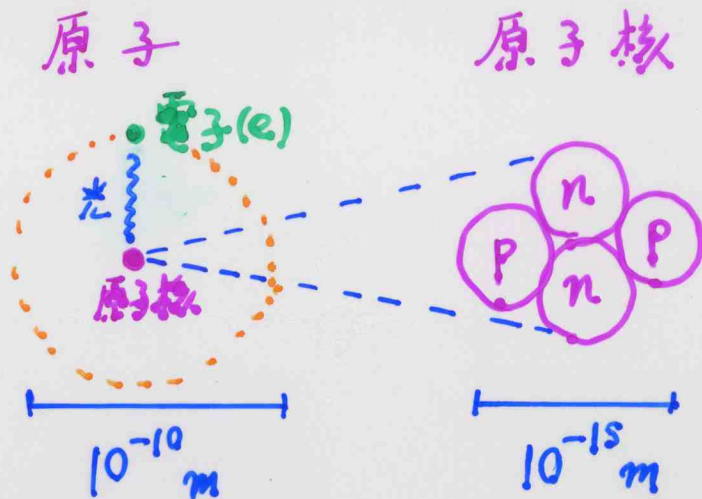
# 宇宙史(線型スケール)



# 宇宙史 (対数スケール)

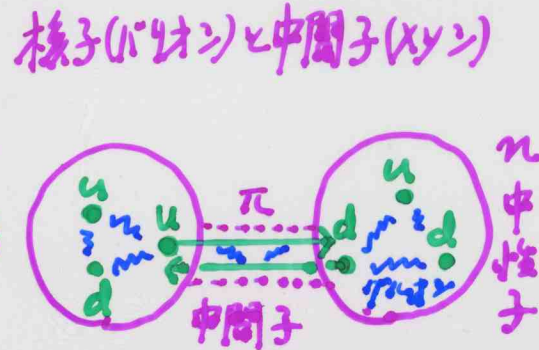
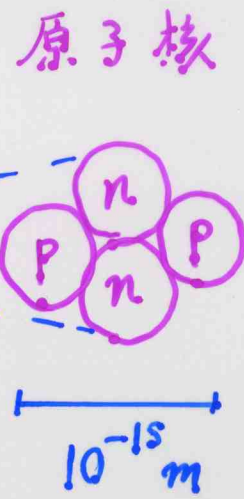


# 素粒子の仲間 (第一世代) と 4 つの力

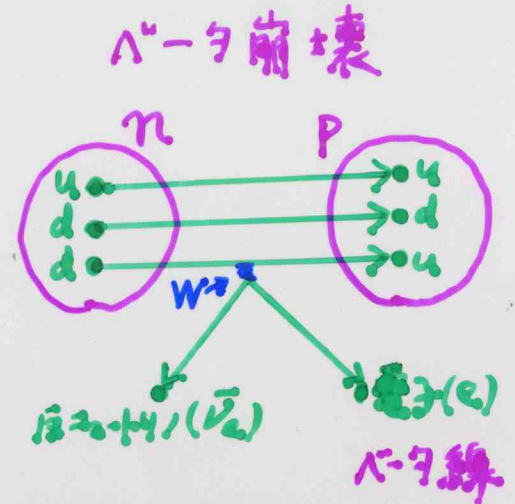


電磁気力  
長距離力  
 $F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \alpha$

重力  
長距離力  
 $F = \frac{M_1 M_2}{r^2} G_N$



強い力 (核力)  
短距離力  
 $10^{-15} \text{ m}$



弱い力  
短距離力  
 $10^{-18} \text{ m}$

力を媒介する素粒子 (ボソン粒子)    物質を作る素粒子 (フェルミ粒子)

| 力    | 素粒子                                 | スピン |
|------|-------------------------------------|-----|
| 強い力  | グルオン                                | 1   |
| 弱い力  | W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z |     |
| 電磁気力 | 光子                                  |     |
| 重力   | 重力子                                 | 2   |

| 素粒子     |                           | スピン |
|---------|---------------------------|-----|
| クォーク    | レプトン                      | 1/2 |
| u (アップ) | ν <sub>e</sub> (電子ニュートリノ) |     |
| d (ダウン) | e (電子)                    |     |

# 素粒子の仲間 (三世代)

| 電荷 | クォーク           |                | レプトン        |                       |      |
|----|----------------|----------------|-------------|-----------------------|------|
|    | u (アップ)        | d (ダウン)        | e (電子)      | $\nu_e$ (電子ニュートリノ)    | 第一世代 |
|    | c (チャーム)       | s (ストレンジ)      | $\mu$ (ミュー) | $\nu_\mu$ (ミューニュートリノ) | 第二世代 |
|    | t (トップ)        | b (ボトム)        | $\tau$ (タウ) | $\nu_\tau$ (タウニュートリノ) | 第三世代 |
|    | $+\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | -1          | 0                     |      |

- 何故くり返すのか?
- 何故 3 なのか?
- 粒子・反粒子変換  
対称性の破れ  
(CP 非保存) は  
クォーク 3 世代必要  
(小林・益川 1973)



- LEP での  $e^+e^-$  実験で  
3 ニュートリノ が確定。



- ビッグバン宇宙論による宇宙の  
元素合成計算 (D, Li, He) から  
3~4 ニュートリノ が予想されていた。



物質宇宙の謎

場の量子論から導き出した条件

クォークの世代数 = レプトンの世代数

$$\underbrace{(+\frac{2}{3}) \times 3}_{u \text{ 色}} + \underbrace{(-\frac{1}{3}) \times 3}_{d \text{ 色}} + (-1) + (0) = 0$$

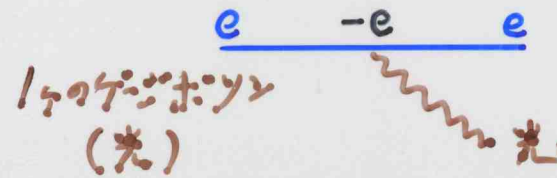
$$n \rightleftharpoons p + e^- + \bar{\nu}_e$$

生き残る中性子数は、宇宙温度の低下速度に依存する  
ニュートリノ数に依存

# 素粒子の標準模型 $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ ゲージ理論

電  $U(1)_{EM}$

電荷を持つクォークとレプトン  
(除くニュートリノ)



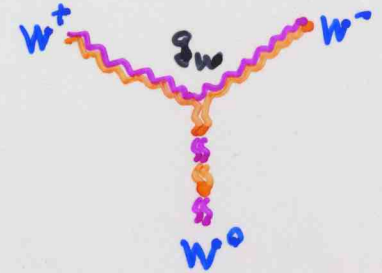
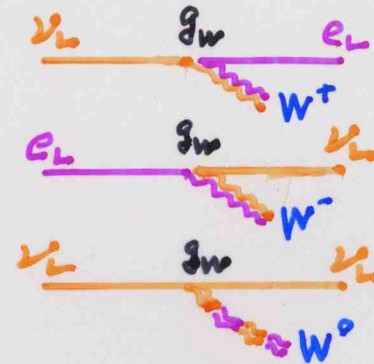
~~~~~ 光

弱  $SU(2)_L$

左巻きのクォークとレプトンは 2 重項

$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$

$2 \times 2 - 1 = 3$  のゲージボソン  
 $W^+, W^-, W^0$



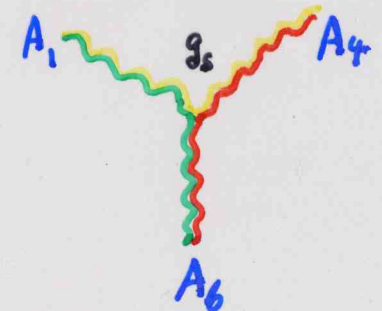
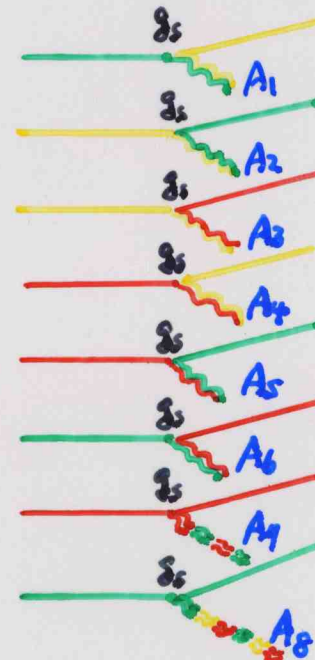
強  $SU(3)_C$

クォークは 3 重項.

$\begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}$

$3 \times 3 - 1 = 8$  のゲージボソン

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$



全てのゲージボソンは質量ゼロ.

ゲージボソンの結合は唯一.  $\begin{cases} e & U(1)_{EM} \\ g_W & SU(2)_L \\ g_S & SU(3)_C \end{cases}$

↑  
ゲージボソンの自己結合

# 自発的対称性の破れとヒッグスボソン (素粒子の重さの起源)

ゲージ対称性  $\Rightarrow$  高振動(高エネルギー)の量子効果が規則的(くり込み可)  $\Rightarrow$  場の量子論 OK

$\Rightarrow$  全ての素粒子(クォーク, レプトン, ゲージボソン)の質量がゼロ  $\times$

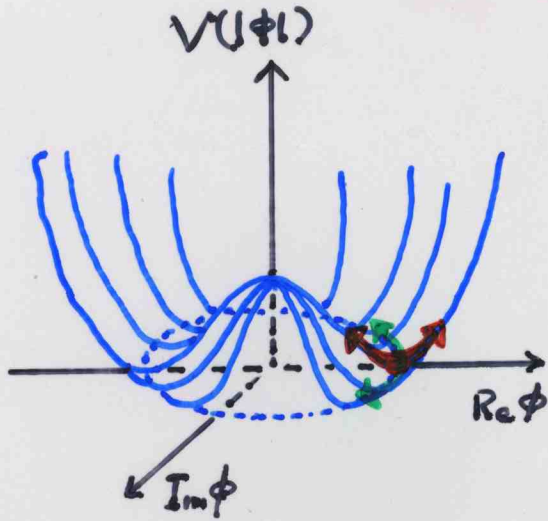
$\Rightarrow$  高エネルギーの対称性をこわさず, 低エネルギー(真空)の対称性をこわす.

## 自発的対称性の破れ

(134) 原点  $\phi=0$  の周りの回転対称性をもつ  $V(|\phi|)$  の最低エネルギーが  $\langle \phi \rangle = (v, 0)$

真空  $\phi = \langle \phi \rangle$  の周りの量子的揺らぎ

$\left\{ \begin{array}{l} \text{最低エネルギー方向 (緑の矢印)} \rightarrow \text{質量ゼロのボソン} \rightarrow \text{W, Z の成分} \\ \text{直角方向 (赤の矢印)} \rightarrow \text{重いボソン} \rightarrow \text{ヒッグスボソン} \end{array} \right.$



## 素粒子の重さ

= ヒッグスボソンとの結合の強さ

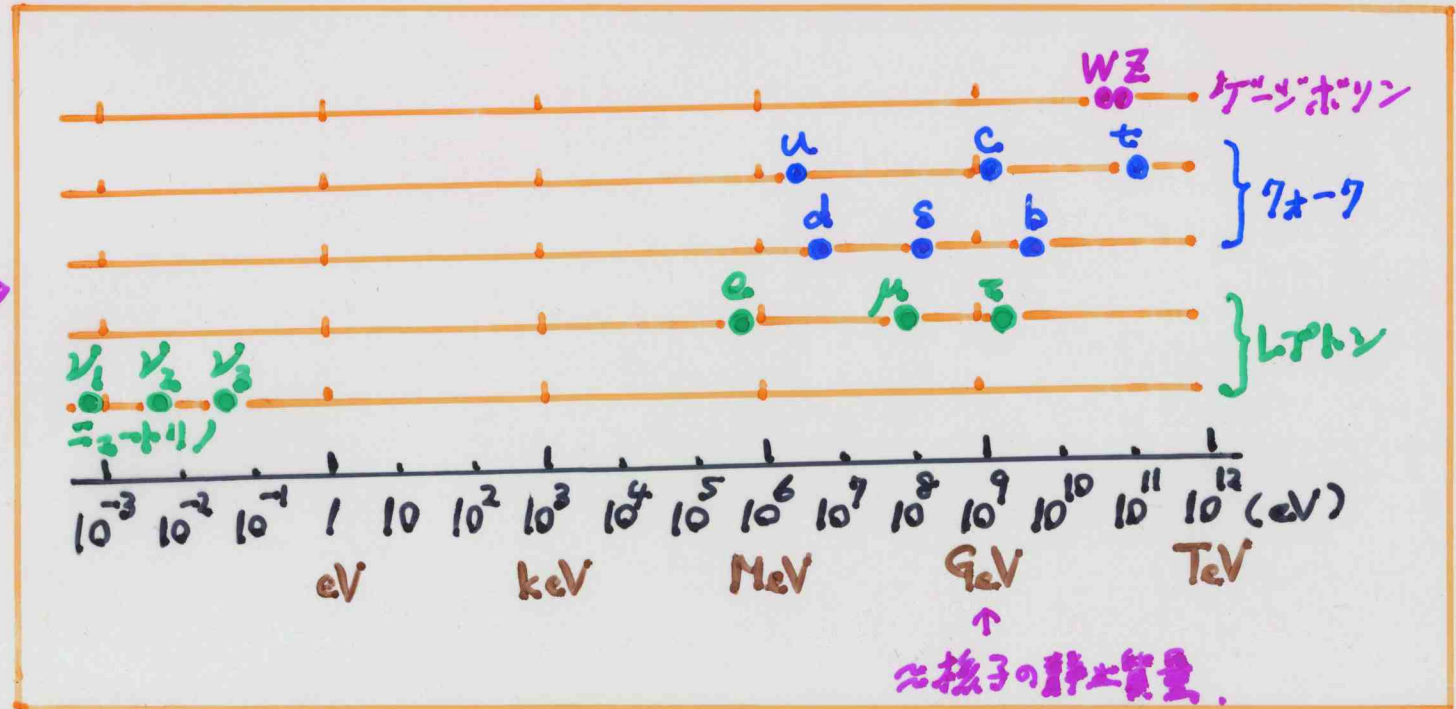
素粒子の周期律表  $\Rightarrow$

?

(類)  $\langle \phi \rangle = \langle e_+ e_- \rangle \neq 0$

$\Rightarrow$  あるところ場所には電子対

$\Rightarrow$  超電導.



# 大統一理論 (フォークレプトン, ミゲージカ)

電荷の量子化の不思議



フォークレプトンが別物とは考えられない。



SU(5) 5「色」ゲージ理論 (1973)

( $d, d, d, e^+, \bar{\nu}_e$ )

電荷  $-\frac{1}{3} -\frac{1}{3} -\frac{1}{3} +1 +0 = 0$

$\underbrace{\hspace{1cm}}_{SU(3)} \quad \underbrace{\hspace{1cm}}_{SU(2)}$   
 $\underbrace{\hspace{2cm}}_{U(1)_{em}}$

陽子 (+1)

電子 (-1)

⇒ 中性原子

$u(\frac{2}{3})$   
 $u(\frac{2}{3}) d(\frac{1}{3})$

$e(-1)$

## 大統一理論

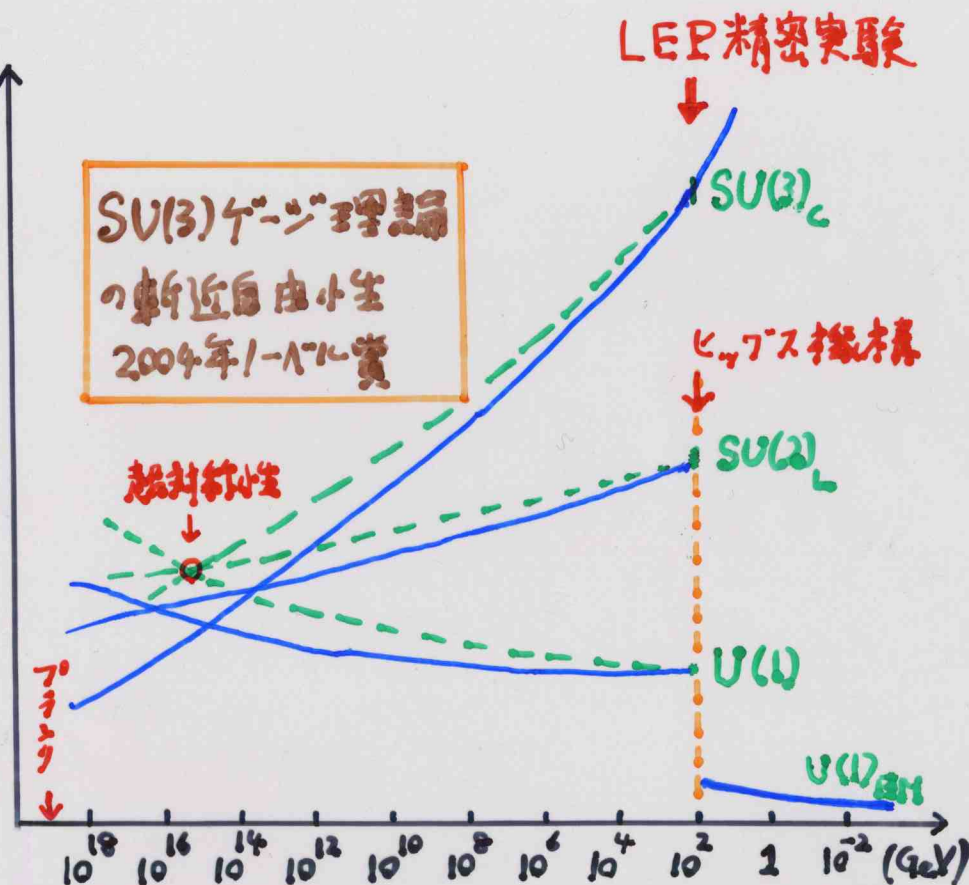
・フォークレプトンの統一

・電・弱・強 ミゲージカの統一

⇒ { 陽子の崩壊 ⇒ カヨオカンテ  
 階層性の問題 ⇒ 超対称性

⇒ 「三世代の存在」 「周期律表の理解」 X

ゲージ結合の強さ



高エネルギー

低エネルギー

短距離

長距離

ヒッグス 0秒

3分

# 階層性の問題と超対称性

大統一理論は「場の量子論」

⇒ 全ての素粒子は大統一スケール ( $10^{16} \text{ GeV}$ ) の量子揺らぎを感じる。

⇒ フェルミオン、レプトン、ゲージボソンは質量ゼロを維持 (ゲージ対称性)

⇒ ヒッグスボソンの質量項は  $(10^{16} \text{ GeV})^2$  のスケールの揺らぎを受ける。

100 GeV に留まる確率は  $(10^{-14})^2 \ll 1!$

⇒ ヒッグスボソンの質量もゼロに保つ対称性があるはずだ。



「超」対称性

SUper SYmmetry

アインシュタイン時空

$(t, x, y, z)$



特殊相対性理論



一般相対性理論

超時空

$(t, x, y, z, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$



超対称性理論



超重力理論

$$\theta_1 \theta_2 = -\theta_2 \theta_1 \\ (\theta_i)^2 = 0$$

超対称性 = ボース粒子とフェルミ粒子の対称性

ボース粒子 (スピン整数) ⇒ ボース統計 ⇒ 重ね合わせ (力)

スピン 0 ヒッグスボソン ⇔ ヒッグス / スピン 1/2

スピン 1 ゲージボソン ⇔ ケーソン / スピン 1/2

スピン 2 グラビトン ⇔ グラビティン / スピン 3/2

フェルミ粒子 (スピン半整数) ⇒ フェルミ統計 ⇒ 場所取り (物質)

スピン 1/2 フェルミオン ⇔ スクワール、スレプトン / スピン 0

• 「力と物質の統一」への一歩。

• LEP 精密実験が超対称性大統一理論のヒントをくれた!

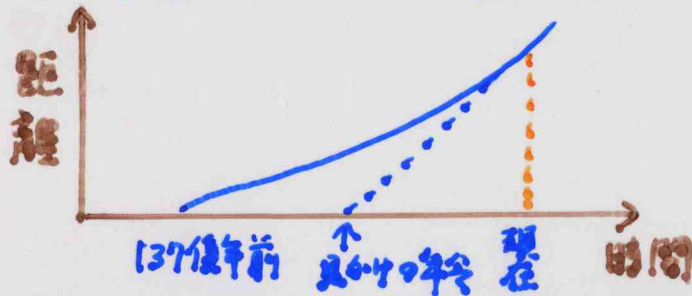
# ダークマターと超対称性

人工衛星による宇宙背景放射観測実験  
WMAPは宇宙のエネルギー分布を定めた。

|                  |     |
|------------------|-----|
| 通常の物質 (恒星, ガスなど) | 4%  |
| ダークマター           | 23% |
| ダークエネルギー         | 73% |

真空のエネルギー・アインシュタインの宇宙項  
(負の圧力・反重力)

宇宙も加速膨張させる。



ダークエネルギーの正体  
= 21世紀物理学最大の謎

## 銀河中のダークマター

うずまき銀河の「うで」の回転速度  
が中心からの距離によるない。  
 $\hookrightarrow v \propto 1/\sqrt{r}$  (太陽系)  
 $\Rightarrow$  見えないが重力を持つ物質  
が銀河を満たしている。

## 銀河系大構造の生成に必要

宇宙の晴れあがり (38万年)  
時の温度・密度極小

$$10^{-5} = \frac{1 \text{ mm}}{100 \text{ m}}$$

1~2億年後には  
星, 銀河ができた。

宇宙論で要求される  
ダークマターの性質

- 電氣的に中性
- 強い力を受けない
- 宇宙以上の長さ

超対称性標準模型  $\Rightarrow$  陽子崩壊を禁止する保存則

$\Rightarrow$  一番軽い超対称性粒子は安定  $\Rightarrow$  バスト候補!

LSP

# 重力を含む統一理論

重力の量子力学は場(点粒子)の量子論では成功しなかった。量子力学は極小距離の揺らぎを許すが、極小距離 = 超高温エネルギーでは強い重力のたの時空がゆがみ、手に負えない。

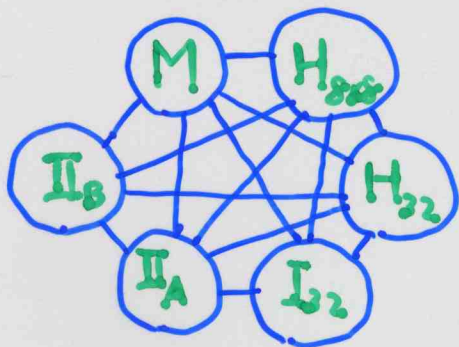


「長さ」のある理論が必要

- ・ **弦理論** が一般相対性理論を含む。(1993)
- ・ **超弦理論** が重力の量子論である。(1984)



5つの **超弦理論** と **M理論**  
10次元      11次元



実は一つの理論の異形であるらしい。

## 期待

- ① 全ての力と物質の統一的理解 OK
- ・ 何故時空が 1+3 次元なのか?
- ・ 何故  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$  なのか?
- ・ 何故  $\gamma$ - $\mu$  レプトン ニュートリノなのか?
- ・ 何故 三世代 なのか?
- ・ 素粒子の 周期律表 の導出。

## 現実

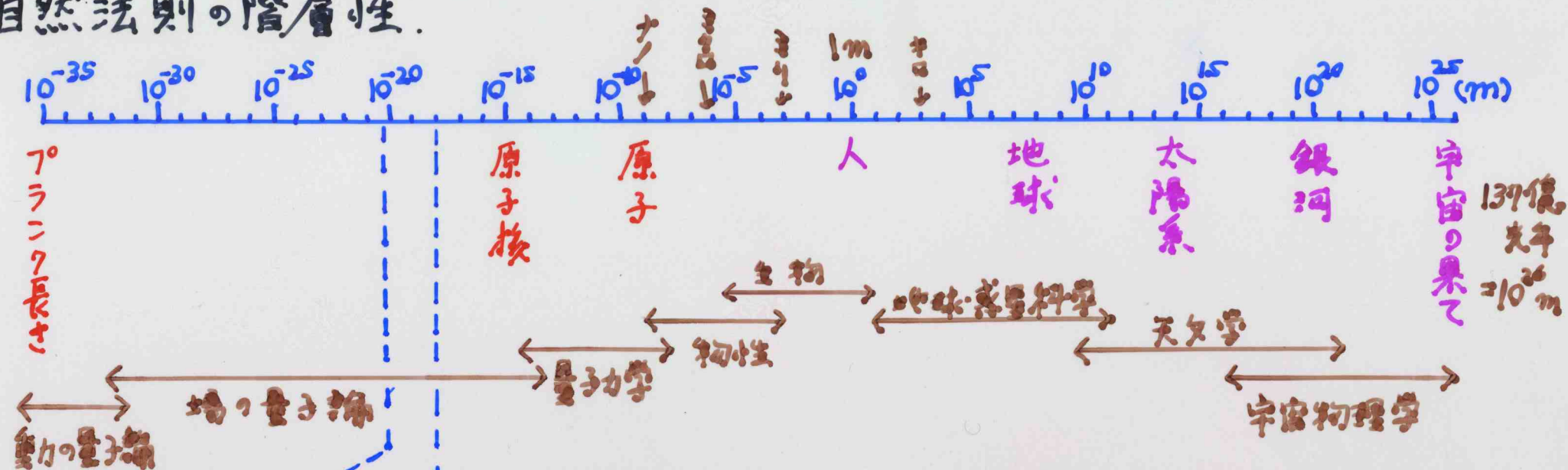
- ・ 重力の量子論のあるゆる可能性を含む理論であるらしい。
- ・ 予言のある理論かどうかが不明。



## 検証の可能性

- ・ インフレーション + 宇宙背景放射の揺らぎ
- ・ ブラックホール 蒸発 と 量子力学
- ・ コライダーでの **超相対性** の破れの物理探査 @ LHC & ILC

# 自然法則の階層性



超弦(M)理論  
大統一理論

ゲージ対称性  
ヒッグス機構  
超対称性

← LEP の到達点

← LHC (pp衝突: 建設中: 欧米)  
ILC ( $e^+e^-$ 衝突: 計画: 日米欧)

エネルギー・フロンティア素粒子実験

- 目標
- ・ヒッグス機構(対称性の破れ)を解明
  - ・超対称性を発見(?)

⇒ 場の量子論 を探針として 大統一理論, 重力の量子論 を探ることにしている。