

素粒子理論の目標

- ・ 基本的な物理法則を明らかにし、
- ・ 統一的な世界像を構築。

ここでは、主に

ボトム・アップ・アプローチ

の観点から、理論屋から見た

素粒子物理学の現状と展望

について、概観したい。

「素粒子」と「宇宙」の関わりについては割愛
「宇宙線」「天体物理」

- ・ 暗黒物質の正体
- ・ 原初元素合成からの制限
- ・ バリオン数生成機構
- ・ インフレーションモデル
- ・ CMB
- ・ Unwanted Relics
- ・ 宇宙項の問題、暗黒エネルギーの正体
- ・ UHECR
- ・

1. 標準模型の確立に向けて

標準模型 (SM) の Lagrangian

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}(\text{ゲージ場}) + \mathcal{L}(\text{クォーク・レプトン}) \\ + \mathcal{L}(\text{Higgs}) + \mathcal{L}(\text{Yukawa 相互作用})$$

今のところ、 \mathcal{L}_{SM} で実験を説明できる (ν 除く).

\mathcal{L}_{SM} で、ほぼ O.K.

⇒ 最後のつめの段階

注) もちろん、

・ QCD のダイナミクス

・ 高次の量子補正

などの研究は重要.

● ゲージ構造

ゲージ対称性 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

- ・ 相互作用: 電荷 (ゲージ量子数) で決まる
→ universality
- ・ ゲージ粒子は (基本的に) massless
 - ・ $\frac{1}{2} m^2 A_\mu A^\mu$ はゲージ不変ではない.

★ Z ボソンの場合 (フォトンの次によく分ったゲージ粒子)

$$Y \quad A_\mu = B_\mu \cos \theta_w + W_\mu^3 \sin \theta_w$$

$$Z \quad Z_\mu = B_\mu \sin \theta_w + W_\mu^3 \cos \theta_w$$

SU(2) × U(1) ゲージ
粒子の混合

θ_w : ワインバーグ角.

① Z の発見

'83 UAI/UA2 CERN SPS collider

$$p\bar{p} \rightarrow Z \rightarrow l^+l^-$$

② Z の徹底的な Study.

'89 ~ CERN LEP 実験.

$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$$

$\sqrt{s} = m_Z$, 20,000,000 々の Z ボソンを生成.

$$\mathcal{L}_{int.} = -\frac{g}{2\cos\theta_w} \cdot \bar{f} \gamma^\mu (g_V - g_A \gamma_5) f Z_\mu$$

$$g_V = T_{3L} - 2Q \sin^2\theta_w, \quad g_A = T_{3L}$$

LEP 実験の大きな成果

Z-ボソンの相互作用を $\sim 1/1000$ の精度で測定し、Z ボソンがゲージ粒子であることを、(SMの量子補正も含めて) 確立した!

実験的に未検証の部分:

W, Z に質量を与える機構

パイプ

自発的対称性の破れ.

⇒ Nambu-Goldstone boson.

・NG ボソンがゲージ粒子のたて波成分

⇒ W, Z massive.

標準模型

Higgs 場 ($SU(2)$ doublet, 2カラー場)

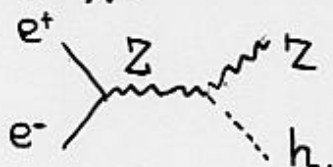
$\langle H \rangle \neq 0$, VEV のまわりの小さな波 \rightarrow Higgs 粒子

$$H = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} v + \frac{1}{\sqrt{2}} h + \frac{i}{\sqrt{2}} \phi_0 \\ \phi_w^- \end{pmatrix}$$

SM で必要な粒子のうち、Higgs 粒子だけが未発見

わかっていること

・ Higgs search @ LEP



$m_h \gtrsim 114 \text{ GeV}$

・ Electroweak Measurements (量子補正)

global fit

$m_h \lesssim 200 \text{ GeV}$

歴史はくり返す?

【期待】

① Higgs 粒子の発見

② Hadron Collider (Tevatron RUNII/LHC?)

② Higgs 粒子の徹底的な Study.

③ Lepton Collider (JLC?)

⇒ SM の確立

・ 質量の起源の解明.

▶ クォーク・レプトンの世代(フレーバー)構造

• LEP $N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083 \rightarrow N_\nu = 3!$

• クォーク・レプトンは3世代全て発見済み (top ~ '95)

1st	2nd	3rd
u	c	t
d	s	b
e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

• クォーク・レプトンの質量と世代混合

Yukawa 相互作用

質量行列.

$$(Y_D)_{ij} \bar{\psi}_{Li} H d_{Rj} \rightarrow \langle H \rangle (M_D)_{ij} \quad j, i = 1 \sim 3$$

⇒ 3つの 3×3 質量行列

$$M_U, \quad M_D; \quad M_E$$

up-type
quarks

down-type
quarks

charged
leptons

• SMでは、ニュートリノは massless

(質量を生む Yukawa 項がかけない)

- M_U, M_D, M_E の対角化 \Rightarrow 質量

$$\begin{matrix} m_t \\ | \\ 175 \text{ GeV} \end{matrix} \gg \begin{matrix} m_b \\ | \\ 4 \text{ GeV} \end{matrix} \gg \dots \gg \begin{matrix} m_e \\ | \\ 0.5 \text{ MeV} \end{matrix}$$

- 世代間混合.

▶ クォークセクター

$$g_{Li} = \begin{pmatrix} u_{Li} \\ d_{Li} \end{pmatrix} \quad i=1 \sim 3.$$

対角化のときに, u_{Li} と d_{Li} を別の行列で回す.

\rightarrow ミス. 2, 4.

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 行列. (CKM)

$$V_{CKM} \equiv U_U^\dagger U_D = \begin{pmatrix} V_{ud} & \dots & V_{ub} \\ \vdots & & \vdots \\ V_{td} & \dots & V_{tb} \end{pmatrix}$$

• 3つの angle と 1つの phase.

\hookrightarrow KM phase : CP

• V_{CKM} はユニタリ行列

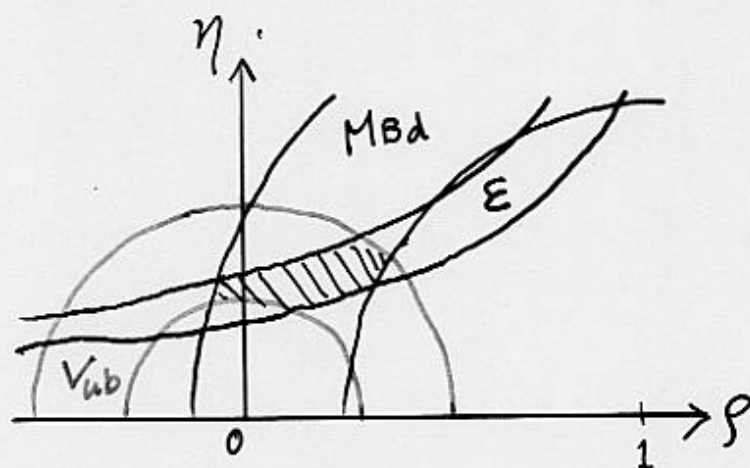
$$V_{CKM} V_{CKM}^\dagger = V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = I.$$

• Wolfenstein parametrization

$$V_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

• $\lambda \approx 0.22$ (Cabibbo角), $A \sim 1$.

• ρ - η plane



• SMの検証.

① ρ - η の新たな process での測定

e.g.) $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ (~~CP~~) JHF

② Unitarity triangle. \Rightarrow B-factory で進行中.

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

▶ レプトン・セクター

$$l_{Li} = \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_{Li} \end{pmatrix} \quad i=1\sim 3.$$

- MEの対角化: l_{Li} を回す.
- ν は massless: ν_i を回しても意味がない.
 - ⇒ レプトンの世代間(フレーバー間)混合はない.
 - ∴ レプトン・フレーバーの保存.

この対称性は、

- SMの particle content
- クリニミ可能性.

に依った、偶然の産物。SMを拡張すれば、
レプトン・フレーバー対称性は破れるであろう。

2. 標準模型を超えて

- ・ SMは統一的な世界像にはほど遠い.
- ・ 次のような疑問に答えられない.

● ゲージ構造

- ・ 何故 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$?
- ・ 何故 $g_3 \gg g_2 \gg g_1$?
- ・ 何故 $Q_p + Q_e = 0$?
- ・ 何故 $m_W \ll m_{Pl}$?

▶ 世代(フレーバー)構造

- ・ 何故 3世代 ?
- ・ 何故 $m_t \gg m_c \gg m_u, \dots$?
(fermion mass hierarchy)
- ・ 何故 ν の世代間混合は小さいのか ?
- ・ 何故 ν の質量は小さいのか ?
- ・ 何故 ν の世代間混合は大きいのか ?

【期待】

これらの疑問 \Rightarrow 新しいパラダイム

\rightarrow 標準模型を超える物理現象

● ゲージ構造の解明

● 電弱スケールの起源

・ 何故 $m_W \ll m_{Pl}$?

・ 如何にして電弱スケールが量子補正に対し安定になるか?

$$m_W \sim \frac{g}{2} v \quad v \sim 246 \text{ GeV.}$$

$$V(H) = -m^2 H^\dagger H + \lambda (H^\dagger H)^2 \quad \text{スカラー・ポテンシャル.}$$

$$v \sim \left(\frac{m^2}{\lambda}\right)^{1/2}$$

・ スカラー場の質量に対する量子補正

$$\Rightarrow \text{2次発散.} \quad \delta m^2 \sim \Lambda^2 \quad \Lambda = \text{cut-off.}$$

別の言葉でいうと、

「スカラー場の質量スケールは、理論の短キヨリ構造に、非常に sensitive」

例えば $\Lambda \sim m_{Pl} \sim 10^{19} \text{ GeV} \gg 10^2 \text{ GeV}$ と、 $m \sim 10^2 \text{ GeV}$ を得るには、不自然なパラメータの微調整が必要に思える。

▶ 将来の実験で見える LFV の source.

- ▶ フレーバーの起源が TeV スケールから遠くない場合
- ▶ TeV スケールに新たな「レプトン」が出現する場合.

▶ SUSY の場合.

▶ 新たな「レプトン」≡ スレプトン!

質量行列

$$m_{ij}^2 \tilde{l}_i^* \tilde{l}_j \quad 3 \times 3.$$

非対角成分 \rightarrow LFV

▶ 非対角成分の源

- ▶ フレーバー 対称性の小さな破れ
and/or
- ▶ NR Yukawa Couplings $\rightarrow m_{\tilde{l}}^2$ の running
and/or
- ▶ GUT スケール以上での running
etc.

\Rightarrow 将来の実験で LFV が見えることが十分期待される.

近い将来のエネルギー・フロンティアの実験で、
これらのアイデアを検証できると期待。

• SUSY なら

- superparticleの発見.
- Study → 質量, スピン, 相互作用.
- Superparticleの質量スペクトル
 - ⇒ SUSYの破れの起源と伝播機構
 - 高いエネルギースケールでの対称性
(e.g. GUT, flavor symmetry)

• LED なら.

- 重力子の Kaluza-Klein mode の存在



- Black Hole Production
- String Excited States.

⇒ 「量子重力/ストリングの世界をコライダーで!」

いずれにせよ、何が見つかるかで、その後の素粒子物理
の進むべき道が変わる!

この「自然さの問題」を解くアイデア

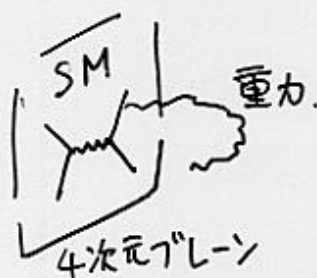
- テクニカラー

- NG ボソンが複合粒子 $4\bar{4}$ (cf. π in QCD)
- No Realistic Model

- SUPERSYMMETRY (超対称性)

- superpartner \rightarrow 2次発散キャンセル
- Gauge Coupling Unification?
- $m_h \lesssim 130 \text{ GeV}$ (EW global fit と矛盾しない)
- $m_W \sim 100 \text{ GeV} \Rightarrow$ SUSY の破れ $\lesssim \text{TeV}$

- Large Extra Dimensions ^{NEW} '98 ~



- 基本スケールは $\sim \text{TeV} \Rightarrow m_W \sim 10^2 \text{ GeV}$ は O.K.
- SM は 4次元の brane 上に閉じこめられている。
- 重力だけ「大きな余剰次元」を propagate
 \Rightarrow 弱い重力 i.e. G_N 小
 $\Rightarrow m_{\text{Pl}} \sim \frac{1}{\sqrt{G_N}}$ が大。

● Grand Unification の可能性

• $Q_p + Q_e = 0$ (実験 $\lesssim 10^{-20}$)

⇒ クォークとレプトンを系統一させるべし。

「大統一理論」

- ゲージ相互作用が「大統一」!
- クォーク・レプトンが「大統一」!

例) $SO(10)$ $16 = 8_L + U_R^c + d_R^c + l_L + e_R^c + N_R$

$SU(5)$ $5^* = d_R^c + l_L$, $10 = 8_L + U_R^c + e_R^c$

($1 = N_R$)

● ゲージ結合定数

- 大統一理論ではもともと一つ
- GUTの石炭れ → それぞれ別々に走り出す
(β -関数)
- ゲージ群の大きさ $SU(3) > SU(2) > U(1)$

⇒ $g_3 > g_2 > g_1$ @ EW scale

- さらに、SUSY SMの β -関数を用いると、GUTの予言する couplingの値が、実験値に合う。190~

単なる偶然? それとも SUSY GUT?



GUT TOO RESTRICTIVE!

Naive GUTs predict.

1) Wrong Fermion Masses

$$M_D = M_E$$

2) Too Short Proton Life Time

$$\tau(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) \Big|_{th.} \sim 10^{31} \text{ yr.}$$

⋮

⇒ ・悪夢のはじまり

・現実的で、魅力的な GUT 模型作りに悪戦苦闘

↑

・フレーバー構造に対する新たな実験的情報が欲しい!

- NEW BALL PARK FOR MODEL BUILDERS

"Extra Dimensions & Brane World"

- Volume Suppression of Couplings

弱い重力, 軽いニュートリノ, アクション etc.

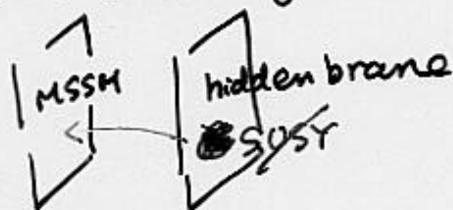
- Localization of Fields. (in Extra Dimensions)

(\rightarrow Naturalnessの概念の拡張)

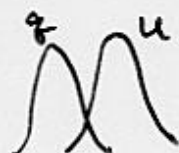
• Small Parametersの起源

2つ(以上)の場が別な場所に局在

例) SUSY breaking



- Fermion Mass Structure.



small overlap
 \rightarrow small Yukawa coupling

▶ 世代 (フレーバー) 構造の解明

- ▶ 豊富な構造には、深い理由があるはず。
- ▶ 世代構造の起源について確たることは何も分かっていない!

— どのスケールで、世代構造が決まるのかも分からない

▶ 諸説紛々

- ▶ フレーバー対称性からのアプローチ

(abelian / non-abelian,
continuous / discrete,
gauged / global, ...)

- ・ フレーバ対称性が exact \rightarrow 0 になるパラメータ。
 \rightarrow フレーバ対称性が少し破れている
 \rightarrow 小さなパラメータを説明

- ▶ ブレーン・ワールドE 使ったアプローチ.

- ・ 余剰次元方向での、クォーク・レプトンの局在化
 \rightarrow 小さなパラメータの新たな説明方法

▶ もっと手がかりを!

▶ 新たな実験的情報がどうしても欲しい.

① High Energy Probes ($M \sim 10^{14} \text{ GeV} - 10^{19} \text{ GeV}$)

▶ proton decay

▶ neutrino masses & mixing

・ ν 振動

・ neutrinoless $\beta\beta$ decay

→ Majorana nature.

⋮

← [シーソー機構]
 $m_\nu \sim \frac{v^2}{M_R}$
 $M_R: N_R$ の質量

② Low Energy Probes. ($M \sim \text{TeV}$)

▶ lepton flavor violation

▶ K/B における

・ SM と合わない FCNC

・ " \cancel{CP}

▶ Electric Dipole Moment n, e, μ

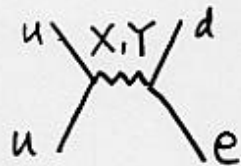
・ \cancel{CP} の new source の探索

⋮

▶ p-decay

▶ 寿命と崩壊モードが鍵

▶ $p \rightarrow \pi e^+$



X, Yボソンの交換 \Rightarrow GUTの証拠!

▶ $p \rightarrow K^+ \bar{\nu}, K^0 \mu^+, K^0 e^+$

SUSY unificationのシナリオで重要

▶ ^超高エネルギーでの世代構造を反映!

▶ ν 振動.

▶ ν のフレーバー混合.

▶ 牧・中川・坂田行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = [U_{\alpha i}] \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

▶ 現状

▶ ν_{atm} (SK) / K2K ($\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$)

$$\rightarrow \Delta m_{23}^2 \simeq (\text{a few}) \times 10^{-3} eV^2$$

· large $\sin^2 2\theta_{23}$

▶ ν_{sol} (SK \oplus SNO) \rightarrow KamLAND ($\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$)

$$\rightarrow \Delta m_{12}^2 \simeq 10^{-4} eV^2 \quad (\text{LMA})$$

· large $\sin^2 2\theta_{12}$

▶ CHOOZ exp. (reactor)

$$\sin^2 2\theta_{13} \lesssim 0.1. \quad \text{上限のみ.}$$

▶ 2つの angle (θ_{23}, θ_{12}) は大きくて、1つ (θ_{13}) は小さい.

→ この不思議な構造を説明する機構を研究することが、理論の大きな宿題!

▶ (近い) 将来に角度の精密測定.

・ θ_{23}, θ_{13} ... JHF
・ θ_{12} ... KamLAND

⇒ Mechanismの選別に、重要な情報.

特に

・ $\theta_{23} = \frac{\pi}{4}$ か?

・ $\theta_{12} = \frac{\pi}{4}$ か?

・ θ_{13} の値.

② Low Energy Probes.

- ▶ 例として $\mu \rightarrow e \gamma$ (μ - e -conversion と同様) JHF
lepton flavor violation
- SM では起らない
 - $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) \neq 0 \rightarrow$ beyond SM.

▶ New Physics への Sensitivity

▶ effective Hamiltonian.

$$H_{\text{eff}} = \frac{e}{(4\pi)^2} \cdot \delta_{12} \cdot \frac{m_\mu}{M_*^2} \cdot \bar{e} \sigma_{\mu\nu} \mu F^{\mu\nu}$$

← loop factor

• M_* : New Physics のスケール

• δ_{12} : flavor mixing の度合いを表すパラメータ

$$\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) = 5 \times 10^{-11} \left(\frac{3 \times 10^4 \text{ GeV}}{M_* / \sqrt{\delta_{12}}} \right)^4$$

▶ 将来的に $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ の reach が期待できる。

∴ $M_* \gtrsim \text{TeV}$ の LFV source は十分に見える。

3. まとめ

★ 素粒子物理の両輪

- ゲージ構造の解明

- ▶ 世代(フレーバー)構造の解明

★ 標準模型の確立.

- Higgs 機構の検証

- ▶ Kobayashi-Maskawa スキームの検証

★ 標準模型を超えて

- 電弱スケールの起源

テクニカラー / SUSY / 大きな余剰次元 ...

- Grand Unification

- ▶ Extra Dim. & Brane World.

- ▶ 世代構造の解明へのアプローチ.

フレーバー対称性 / ブレーンワールド

- ▶ 新たな実験的情報がほしい.

- P -decay / ν masses & mixing ...

- LFV / B, K の FCNC & $\mu \rightarrow e \gamma$ / EDM ...

- ▶ JHF の果たす役割.