

2013 量子力学 2

補講 (の後半 : オマケのオマケ)

Higgs とか
neutrino とか
宇宙とか
標準模型を超える物理とか。

2013. 9. 3. 浜口幸一

ヒッグス粒子の発見！

2012. 7. 4,
CERN press conference



ヒッグス粒子の発見！

2012. 7. 4,
CERN press conference



素粒子：
物質は何から出来ているか？

クォーク



陽子 / 中性子

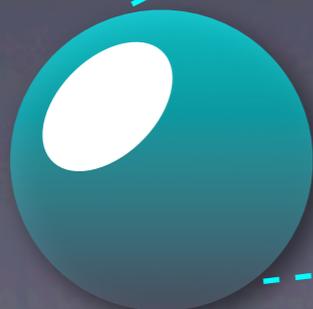
電子

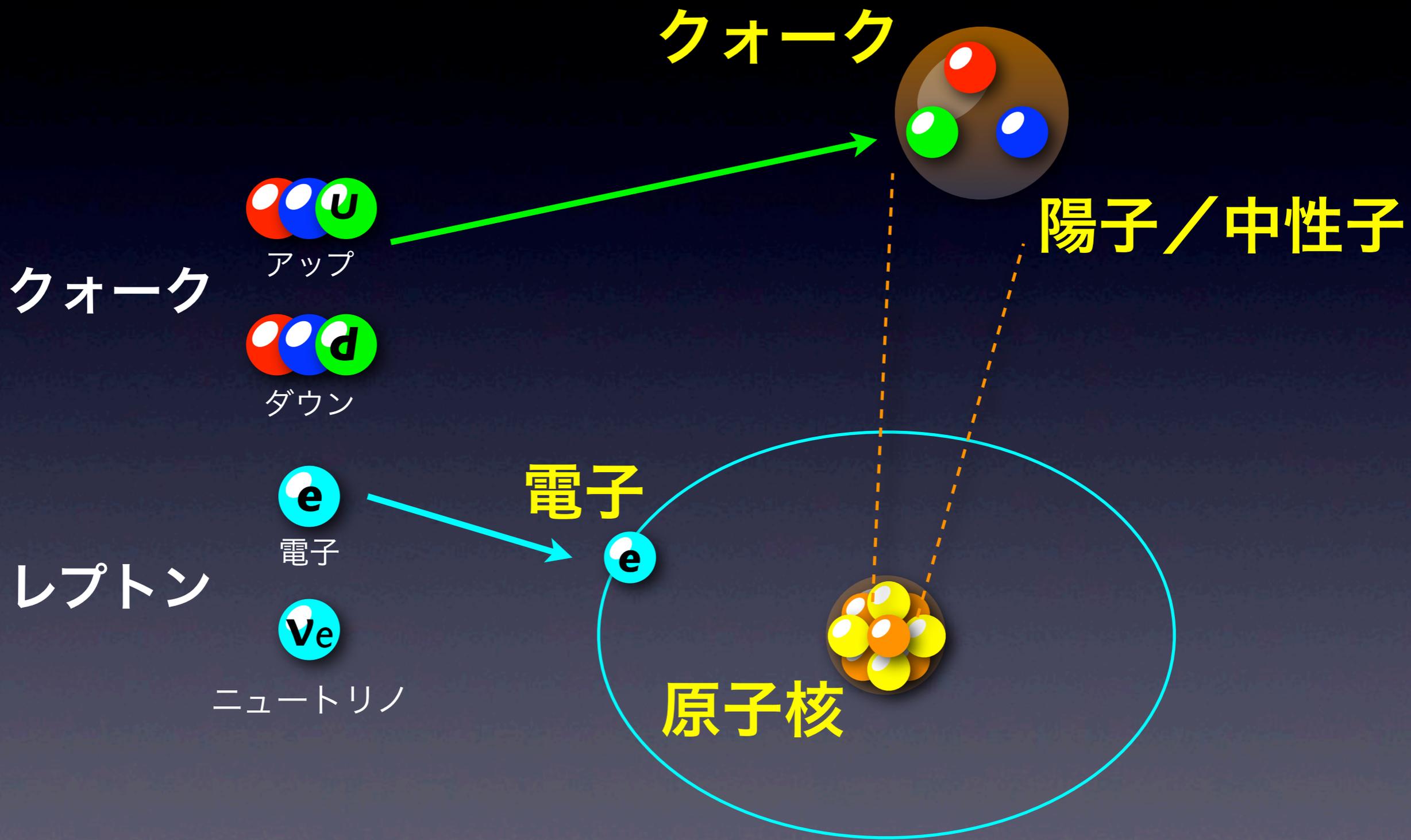


原子核



原子



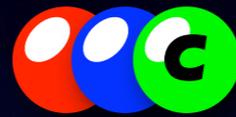


第1世代 第2世代 第3世代

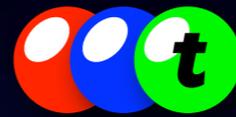
クォーク



アップ



チャーム



トップ



ダウン



ストレンジ



ボトム

レプトン



電子



ミューオン



タウ



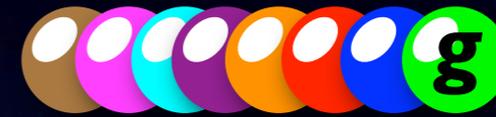
eニュートリノ



μニュートリノ



τニュートリノ



グルーオン



光子



Z, Wボゾン

ゲージ 粒子



ヒッグス粒子

素粒子の標準模型

第1世代 第2世代 第3世代

クォーク



アップ



チャーム



トップ



ダウン



ストレンジ



ボトム

レプトン



電子



ミューオン



タウ



eニュートリノ



μニュートリノ



τニュートリノ



グルーオン



光子



Z, Wボゾン



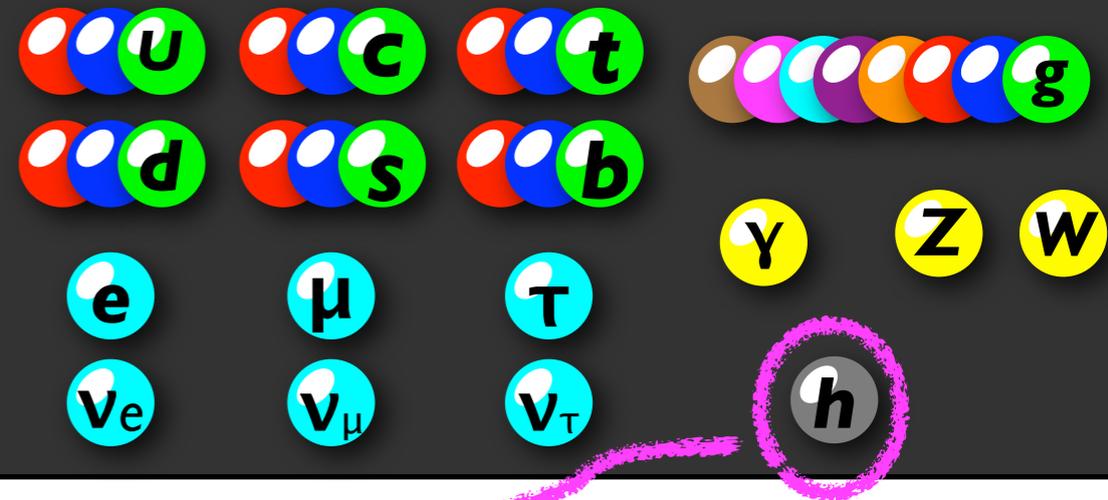
ゲージ
粒子



ヒッグス粒子

現在までに確立している (検証されている) 最先端の理論

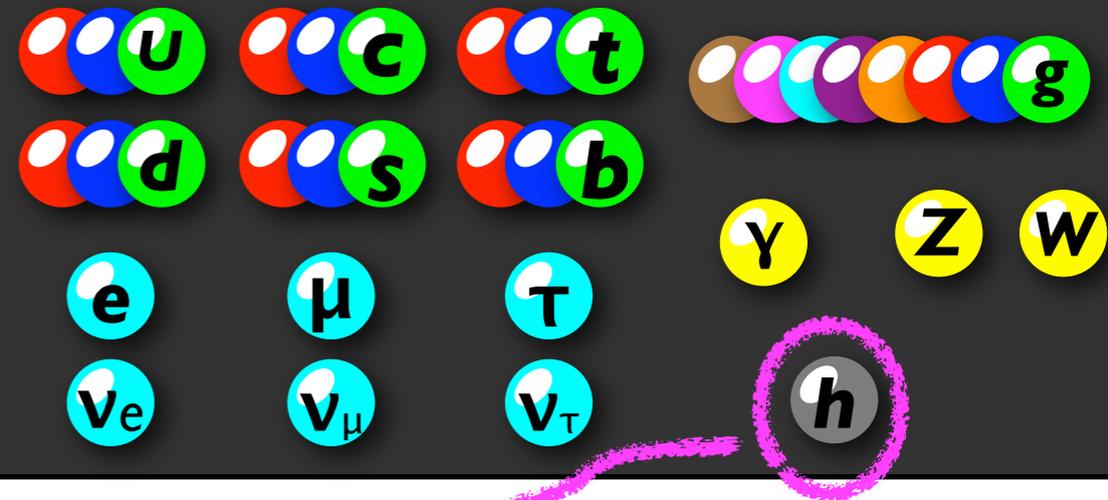
標準模型



▶ ヒッグスについて

- 「真空」の性質を変えてしまうすごいやつ

標準模型

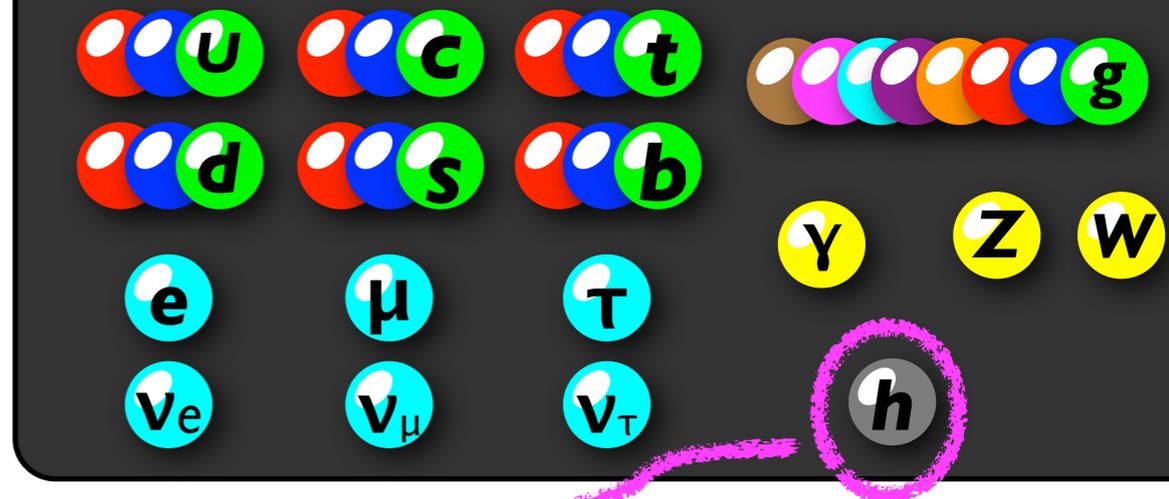


▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：

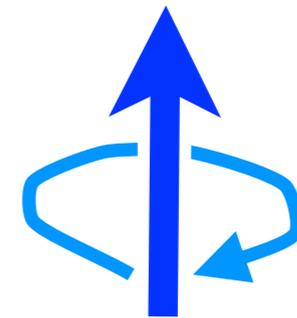
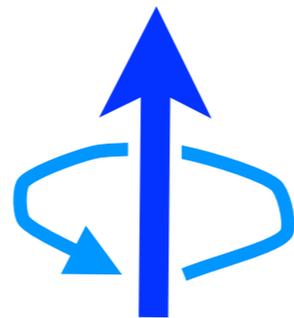
標準模型



▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

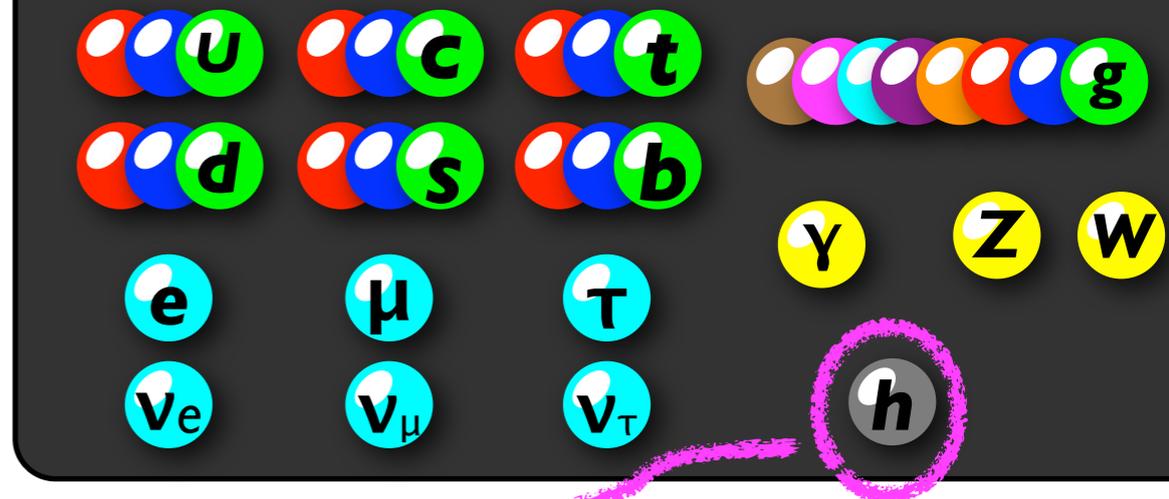
例えば電子：電子には右巻き成分と左巻き成分がある



$$\text{電子 } e = \text{右巻き電子 } e_R + \text{左巻き電子 } e_L$$

(弱い相互作用しない) (弱い相互作用する)

標準模型



▶ ヒッグスについて

• 全ての素粒子の質量の起源

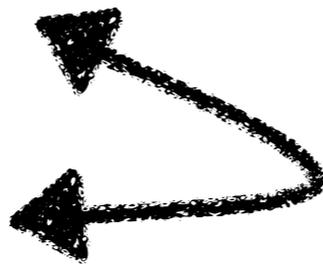
例えば電子：ヒッグスがいないと・・・

(弱い相互作用しない)

右巻き電子 e_R

左巻き電子 e_L

(弱い相互作用する)

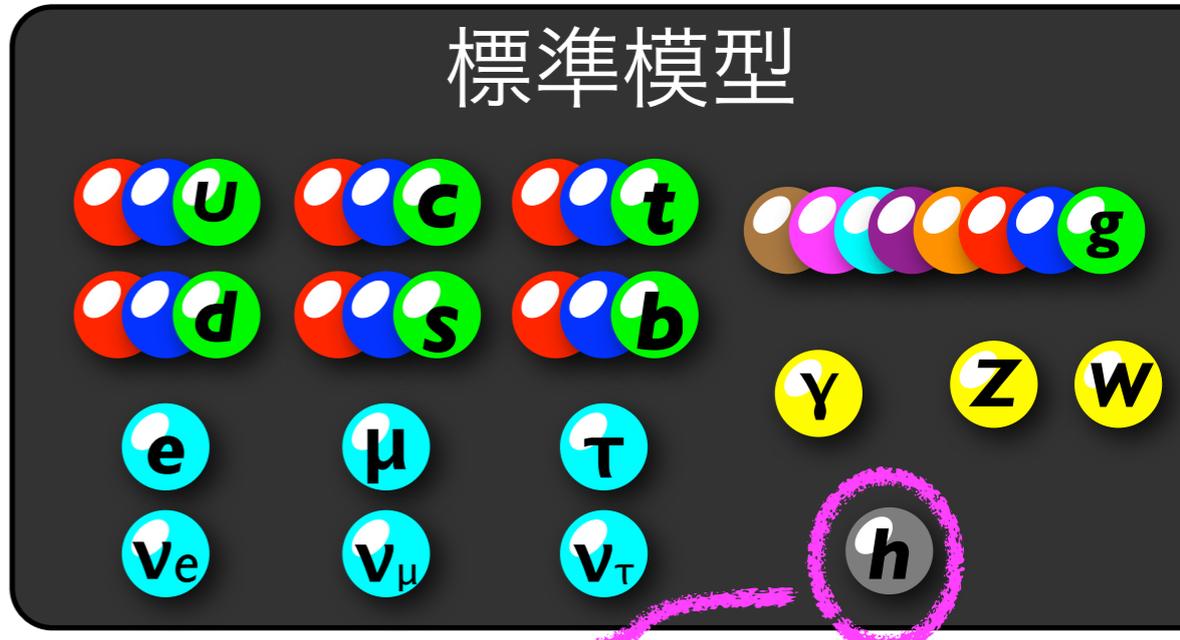


別々の粒子

しかもそれぞれ質量ゼロ

(質量ゼロ：常に光速)

標準模型



▶ ヒッグスについて

• 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：しかしヒッグスのおかげで・・・

(弱い相互作用しない)

右巻き電子 e_R

左巻き電子 e_L

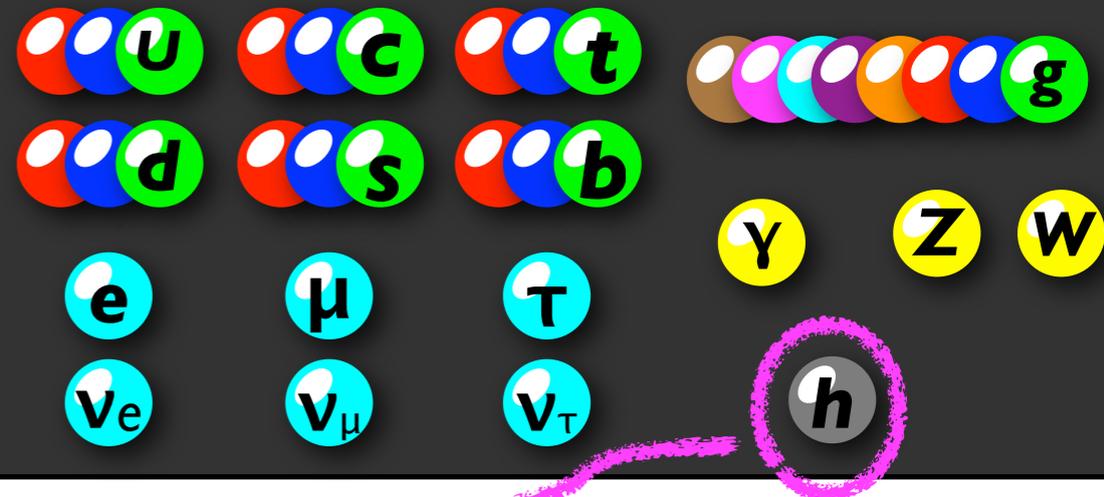
右巻きと左巻きがつながる

----- ヒッグス

(弱い相互作用する)

Yukawa 相互作用

標準模型

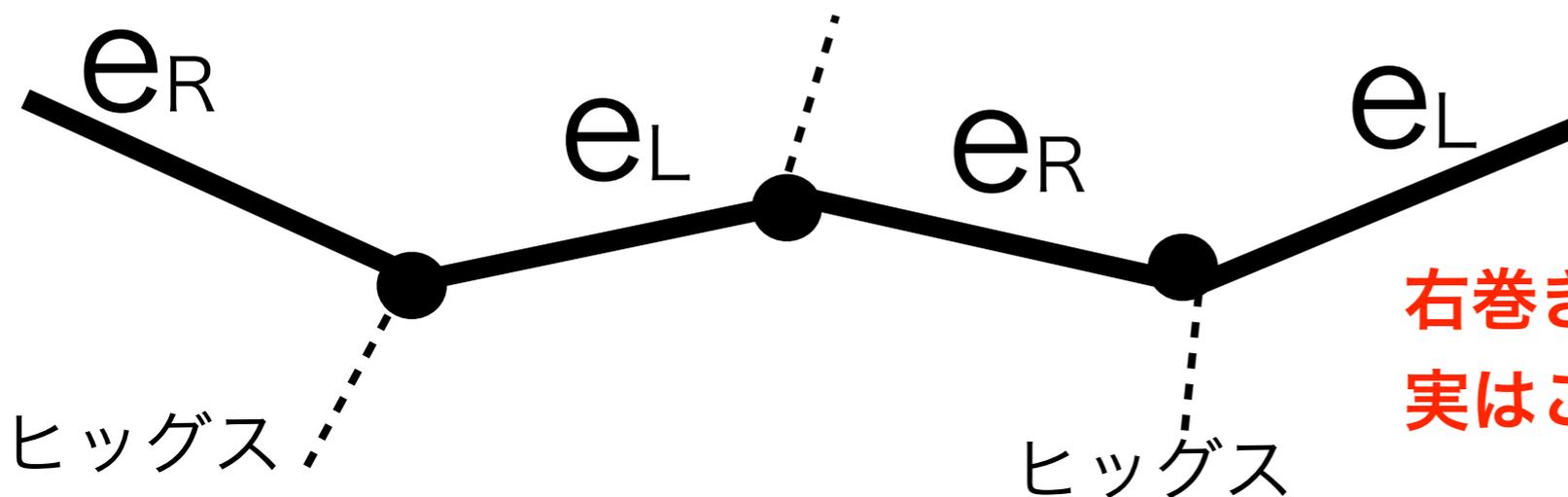


▶ ヒッグスについて

・ 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：

「ヒッグス場」が「真空中に凝縮」してくれるおかげで・・・



右巻きと左巻きが自在に行き来出来る。
実はこれにより電子は「質量」を得る。

標準模型 最後の粒子
ヒッグス粒子が発見！

素粒子理論の完成??

標準模型を超える物理

標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

暗黒エネルギー

平坦性問題

地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

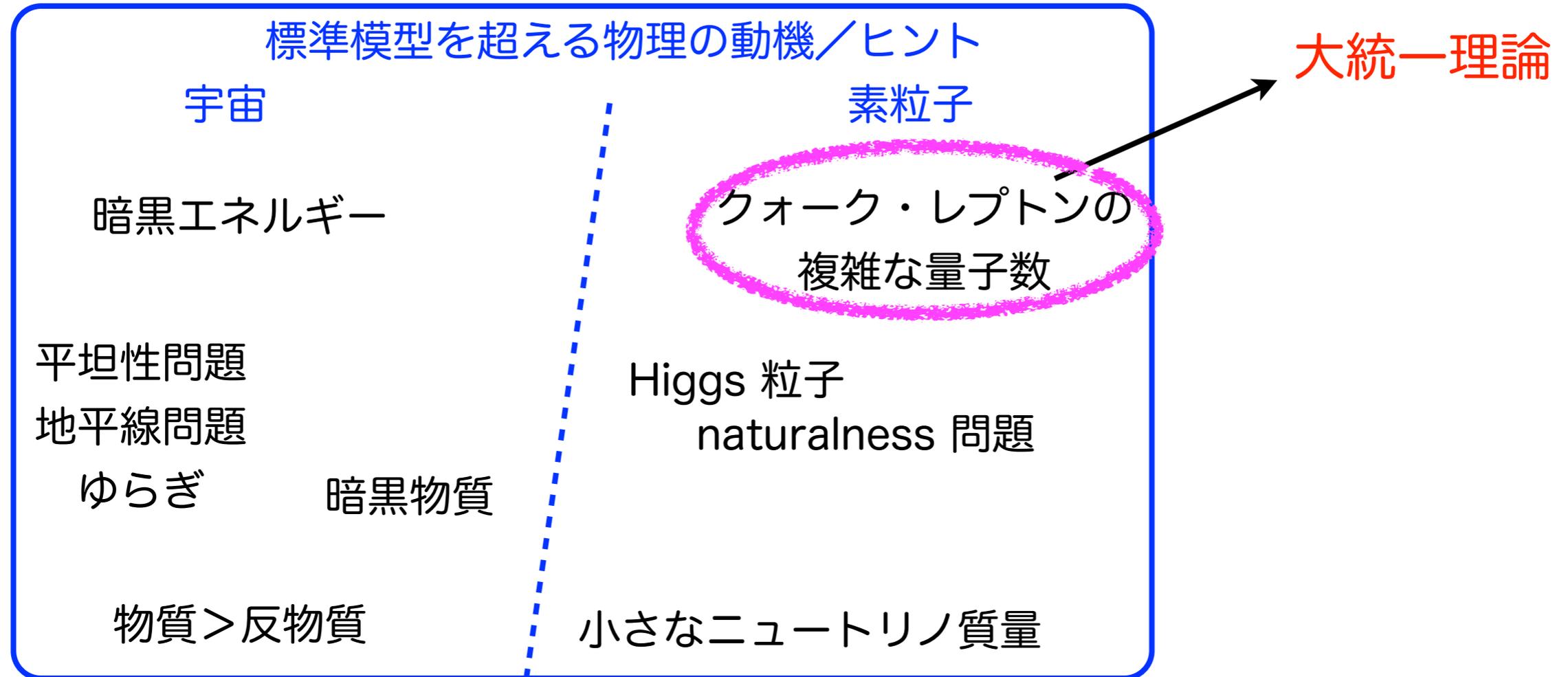
素粒子

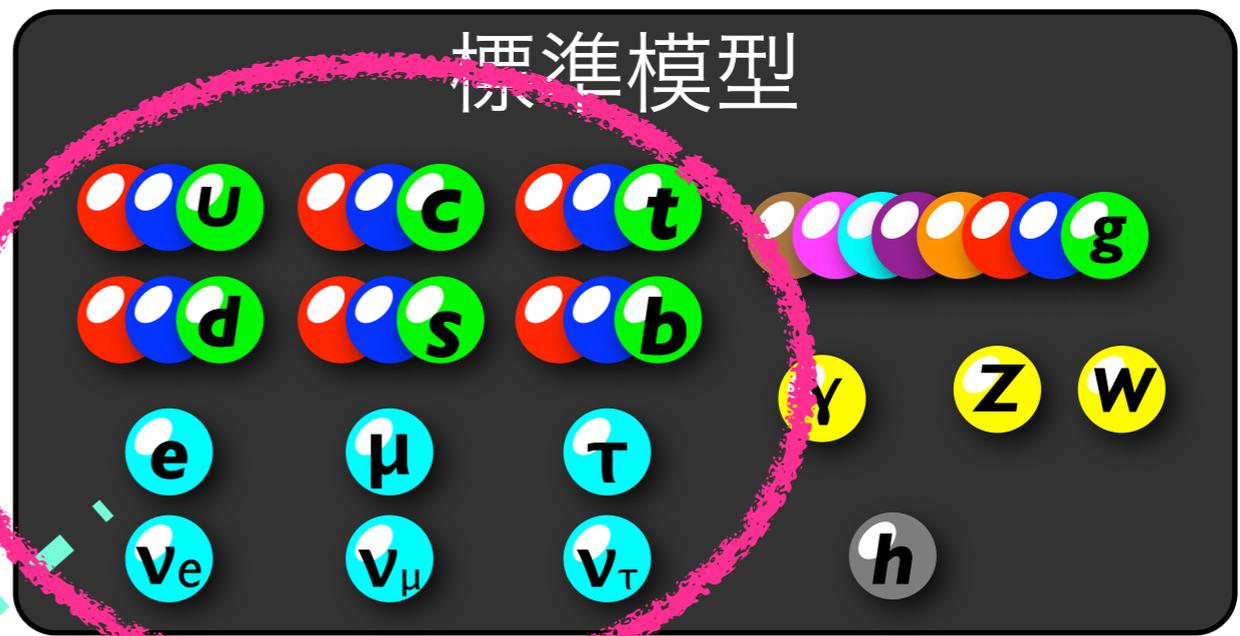
クォーク・レプトンの
複雑な量子数

Higgs 粒子
naturalness 問題

小さなニュートリノ質量

標準模型を超える物理





電子 e = 右巻き電子 e_R + 左巻き電子 e_L

(弱い相互作用しない) (弱い相互作用する)

他のクォーク、レプトンも「右巻き」と「左巻き」に分かれている。(で、Higgsのおかげで一緒になって質量持ってる。)

左巻き
クォーク

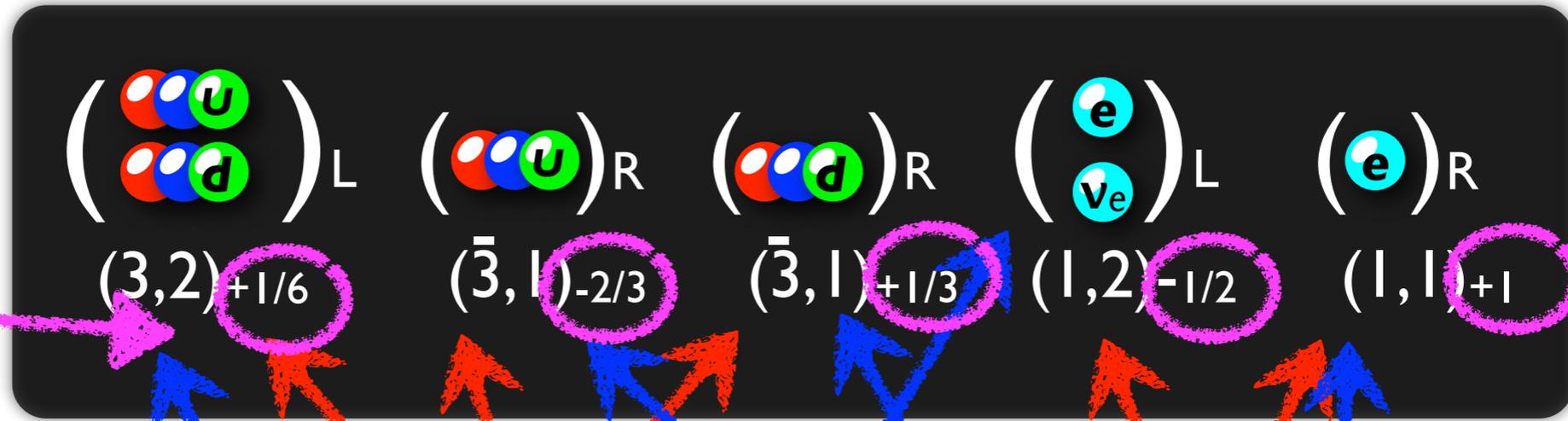
右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウンクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

右巻きと左巻きを
分けて書くと・・・
(1世代分だけ)



電弱ハイパー電荷
(電荷みたいなもの)

強い力を受ける

強い力を受けない

弱い力を受ける

弱い力を受けない

・・・なんかバラバラ！

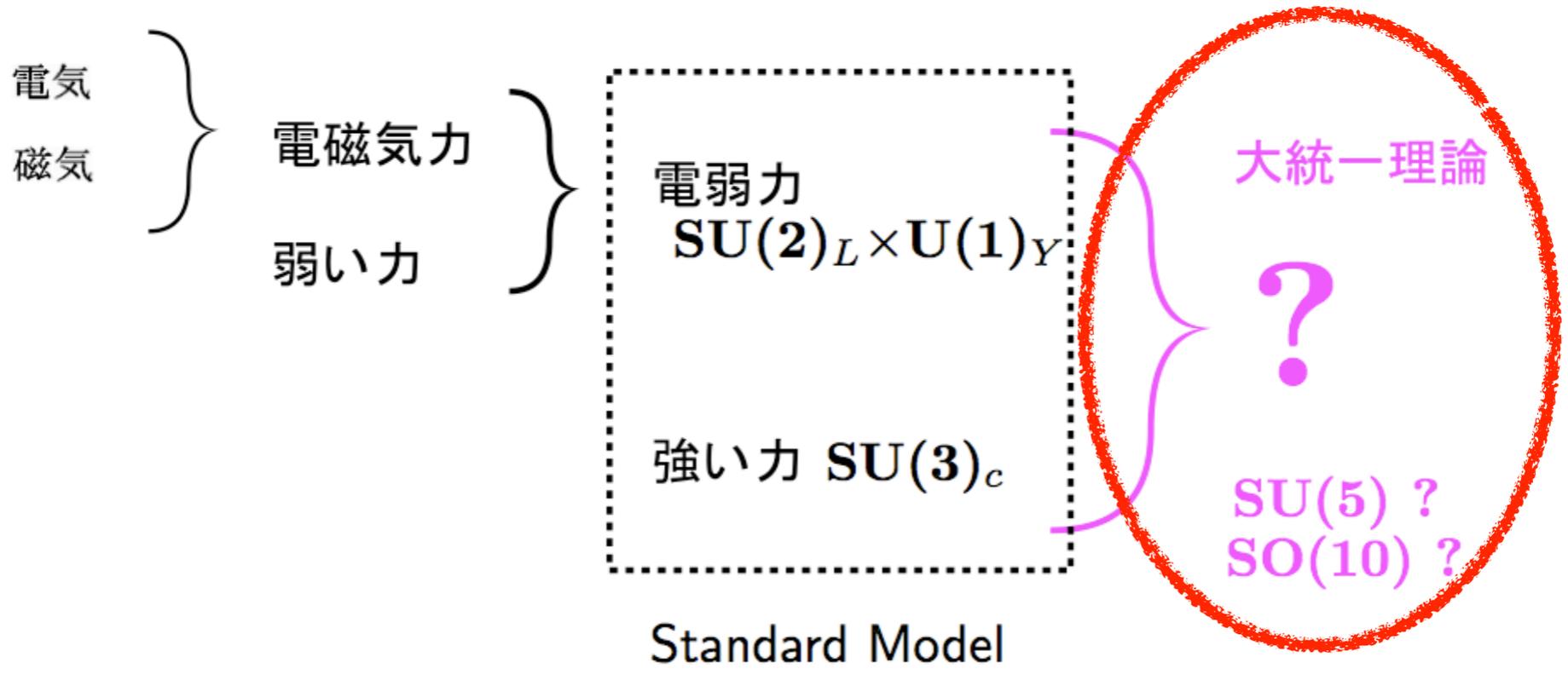
謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

おそらくこの謎の答えは・・・



謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

標準模型ではクォーク・レプトンはバラバラ

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$ $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$ $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$ $(1, 1)_{+1}$
 $(3, 2)_{+1/6}$ $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$ $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$ $(1, 2)_{-1/2}$ $(1, 1)_{+1}$

数学の群論の言葉では、 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ の「表現」

大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)

$\left(\begin{matrix} u \\ d \end{matrix} \right)_L, u_R, e_R$ $\left(\begin{matrix} e \\ \nu_e \end{matrix} \right)_L, d_R$
 10 $\bar{5}$

SU(5) の「表現」にきれいにまとまる!

標準模型を超える物理



謎：ニュートリノの質量



- よく見るとニュートリノは左巻きしかない
- • • 質量を持たない！ (質量ゼロ)
- しかしニュートリノ振動により質量が確認されている！

謎：ニュートリノの質量

解決方法は・・・

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R$ $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R$ $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$ $\begin{pmatrix} e \end{pmatrix}_R$ $\begin{pmatrix} N \end{pmatrix}$
 $(3, 2)_{+1/6}$ $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$ $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$ $(1, 2)_{-1/2}$ $(1, 1)_{+1}$ $(1, 1)_0$

左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウンクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

右巻き
ニュートリノ

右巻きニュートリノを足してしまう

右巻きニュートリノ、実はすごい

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$\left(\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \text{e} \text{R} \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cc} \text{e} & \\ \text{v}_e \text{L} & \begin{array}{c} \text{d} \\ \text{u} \end{array} \text{R} \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \text{SU(5)} \\ \text{大統一} \end{array} \quad + \quad \begin{array}{c} \text{N} \\ (1,1)_0 \end{array}$$

10 5

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \text{e} \text{R} & \text{e} & \text{v}_e \text{L} & \begin{array}{c} \text{d} \\ \text{u} \end{array} \text{R} & \text{N}_i \text{R} \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \text{SO(10)} \\ \text{大統一} \end{array}$$

16

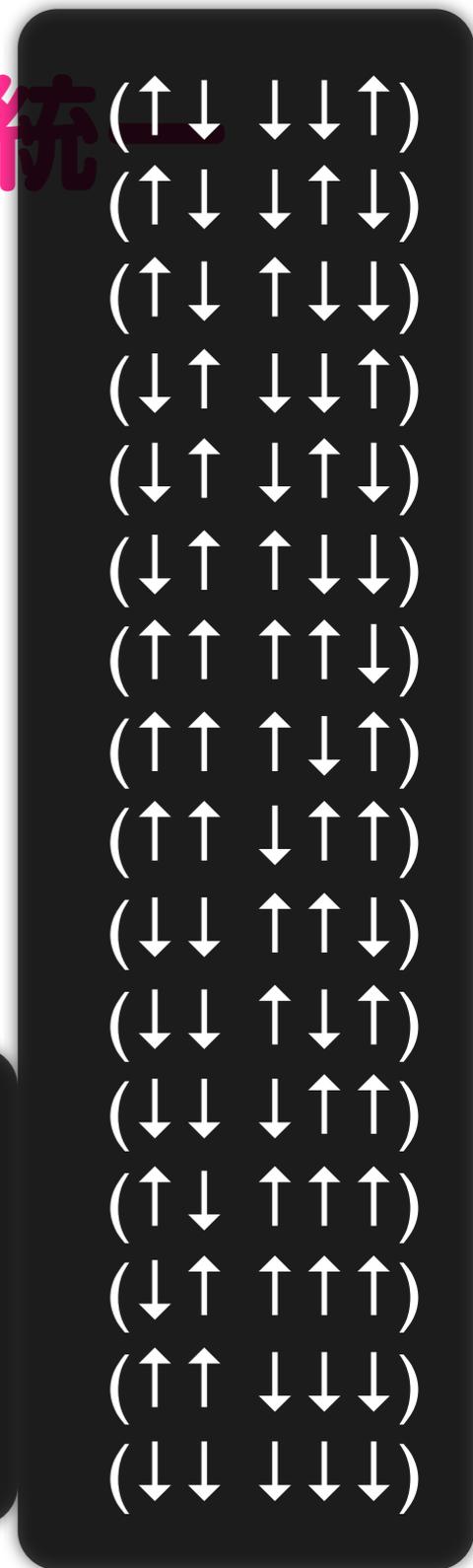
全てのクォーク
レプトンが統一！

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \text{R} & \begin{array}{c} \text{d} \\ \text{u} \end{array} \text{R} & \text{N}_i \text{R} \end{array} \right) =$$

16

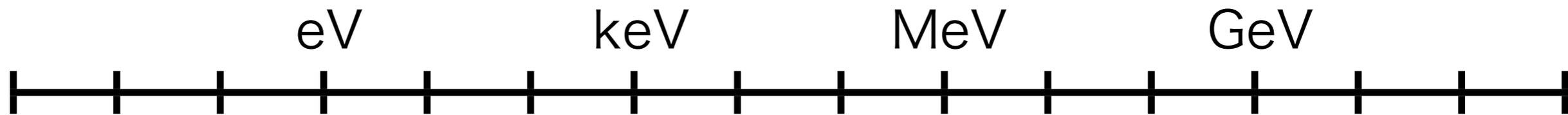


右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

② 小さなニュートリノ質量を説明

クォーク、レプトンの質量



ニュートリノ
(ν_1, ν_2, ν_3)



e, μ, τ



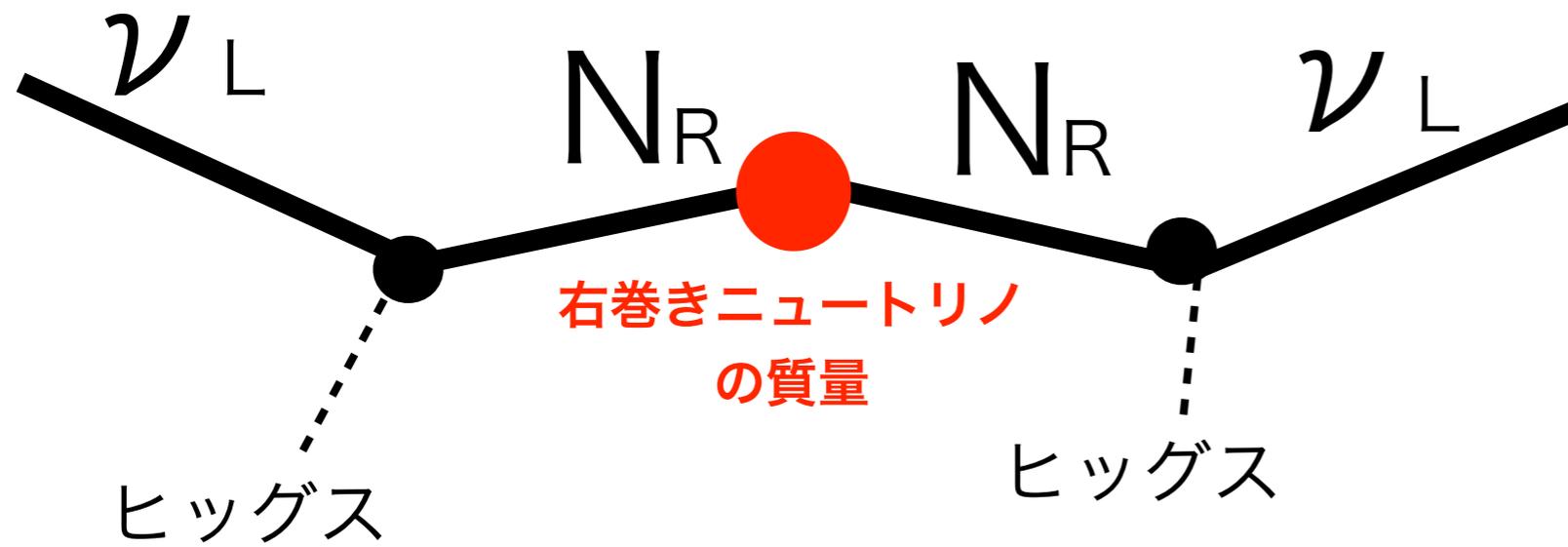
クォーク
(u, d, s, c, b, t)

・・・何でニュートリノだけこんなに軽いのか？

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

② 小さなニュートリノ質量を説明

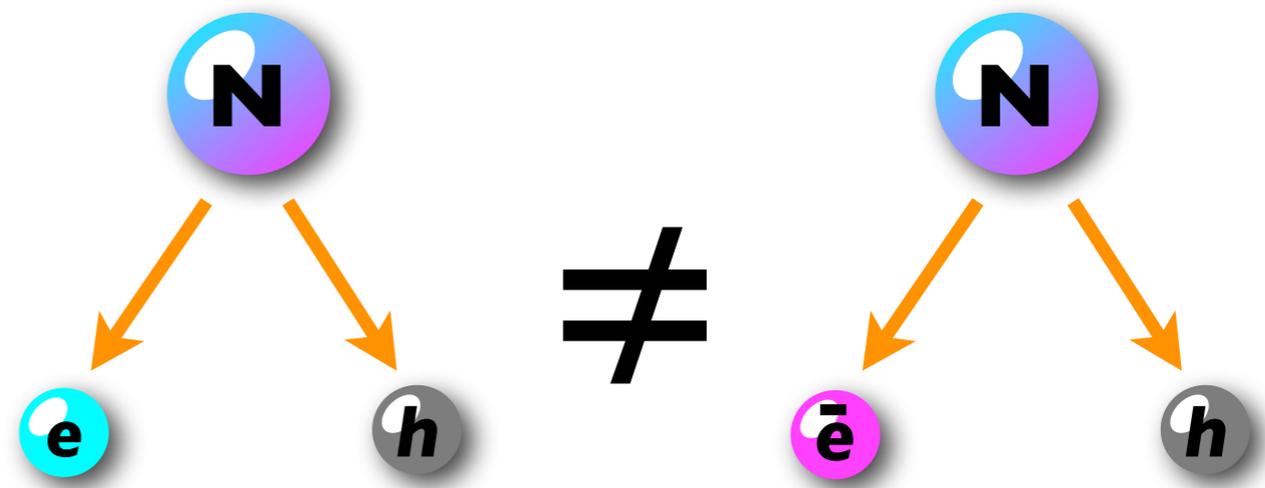


“シーソー機構”

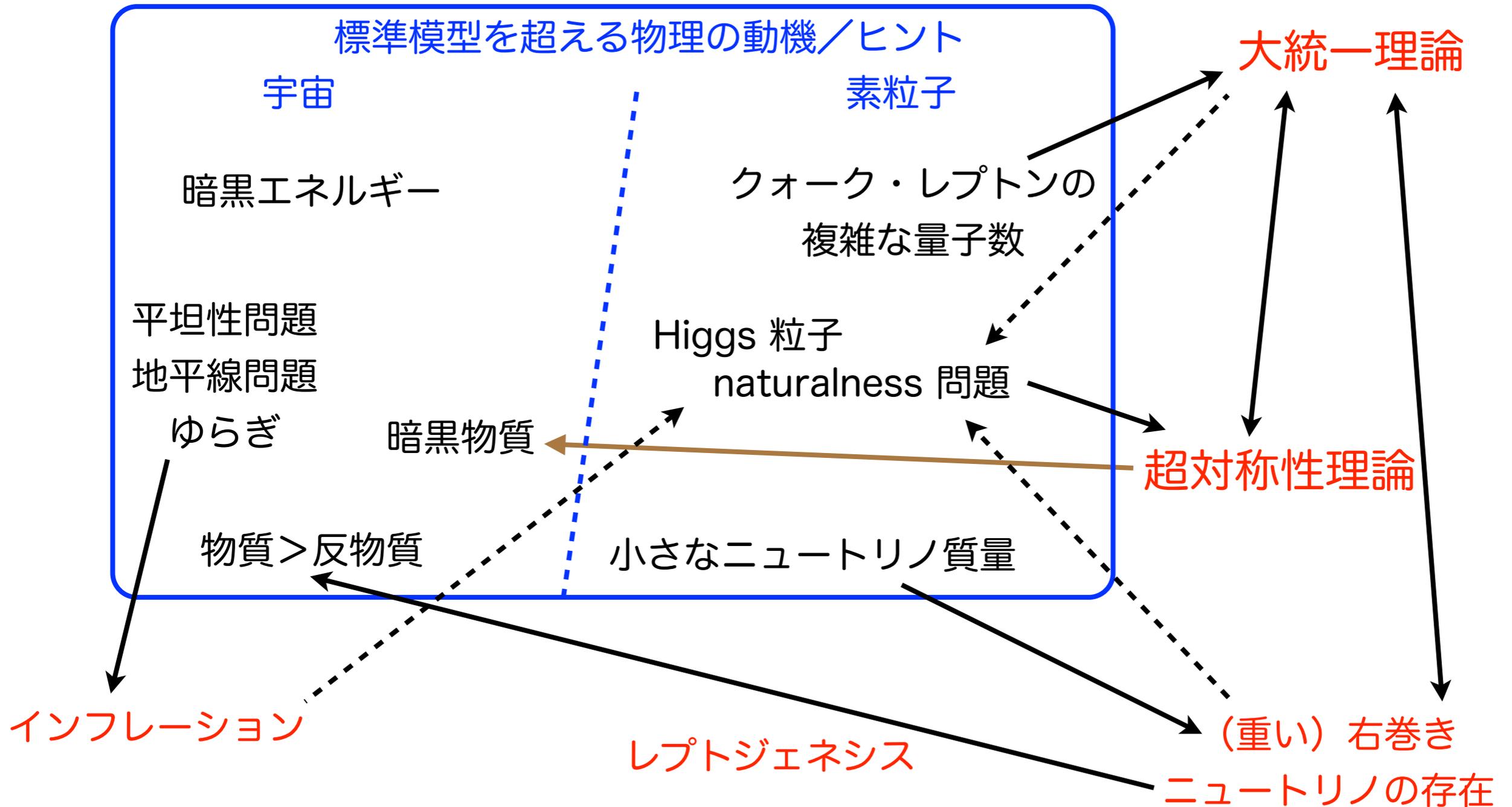
右巻きニュートリノ、実はすごい

- ① クォーク・レプトンがさらに統一
- ② 小さなニュートリノ質量を説明
- ③ 宇宙の物質 > 反物質を説明出来る。

レプトジェネシス

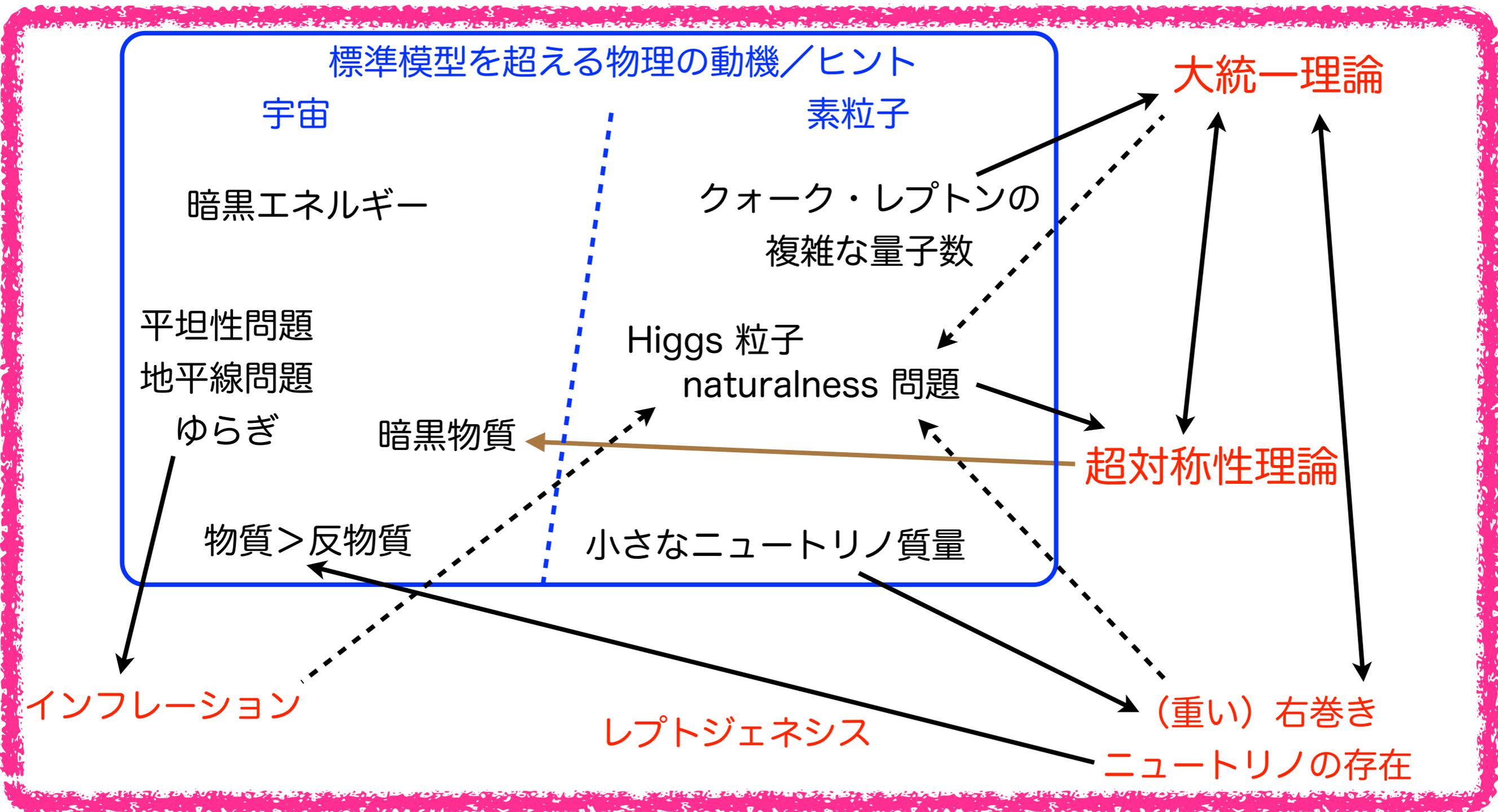


標準模型を超える物理



以下時間が無いので省略しますが・・・

標準模型を超える物理



これ全部、研究の対象

標準模型を超える物理

標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

暗黒エネルギー

平坦性問題
地平線問題

ゆらぎ

物質 > 反物質

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

Higgs 粒子
naturalness 問題

小さなニュートリノ質量

暗黒物質

大統一理論

超対称性理論

インフレーション

全然違うシナリオがもしかかもしれません！
これから解いていく謎！
「挑戦者」募集中！

レプトシエタシカ

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在