

「標準模型を超える物理」

入門

浜口幸一（東京大学）

@京都大学集中講義、2019.10/9-11.

2部構成

第1部：

スライドを使って全体的な話 (1～2コマ)

第2部

黒板を使って各論

途中でどんどん質問して下さい！

Questions in English are also welcome!

2部構成

第1部：

スライドを使って全体的な話 (1～2コマ)

第2部

黒板を使って各論

(質問や要望に応じて、適宜順番を入れ替えようと思います。)

2-A 大統一理論

2-B ニュートリノ質量とシーソー機構

2-C 標準宇宙論入門

2-D インフレーション

2-E 宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス/レプトジェネシス

2-F 暗黒物質

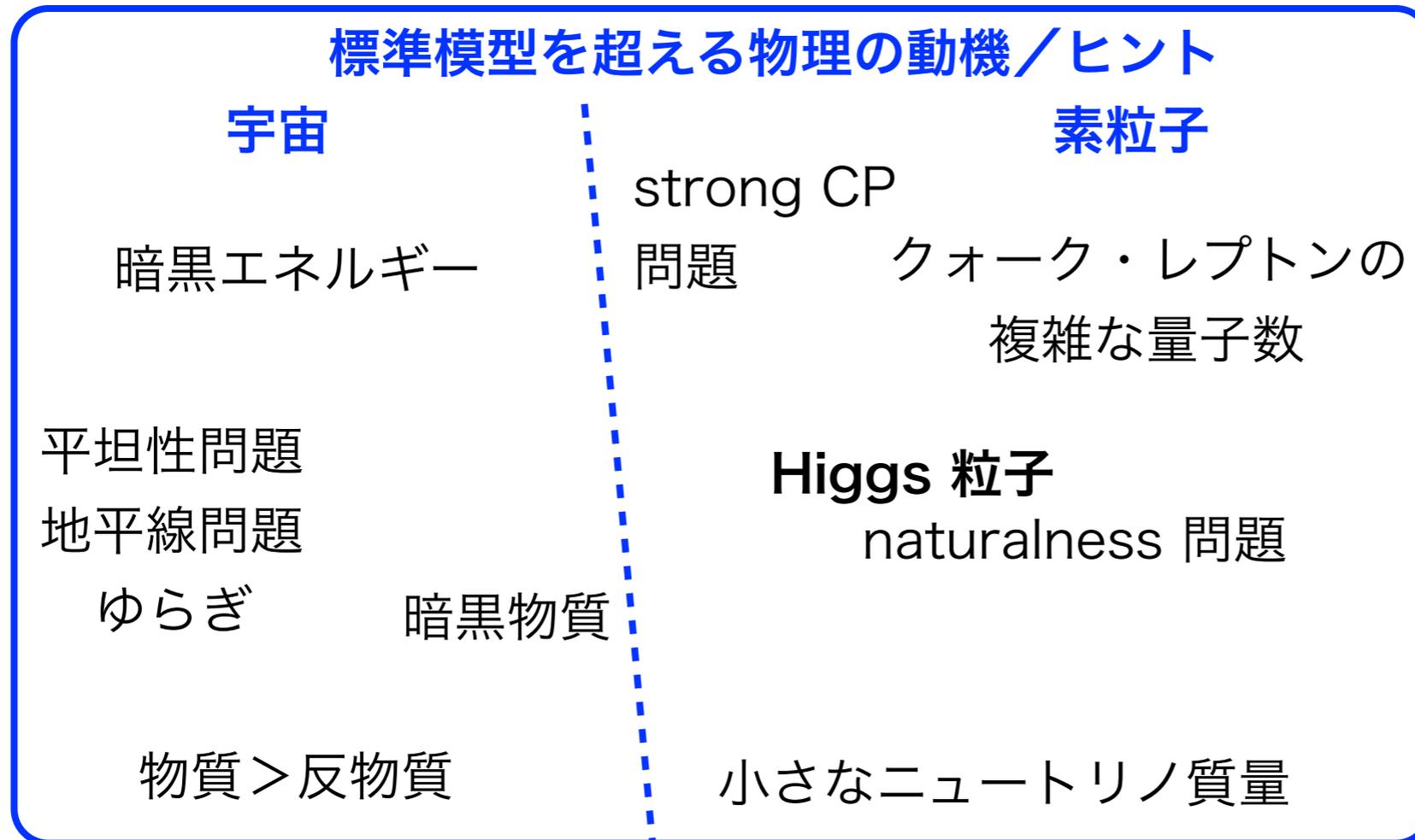
2-G strong CP問題とアクシオン

2-H 超対称性模型

途中でどんどん質問して下さい！

Questions in English are also welcome!

第1部



具体的には、こんな↑イメージ図
を埋めながら話を進めようと思います

第1部

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

strong CP

問題

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

第1部

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

strong CP

問題

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

インフレーション

第1部

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

strong CP

問題

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

インフレーション

バリオン生成

第1部

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

strong CP
問題

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

インフレーション

バリオン生成

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在

第1部

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ 暗黒物質

小さなニュートリノ質量

物質 > 反物質

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

ニュートリノの存在

第1部

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

strong CP
問題

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

大統一理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

第1部

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

strong CP
問題

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

大統一理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

第1部

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

第1部

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

超対称性理論

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

ニュートリノの存在

第1部

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

strong CP
問題

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

大統一理論

超対称性理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

第1部

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

暗黒物質

素粒子

strong CP
問題

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

大統一理論

超対称性理論

インフレーション

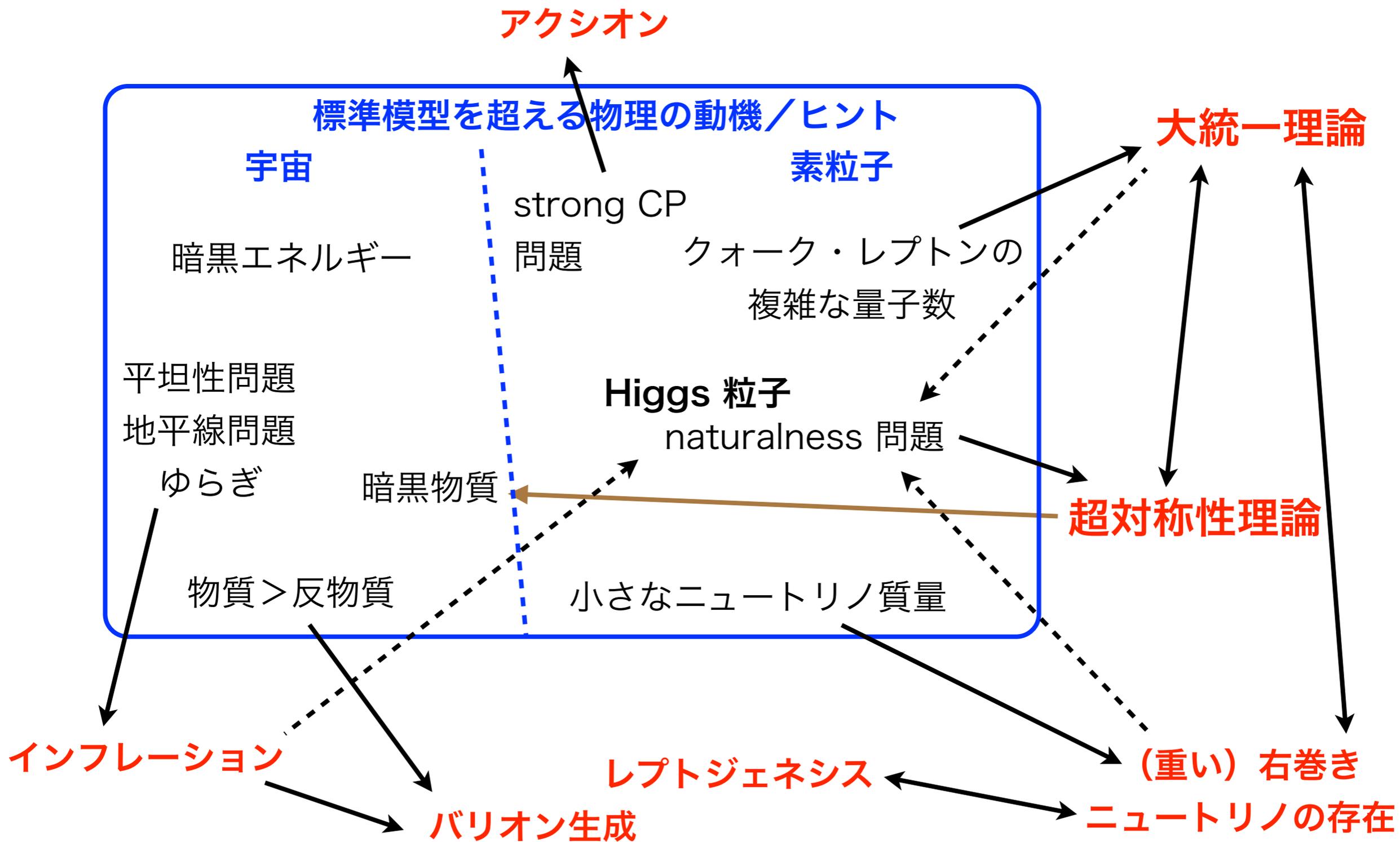
バリオン生成

レプトジェネシス

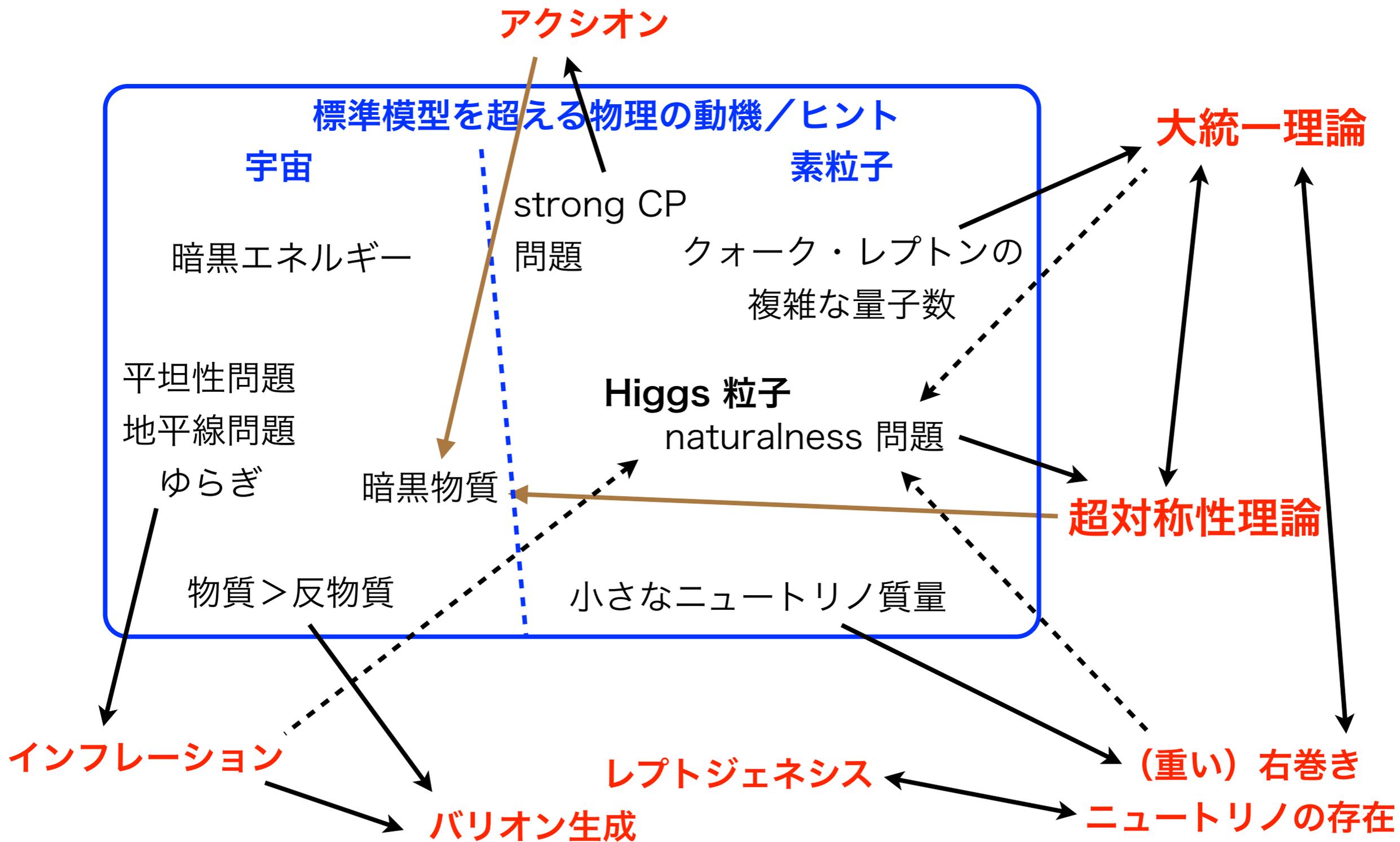
(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

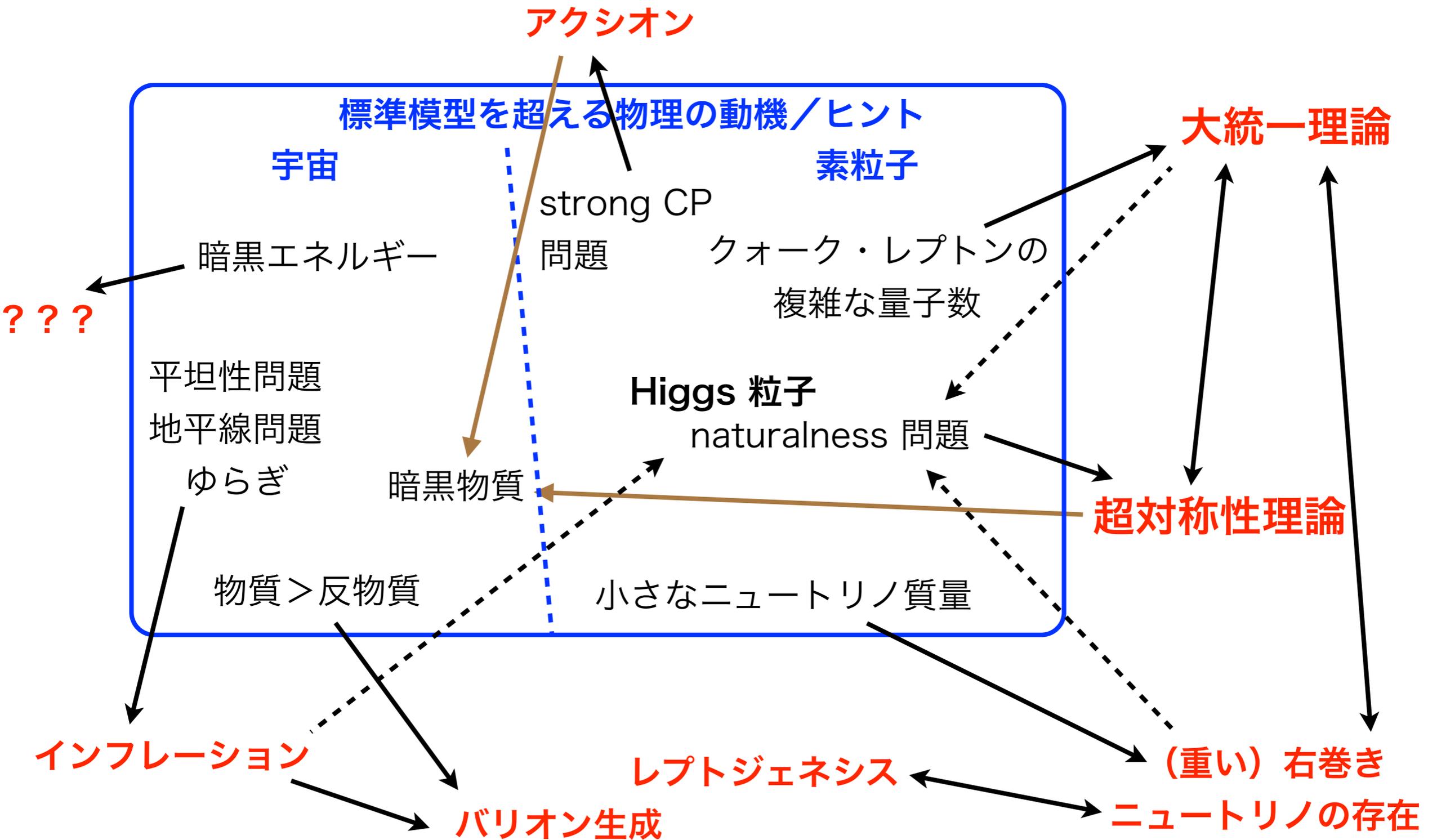
第1部



第1部



第1部



第1部

各種探索実験

アクシオン

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

大統一理論

collider実験
のターゲット

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

超対称性理論

ゆらぎ

暗黒物質

小さなニュートリノ質量

物質 > 反物質

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

CMB, GW

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

???

第1部

各種探索実験

アクション

陽子崩壊?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ

暗黒物質

小さなニュートリノ質量

物質 > 反物質

大統一理論

collider実験
のターゲット

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もありません!

CMB, GW

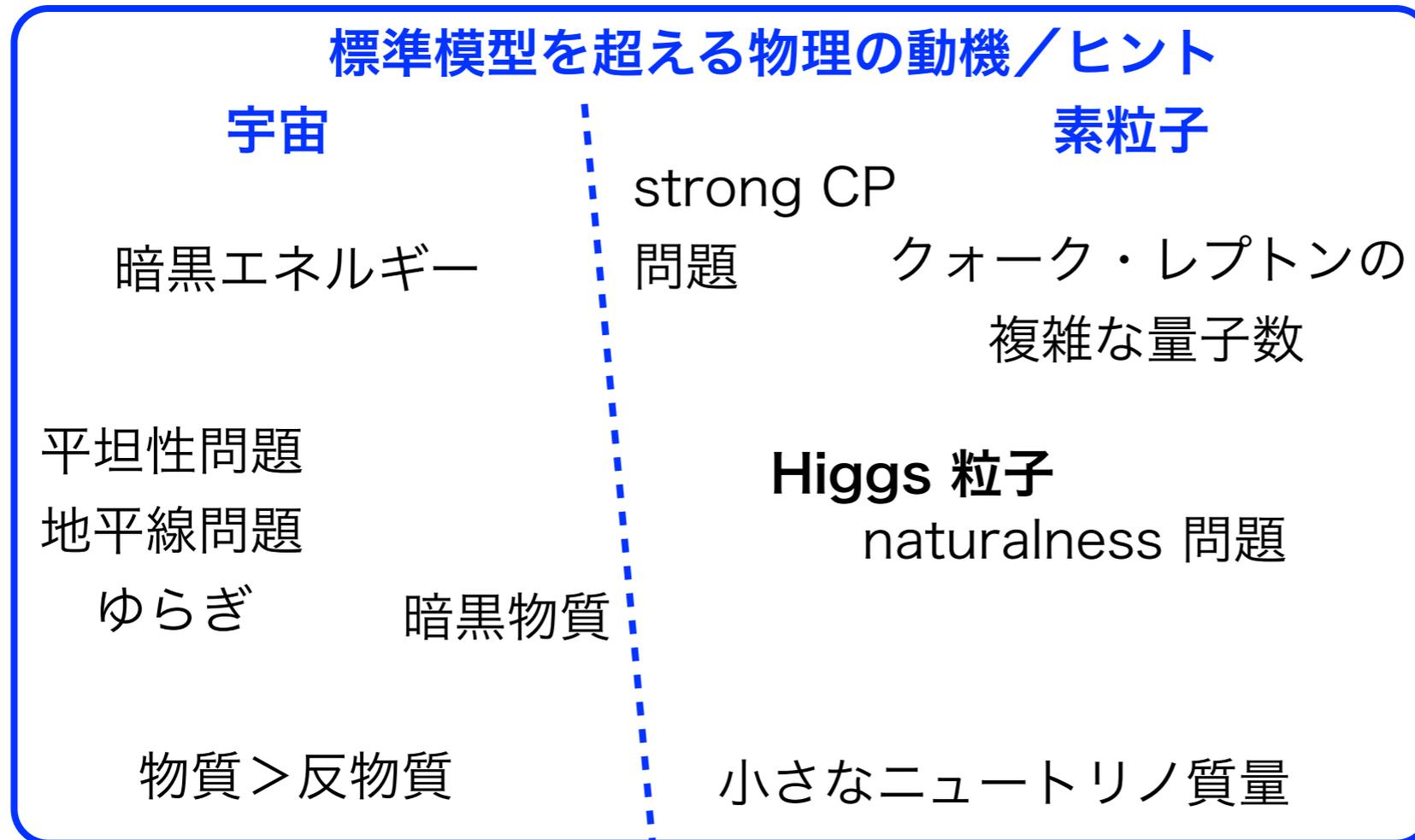
CPV in ν 振動?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊?

第1部



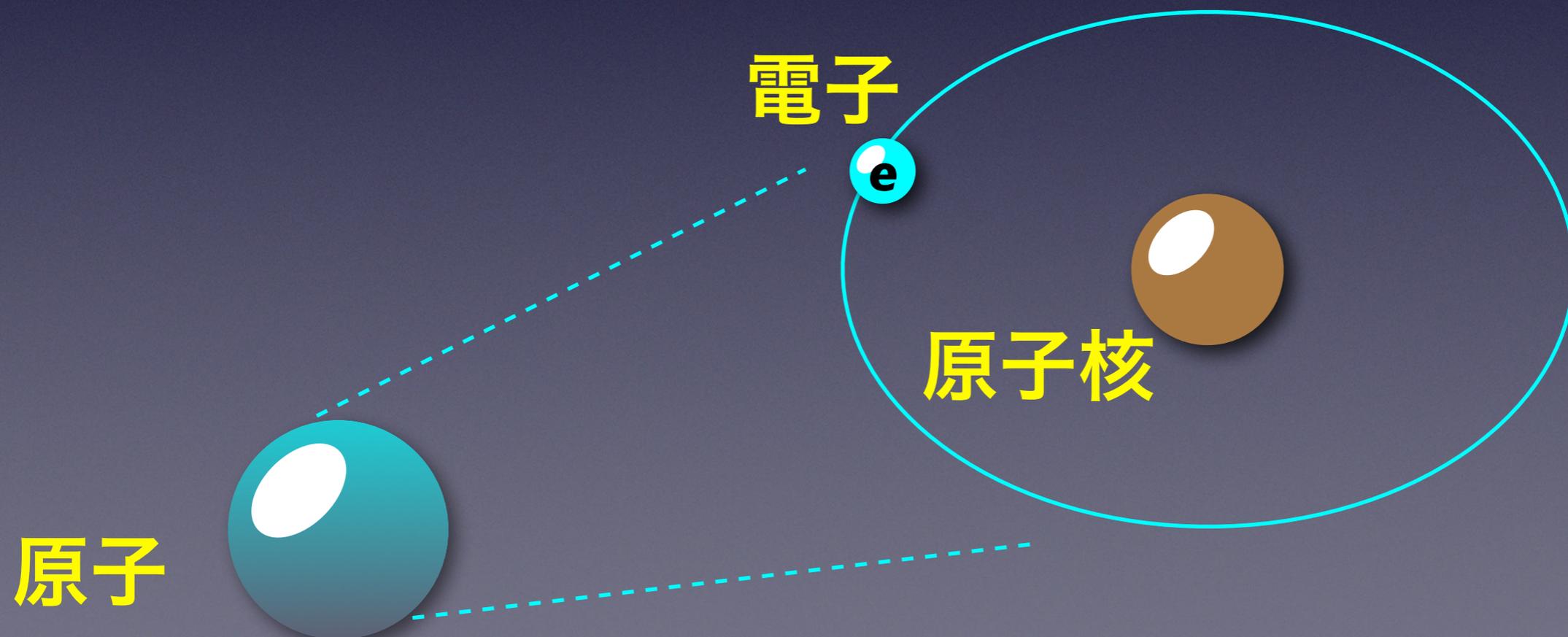
さて、どこから始めましょう？

◆ **まず標準模型**

まずは標準模型から

素粒子：

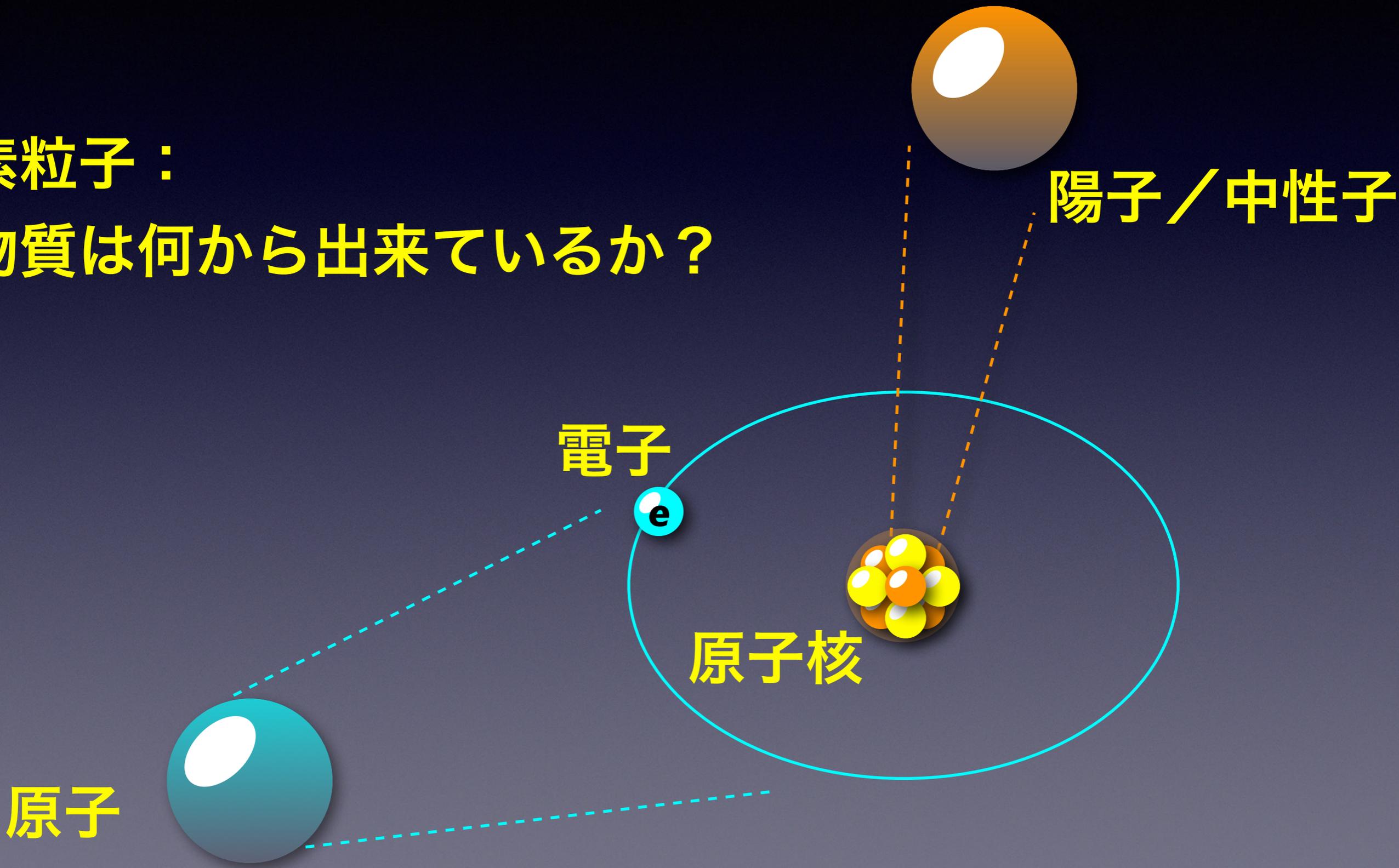
物質は何から出来ているか？



まずは標準模型から

素粒子：

物質は何から出来ているか？



まずは標準模型から

素粒子：
物質は何から出来ているか？

クォーク



陽子 / 中性子

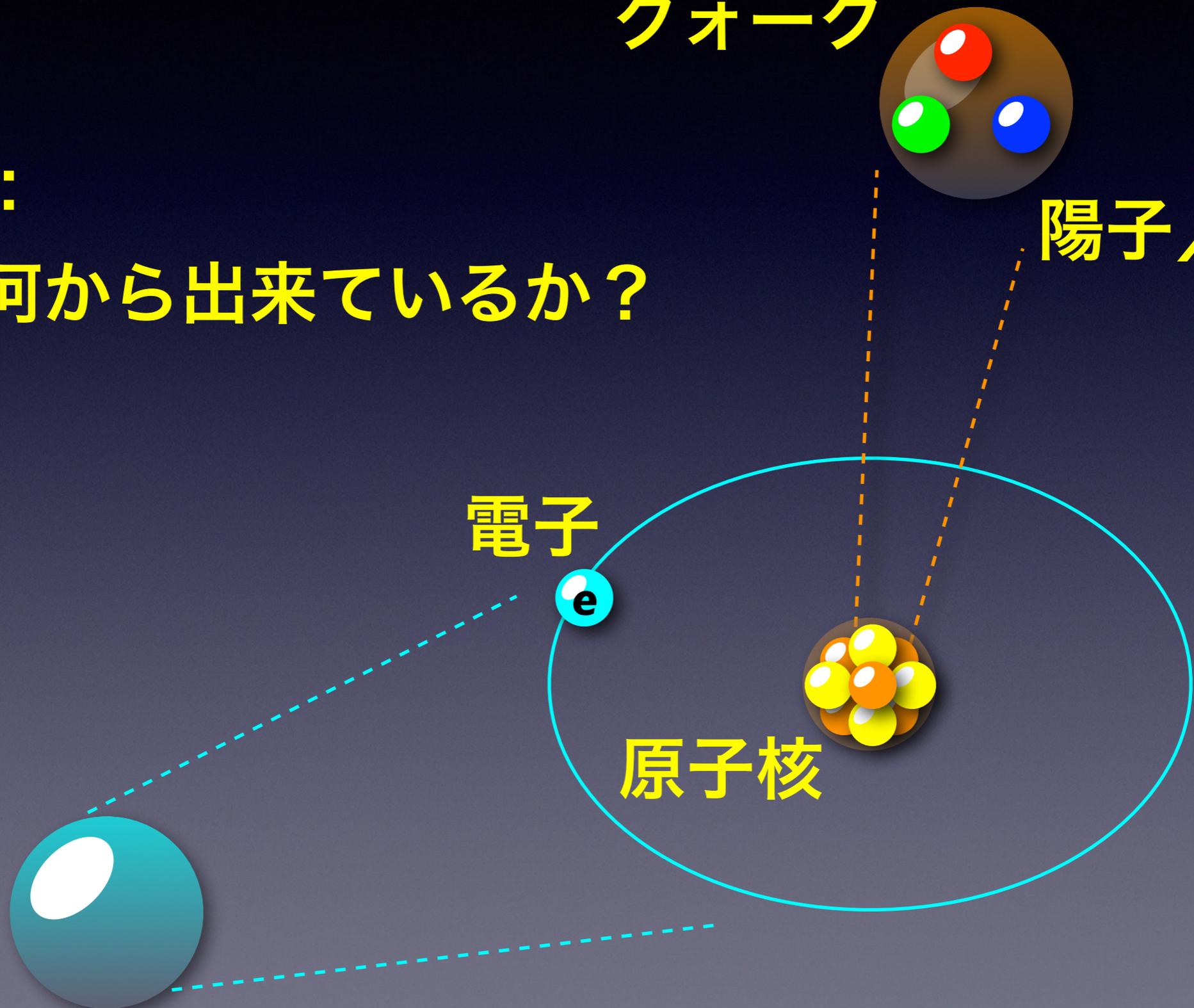
電子



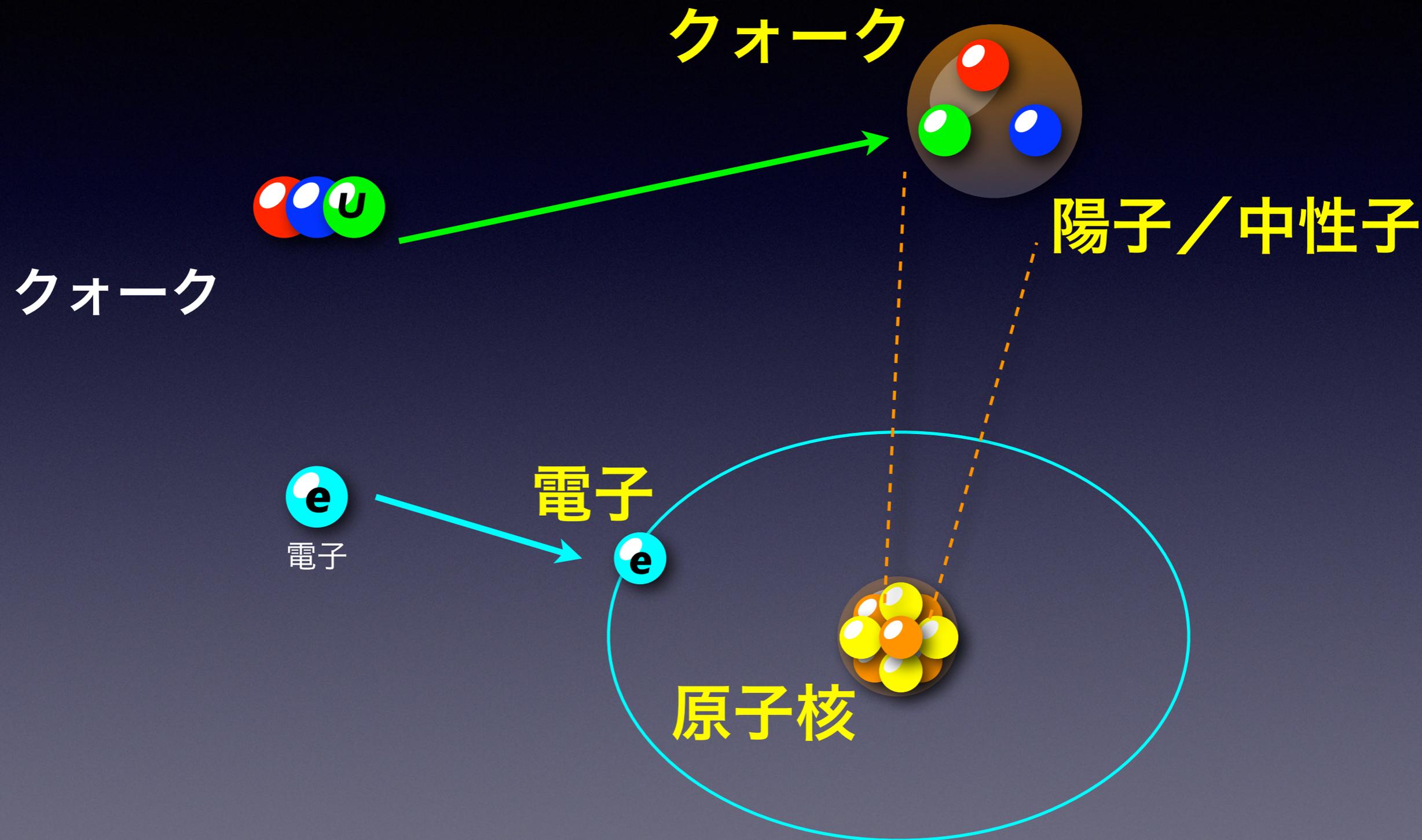
原子核



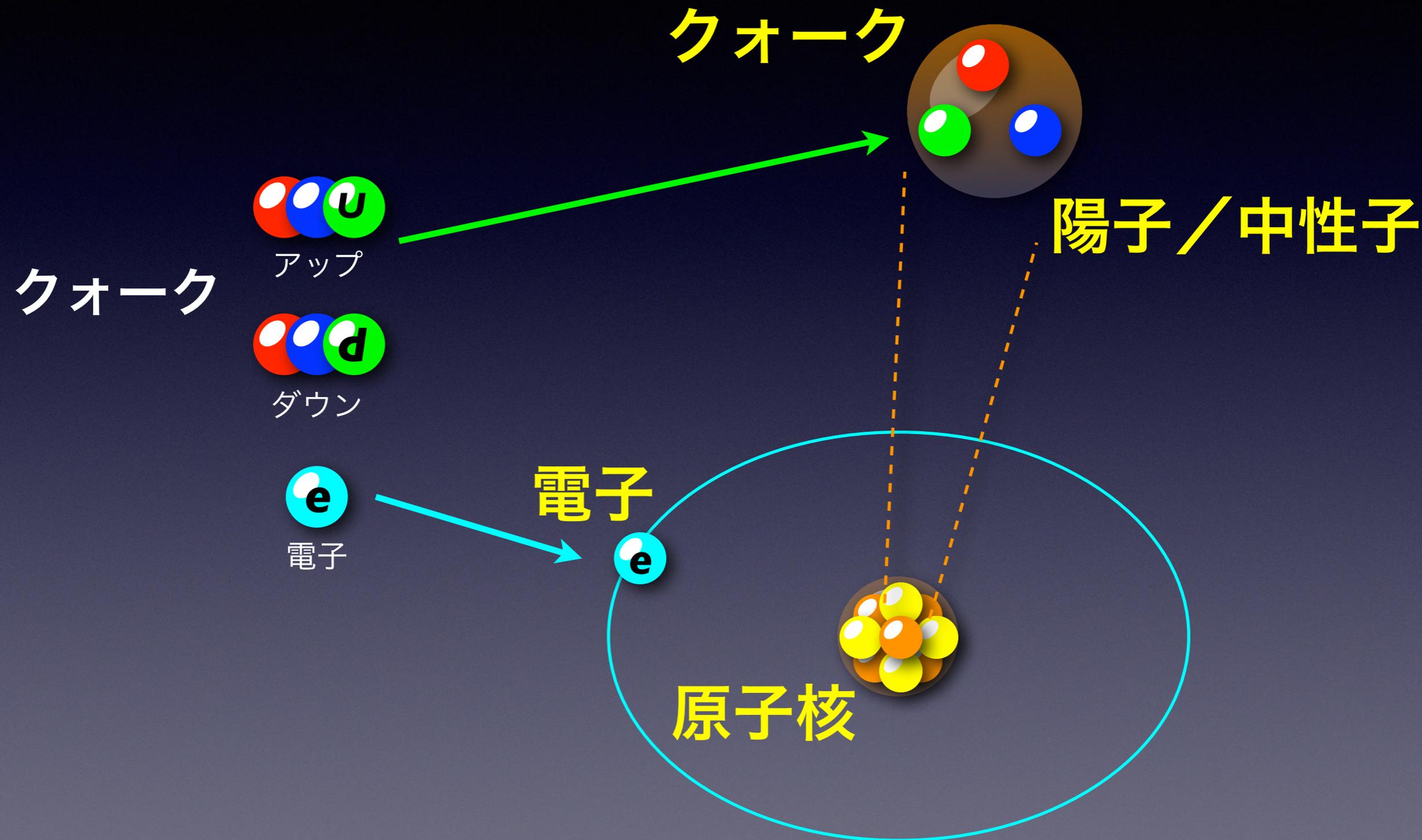
原子



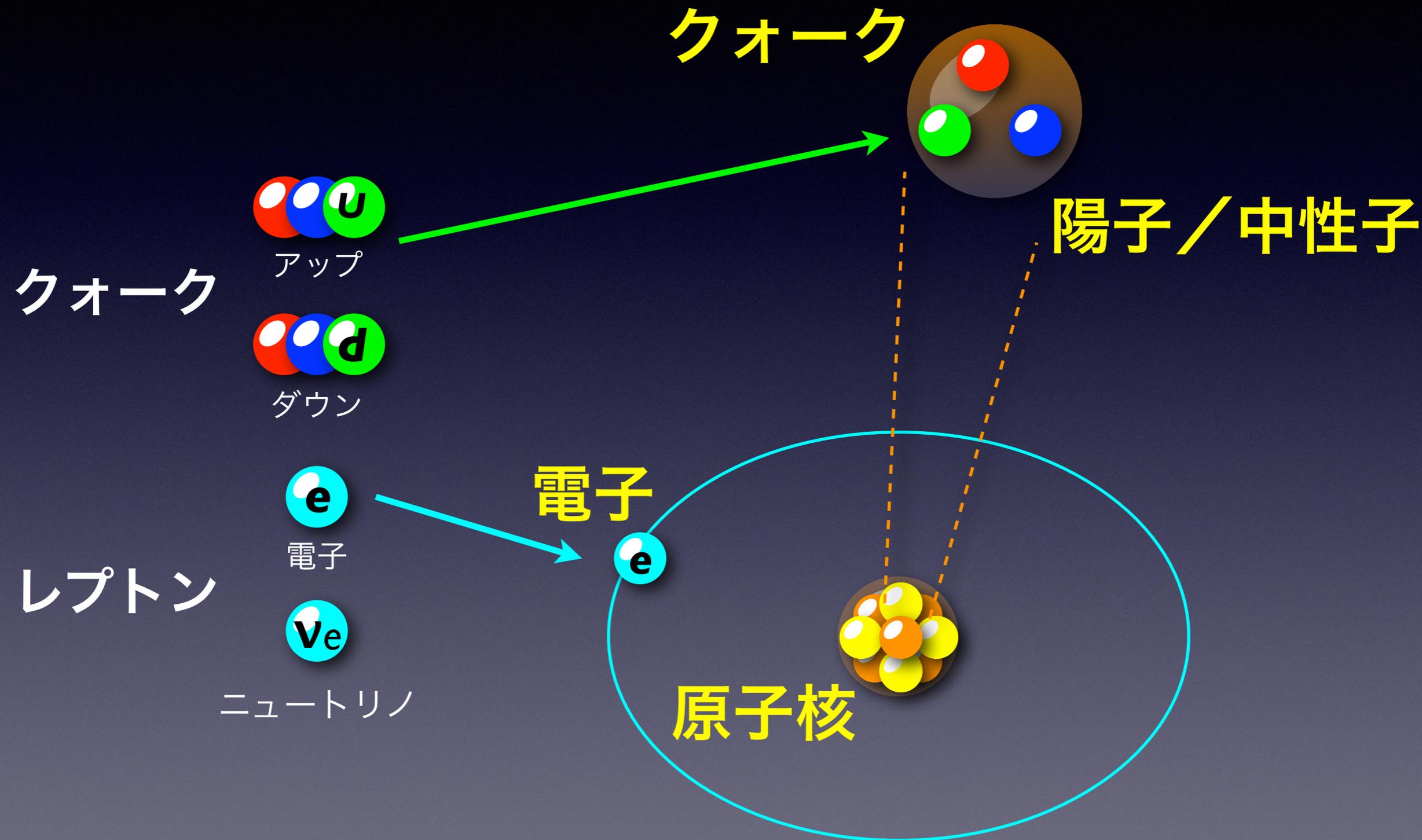
まずは標準模型から



まずは標準模型から



まずは標準模型から



まずは標準模型から

クォーク



アップ



ダウン

レプトン



電子



eニュートリノ

まずは標準模型から

第1世代 第2世代 第3世代

クォーク



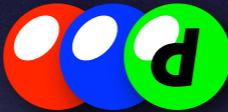
アップ



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

まずは標準模型から

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

まずは標準模型から

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

まずは標準模型から

第1世代 第2世代 第3世代

クォーク



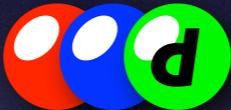
アップ



チャーム



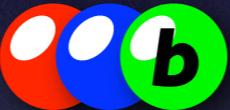
トップ



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

まずは標準模型から

第1世代 第2世代 第3世代

クォーク



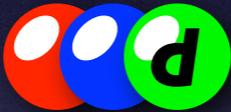
アップ



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

まずは標準模型から

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

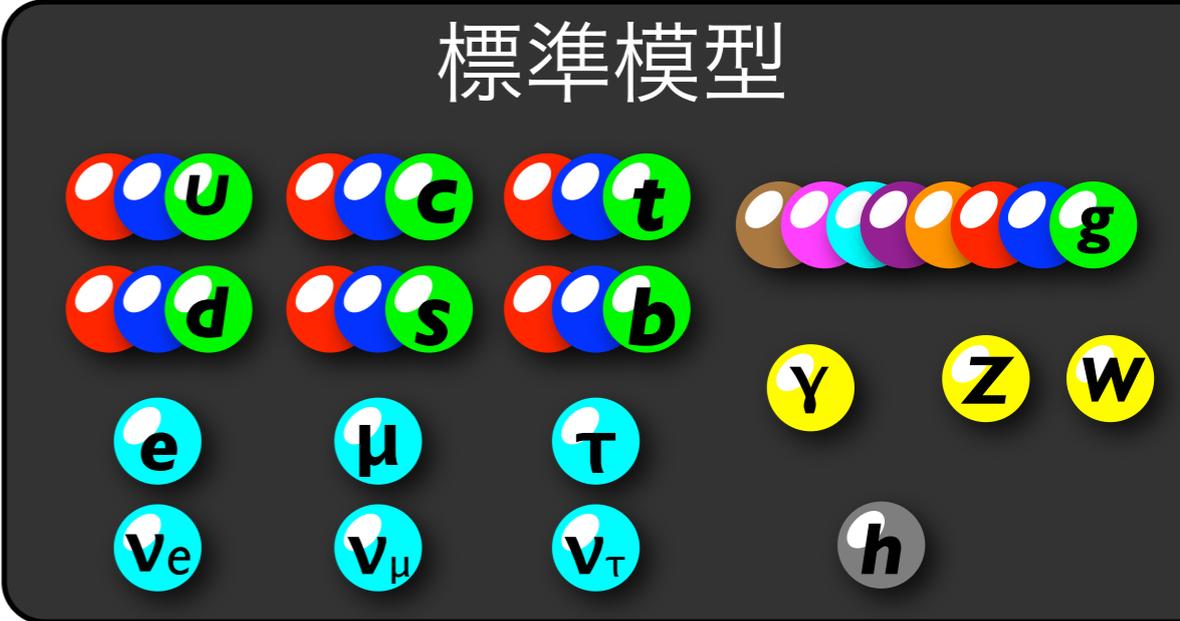
ゲージ
粒子

Z, Wボゾン

ヒッグス粒子

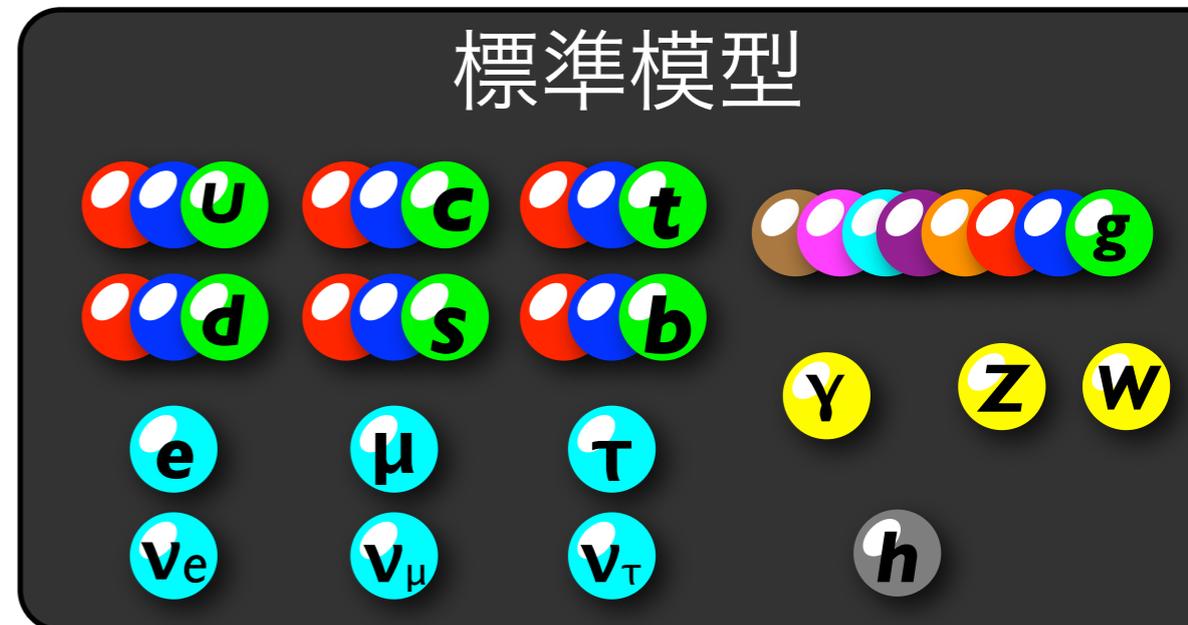
現在までに確立している (検証されている) 最先端の理論

まずは標準模型から



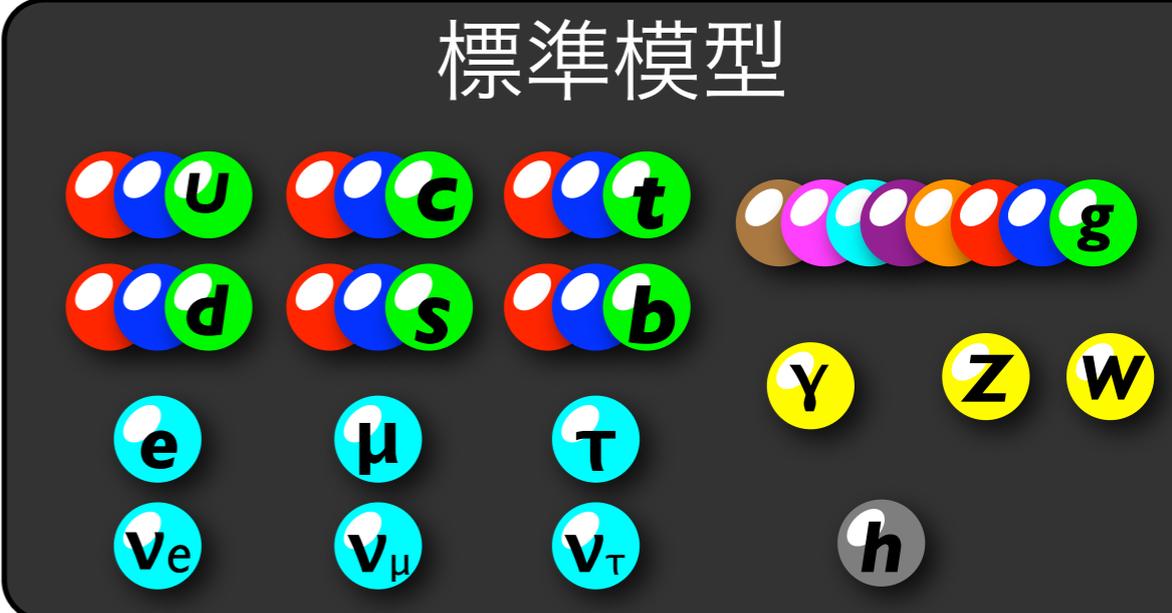
▶ 標準模型：「場の量子論」で記述されている。

まずは標準模型から



- ▶ 標準模型：「場の量子論」で記述されている。
- ▶ 場の量子論では「ラグランジアン」が素粒子の性質や素粒子の間に働く力を記述している。

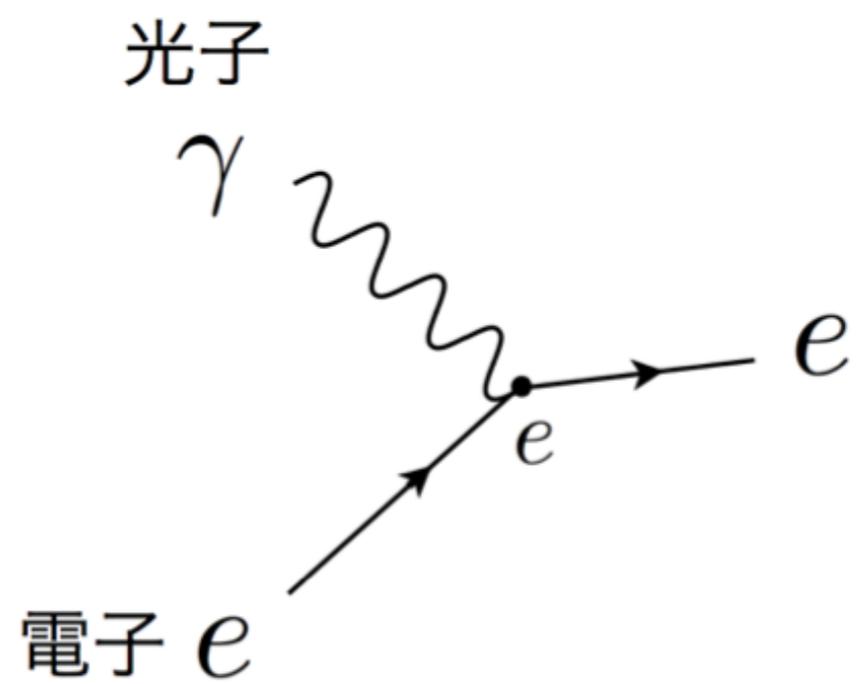
まずは標準模型から



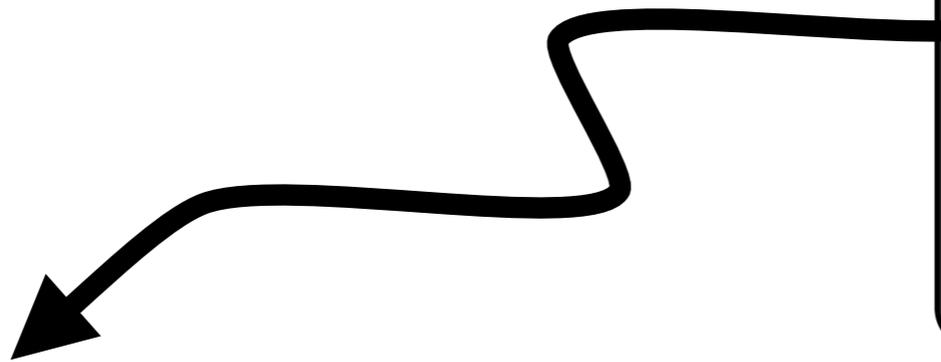
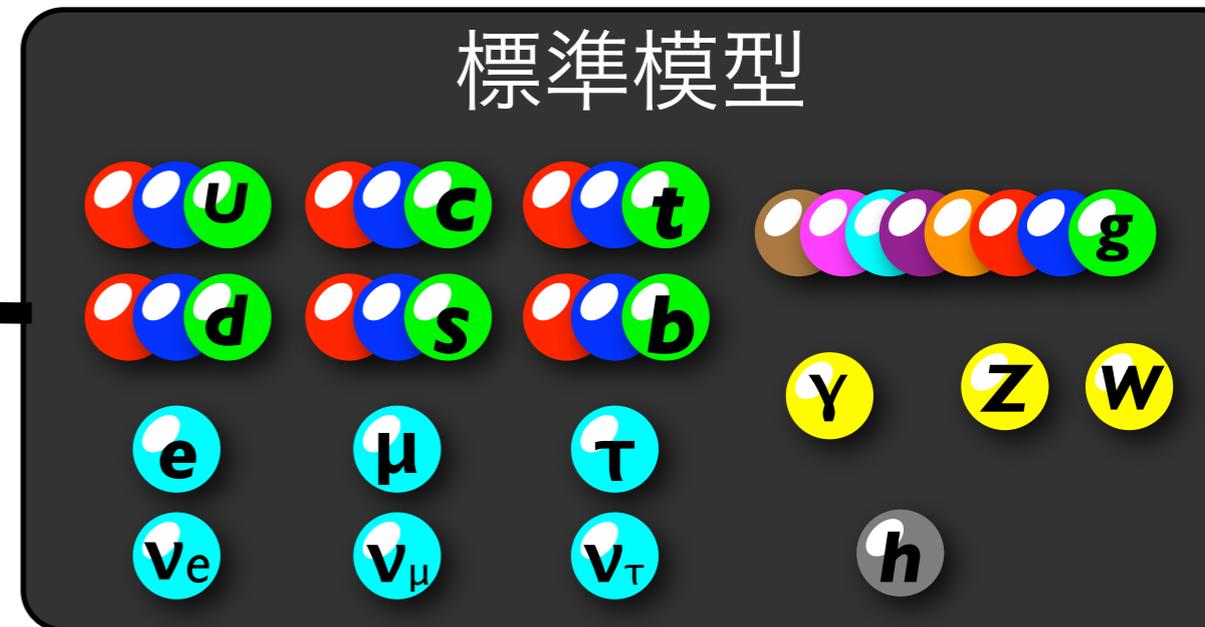
- ▶ 標準模型：「場の量子論」で記述されている。
- ▶ 場の量子論では「ラグランジアン」が素粒子の性質や素粒子の間に働く力を記述している。
- ▶ 例えば電子と光子の相互作用は・・・

$$\mathcal{L} = e \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

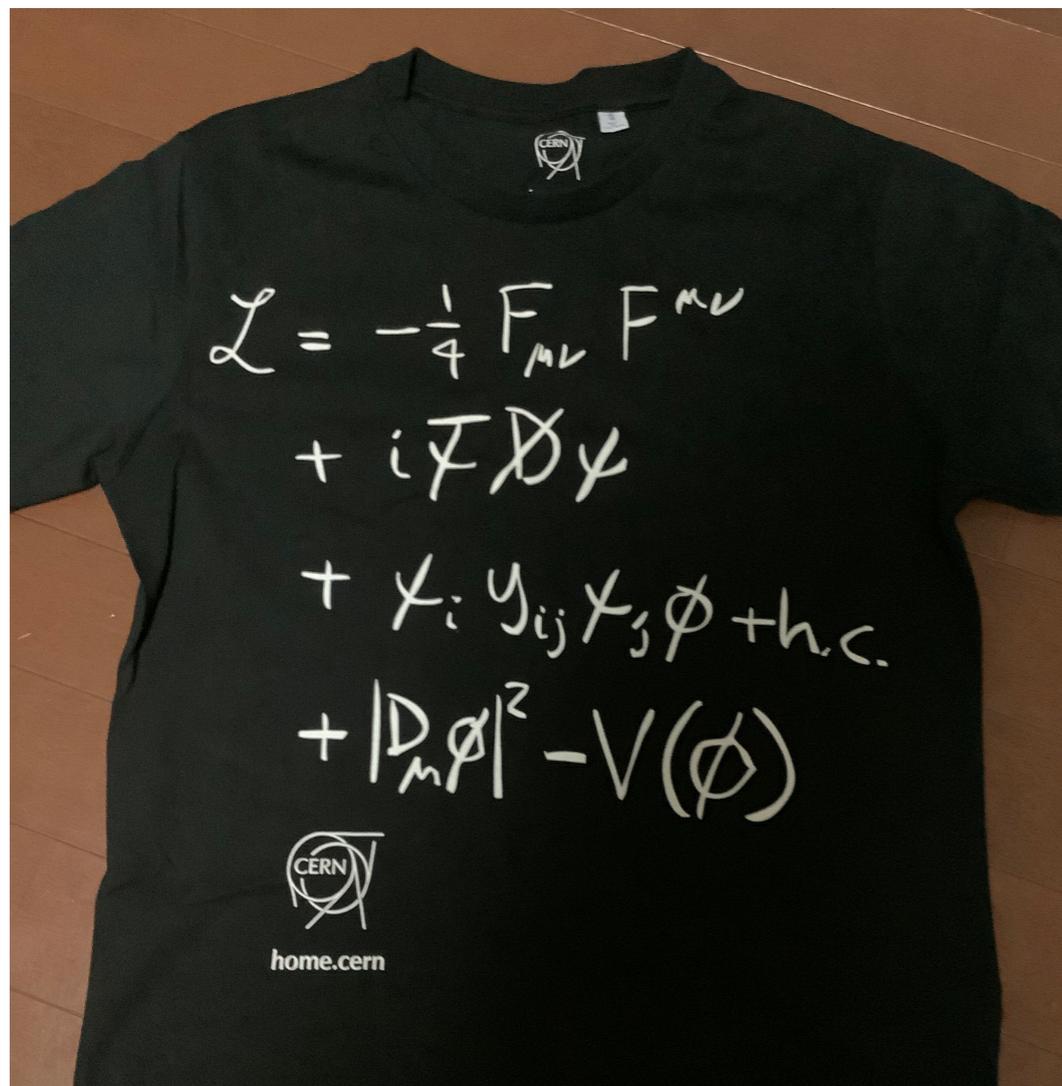
ラグランジアン 結合定数 電子(or 陽電子) 光子



標準模型

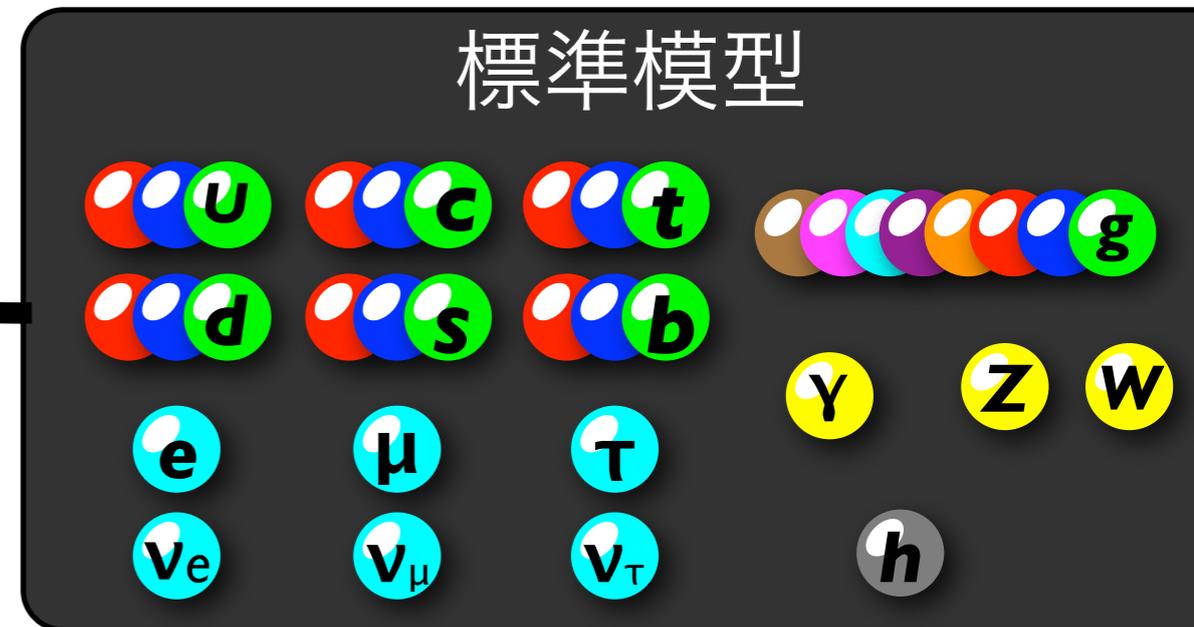


▶ 標準模型の「ラグランジアン」



このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型

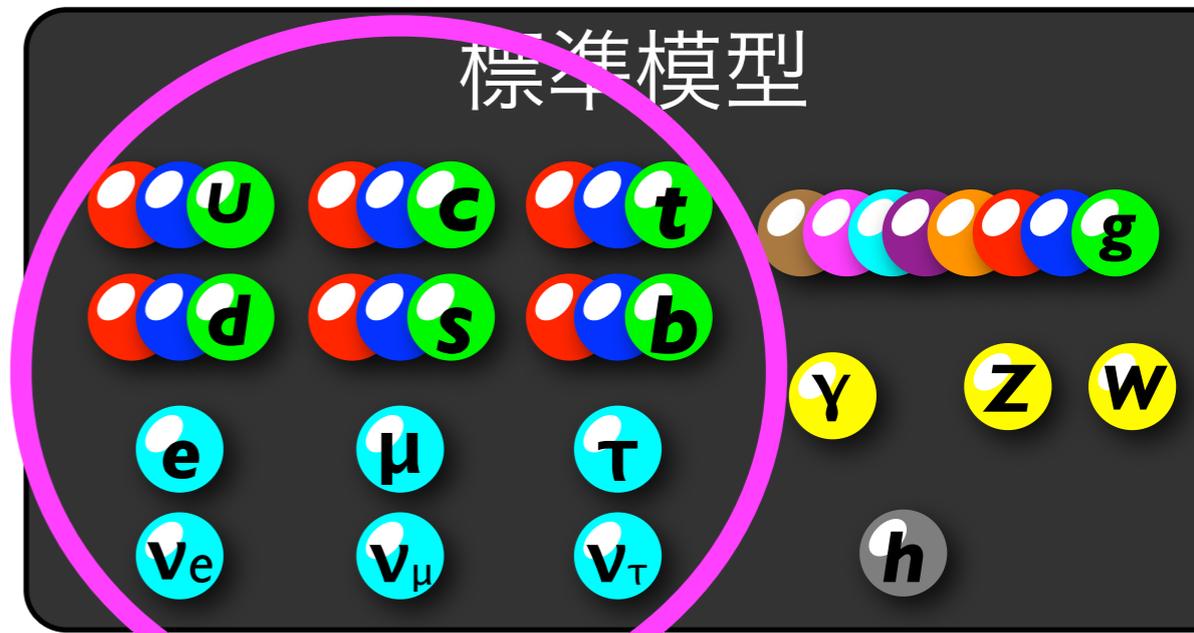


▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



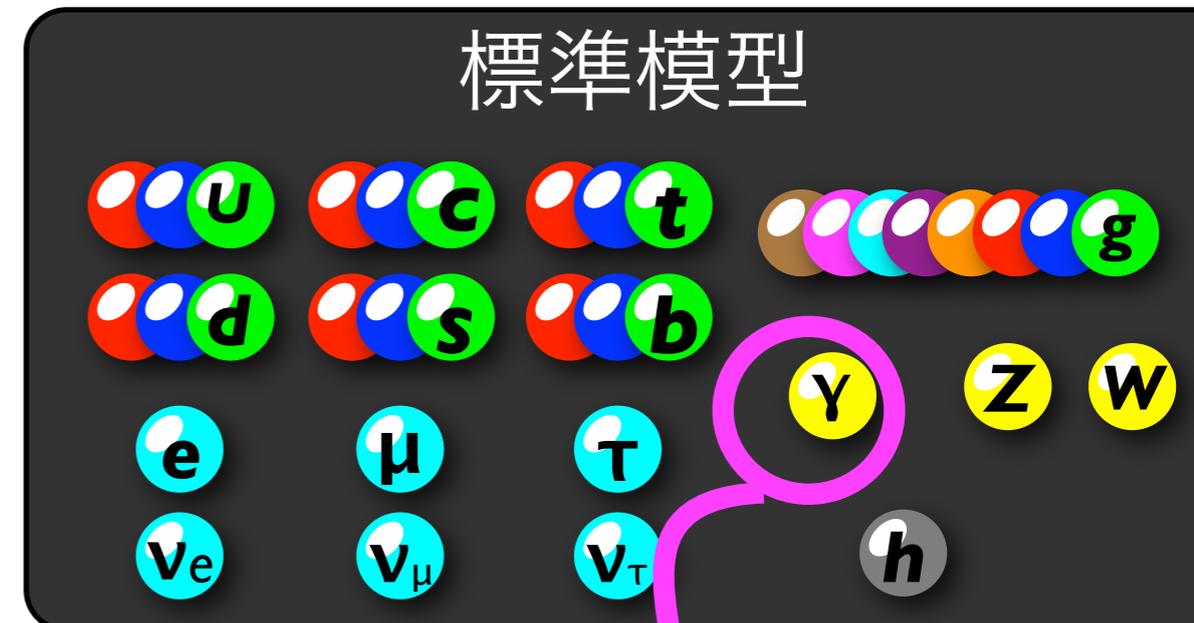
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

クォーク、レプトン

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



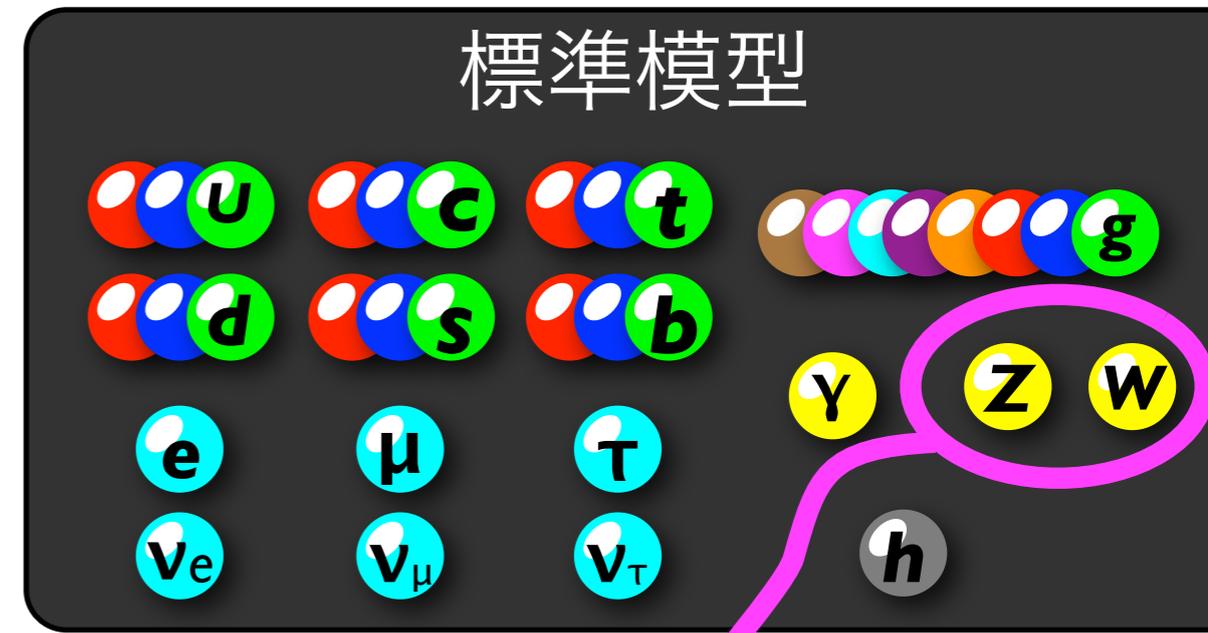
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

光子
電磁気相互作用

このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



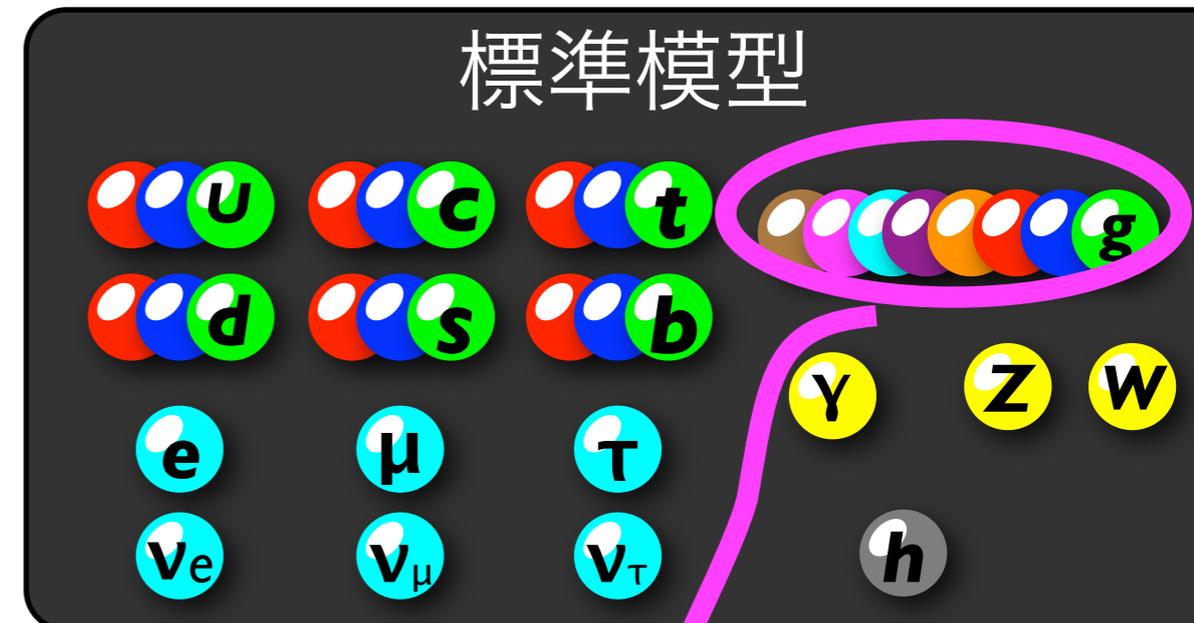
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

W, Z
弱い相互作用

このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



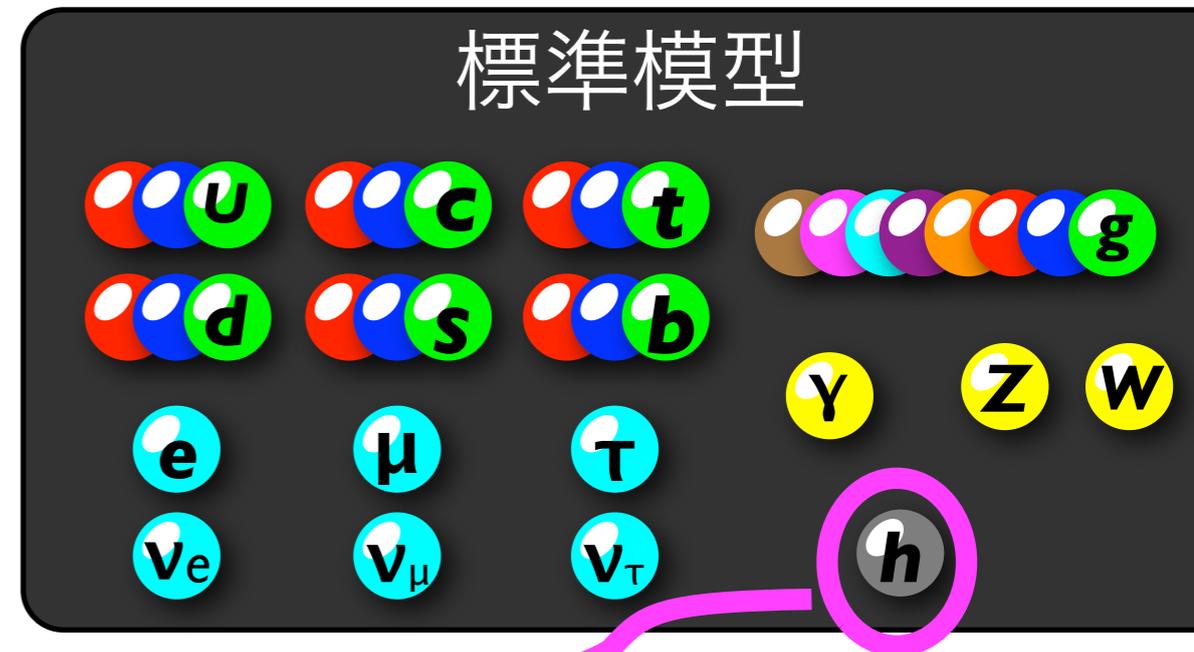
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

グルーオン
強い相互作用

このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



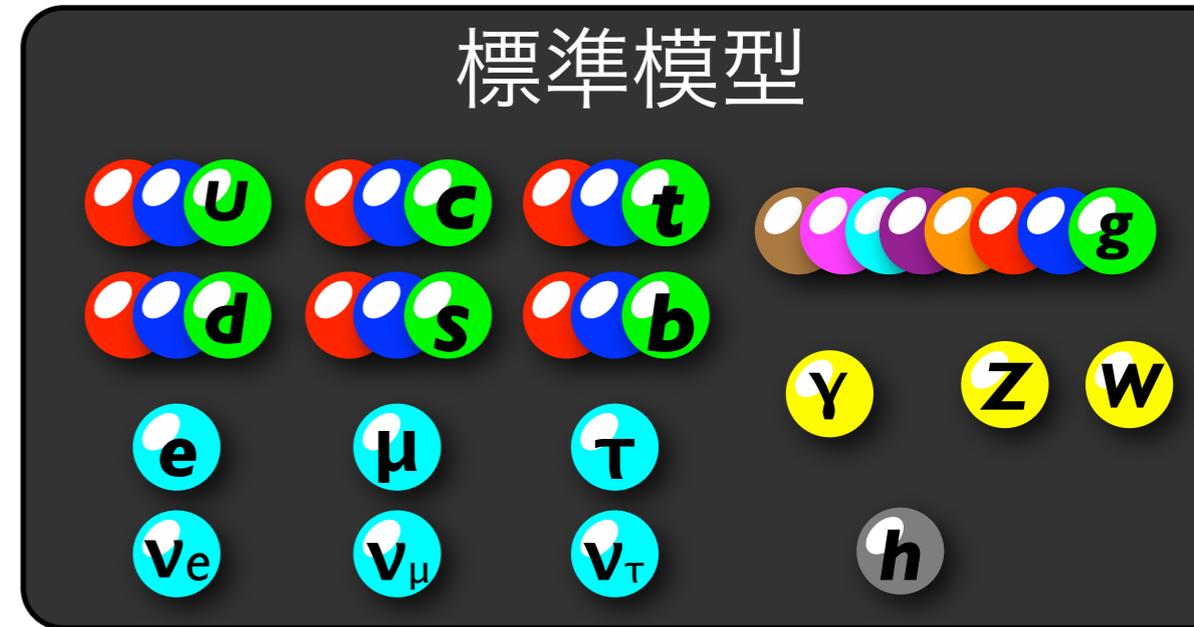
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

ヒッグス

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

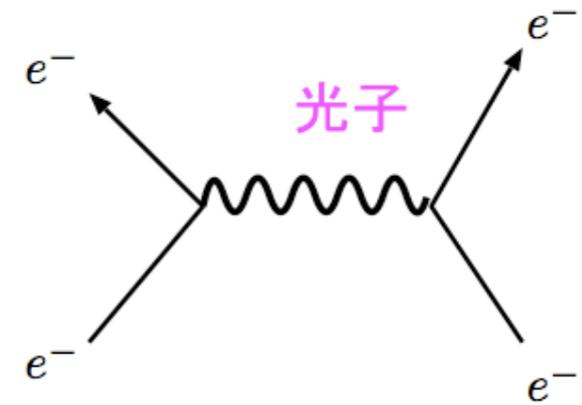
このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型

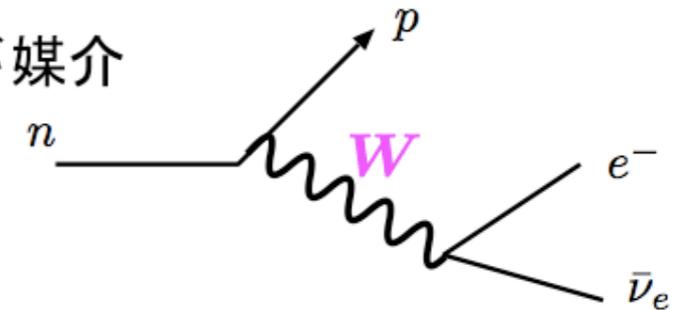


▶ 粒子同士に働く「力」も素粒子によって媒介されている。

- 電磁気力 … 光子が媒介



- 弱い力 … W, Z ボゾンが媒介



- 強い力 … グルーオンが媒介

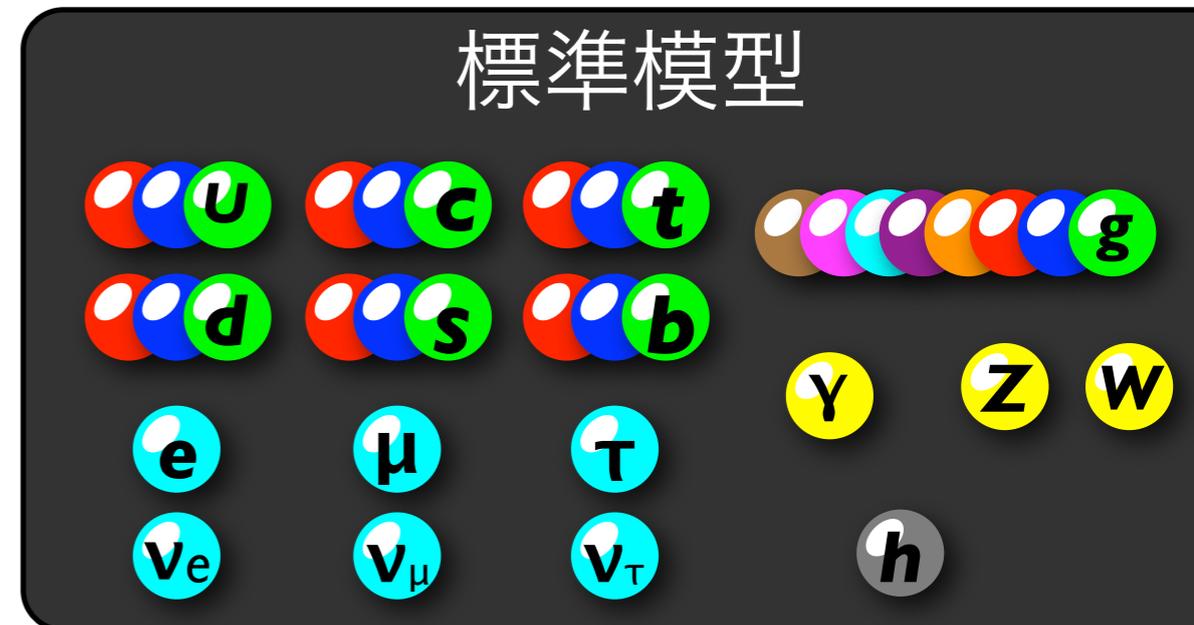


「3つの力」

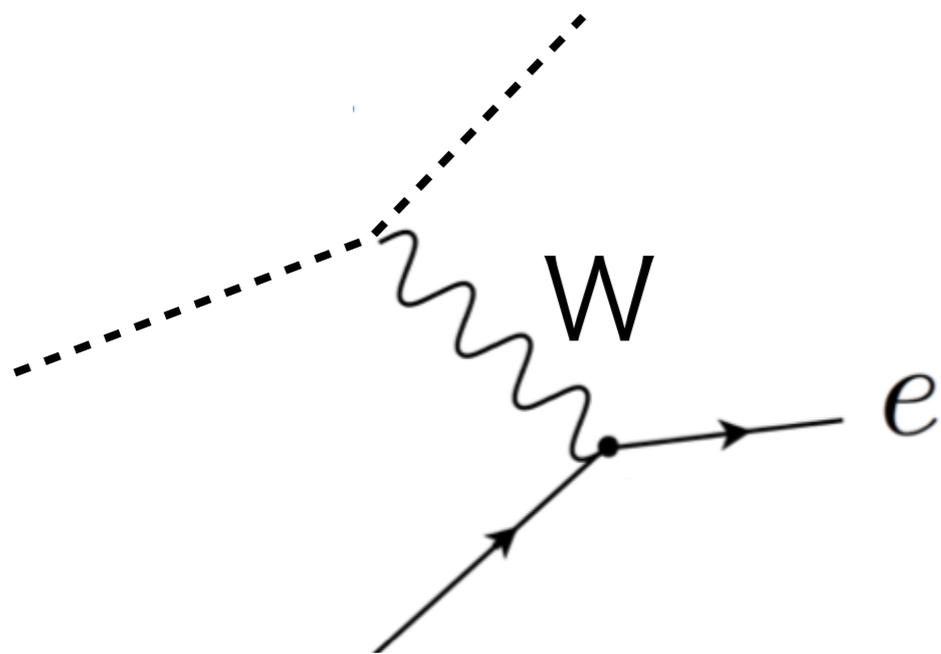
= ゲージ相互作用

ゲージ粒子（ゲージボゾン）が媒介している。

標準模型



▶ 相互作用は粒子の種類を変えることもある。

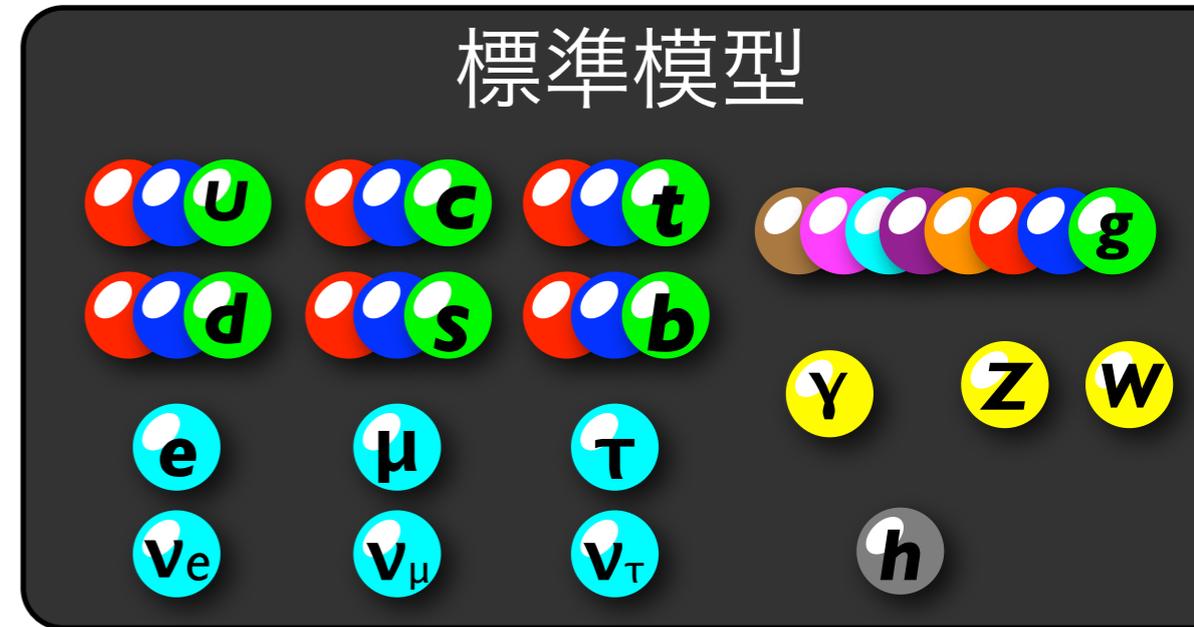


ニュートリノ

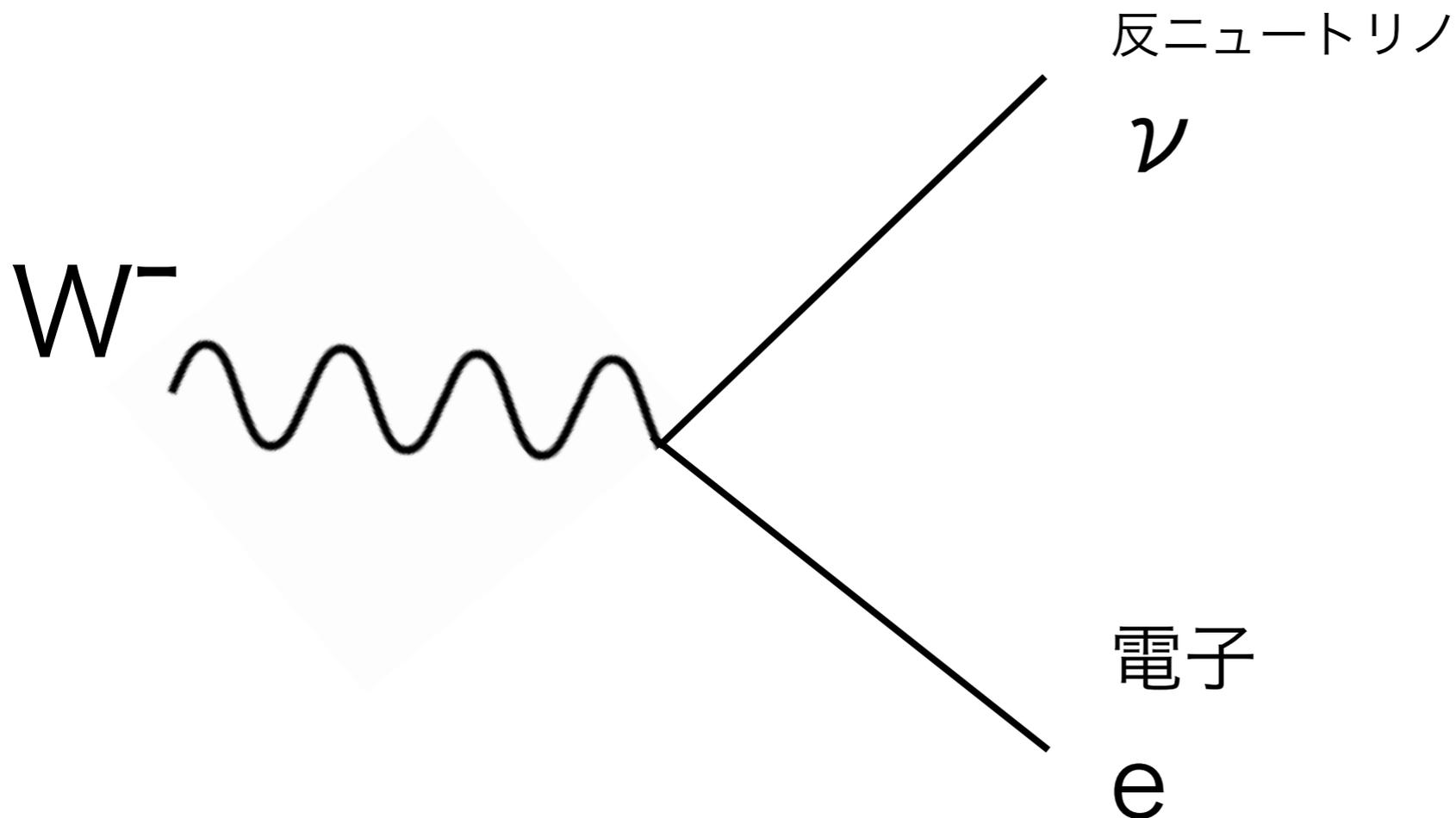
ν

W との相互作用で
ニュートリノが電子に化ける

標準模型

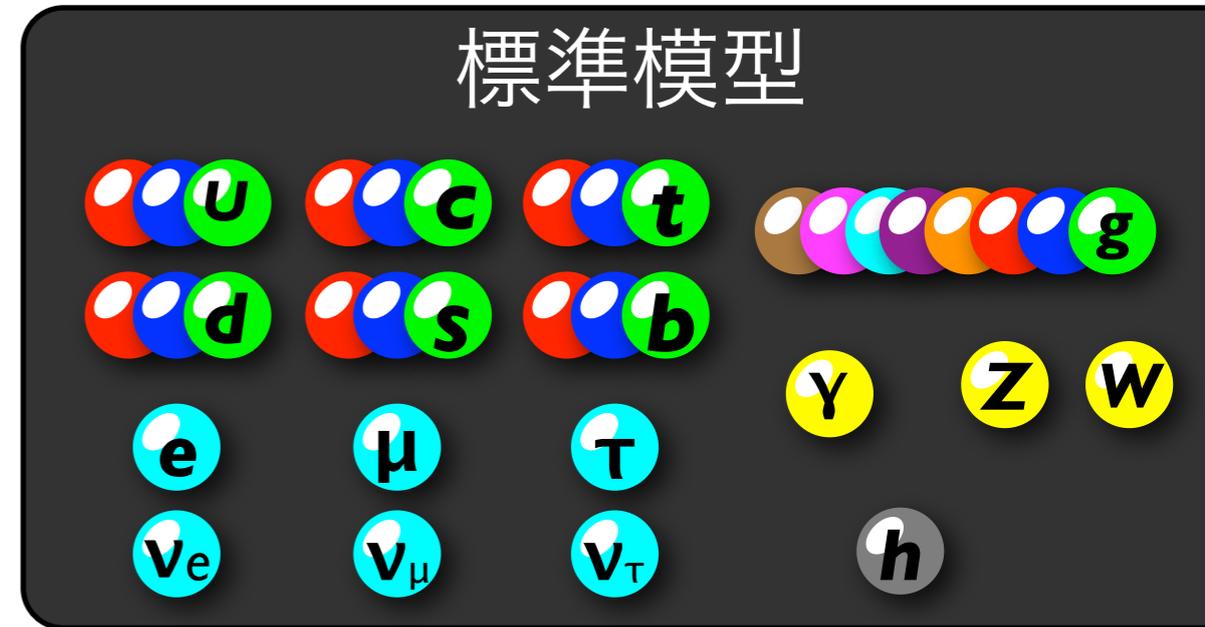
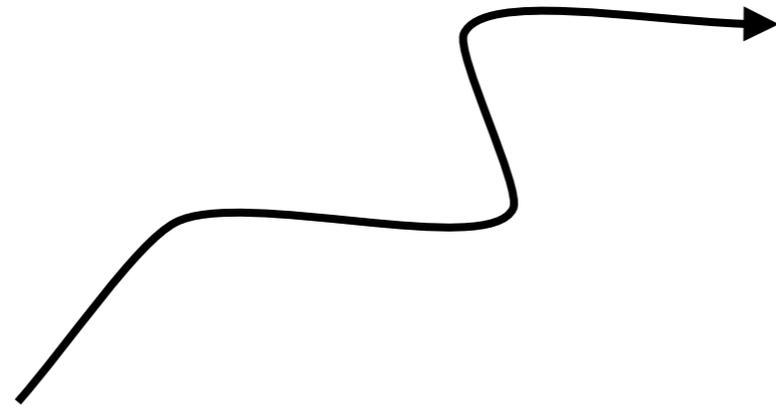


▶ 相互作用は粒子同士の散乱だけでなく「崩壊」も引き起こす。



W^- 粒子は電子と反ニュートリノに崩壊する

標準模型



※この中の ほとんどの粒子が通常見えないのは

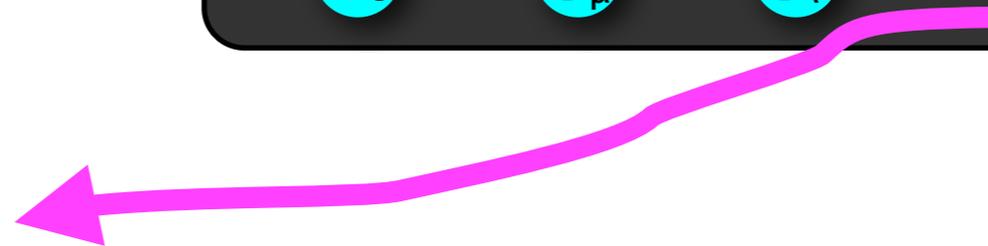
(1) 重すぎて通常の素粒子反応のエネルギーでは出来ないから

(2) 作られてもすぐに崩壊してしまうから

標準模型



▶ ヒッグスについて



標準模型



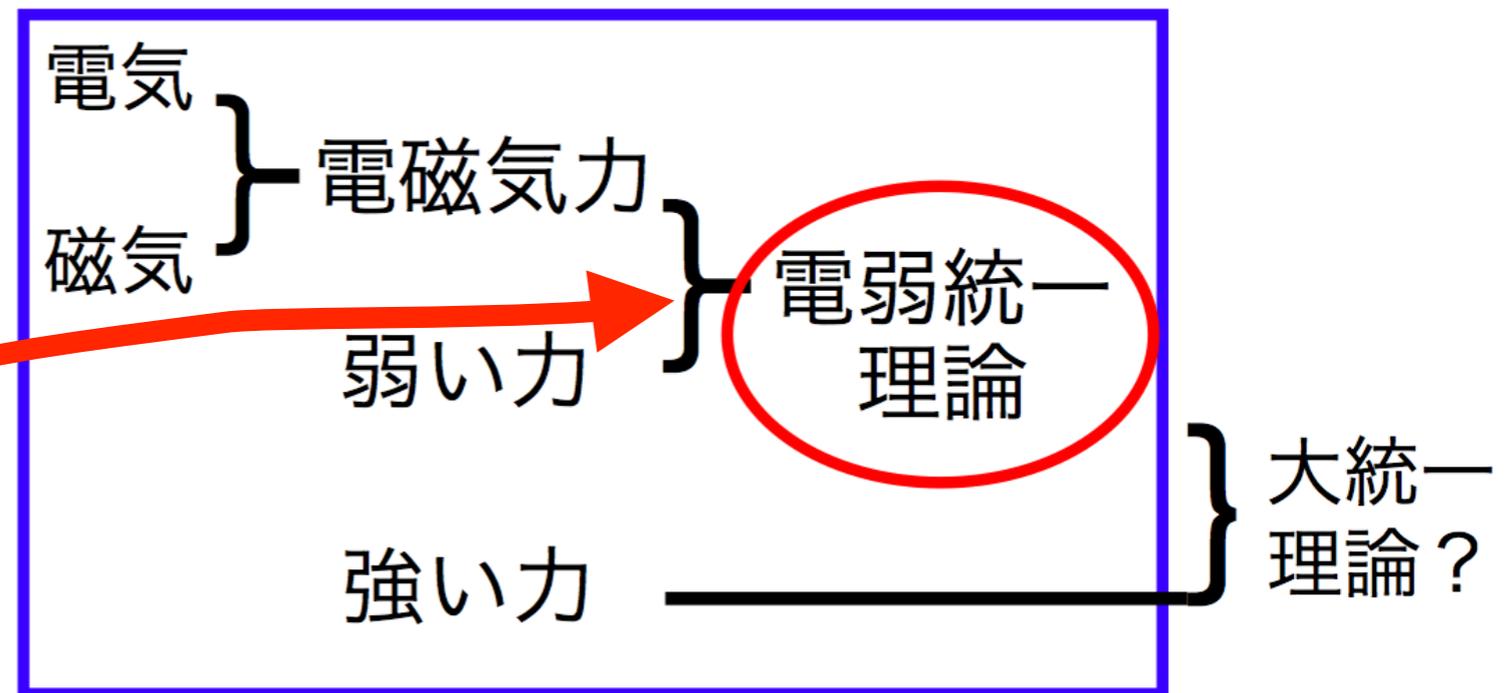
▶ ヒッグスについて

• 標準模型の要

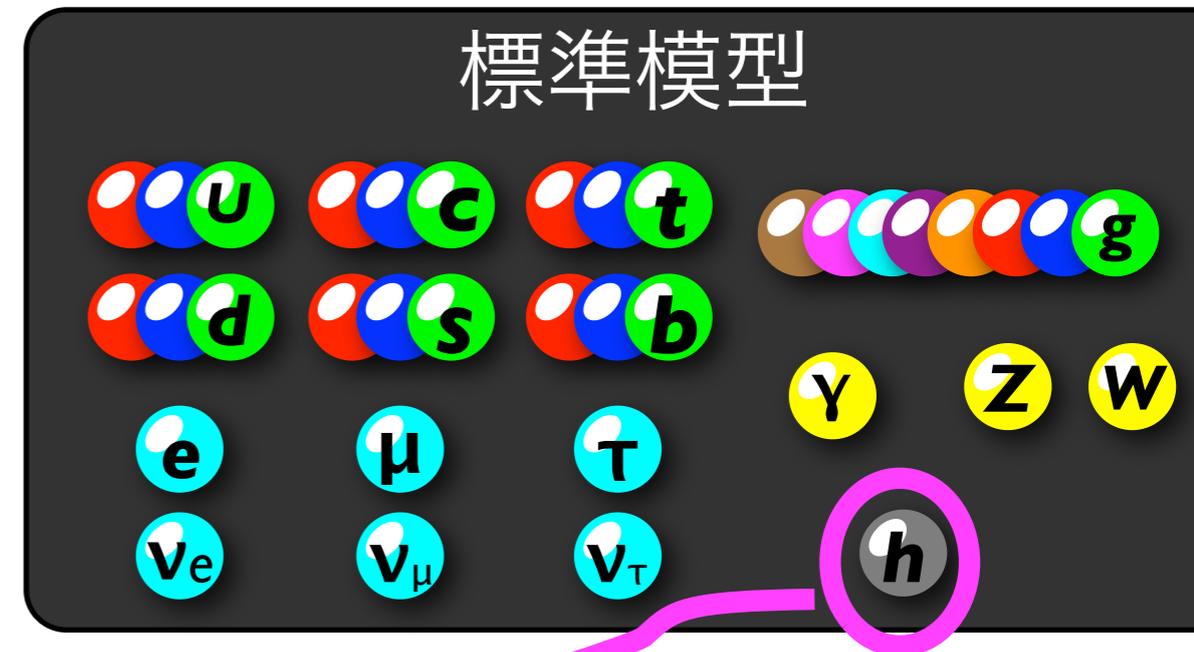
「ヒッグス場」による
「自発的対称性の破れ」が
電磁気力と弱い力の
統一の中心的役割を
果たしている

(詳細はココでは省きます・・・。)

素粒子の標準模型



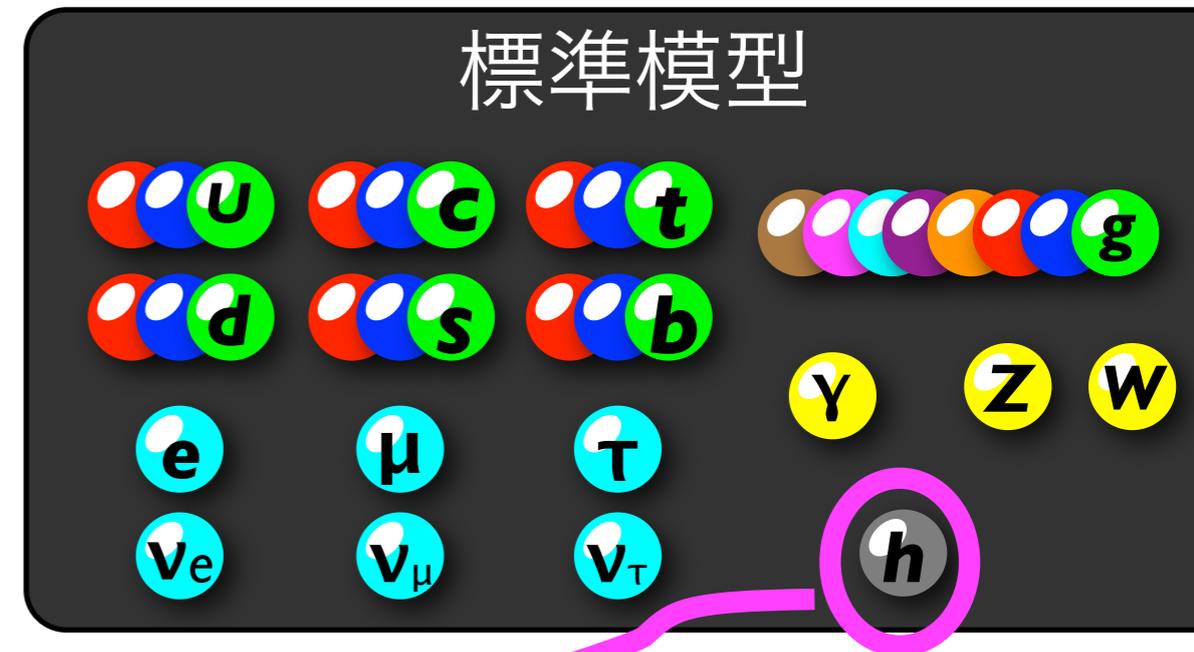
標準模型



▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

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：

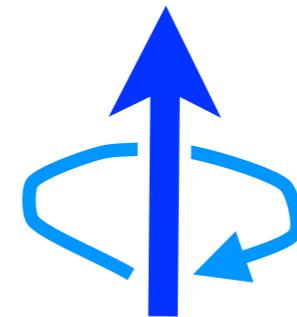
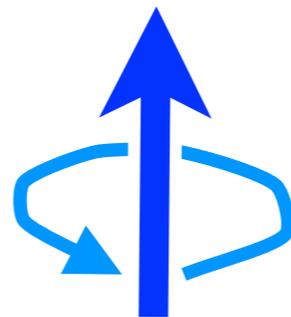
標準模型



▶ 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：実はヒッグスがいないと・・・

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：**実は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

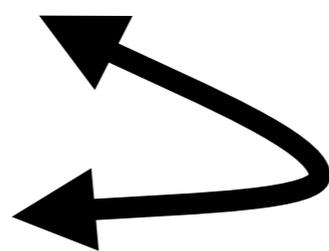
左巻き電子 e_L

(弱い相互作用する)

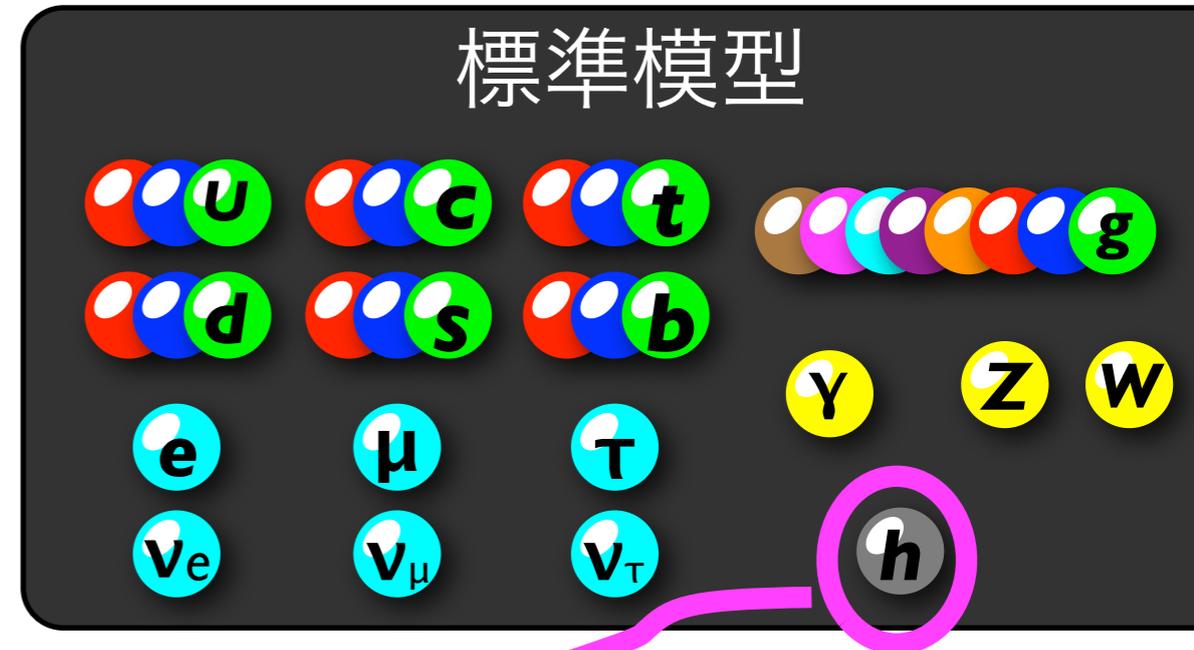
別々の粒子

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

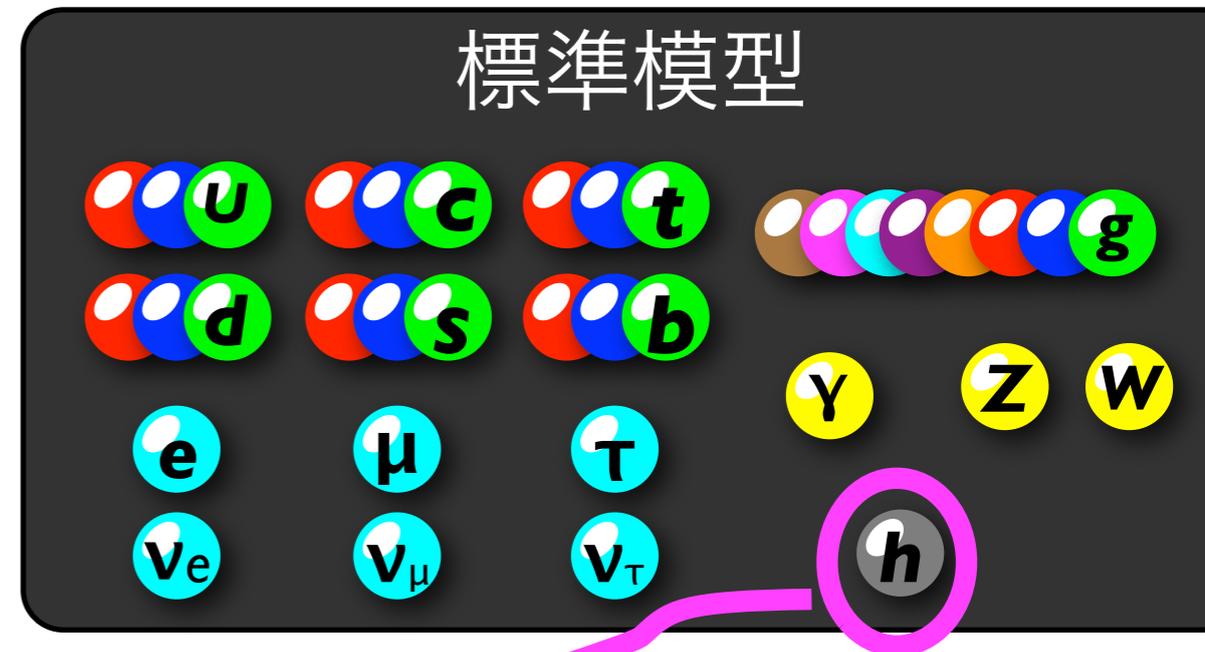
右巻きと左巻きがつながる

----- ヒッグス

(弱い相互作用する)

Yukawa 相互作用

標準模型

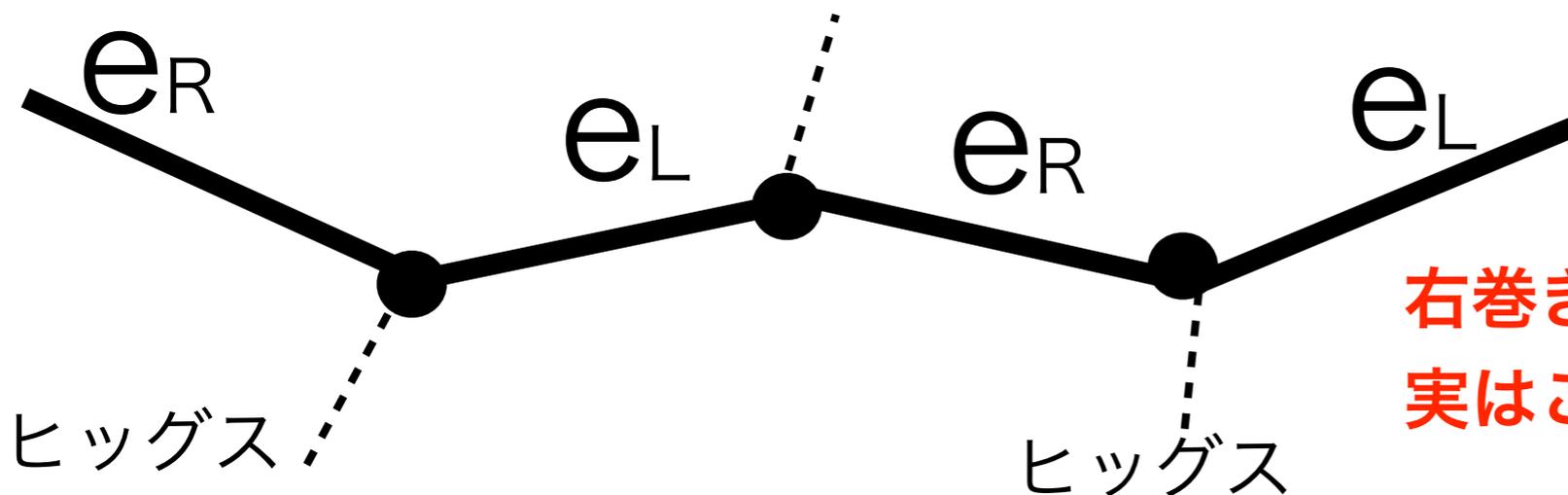


▶ ヒッグスについて

- 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



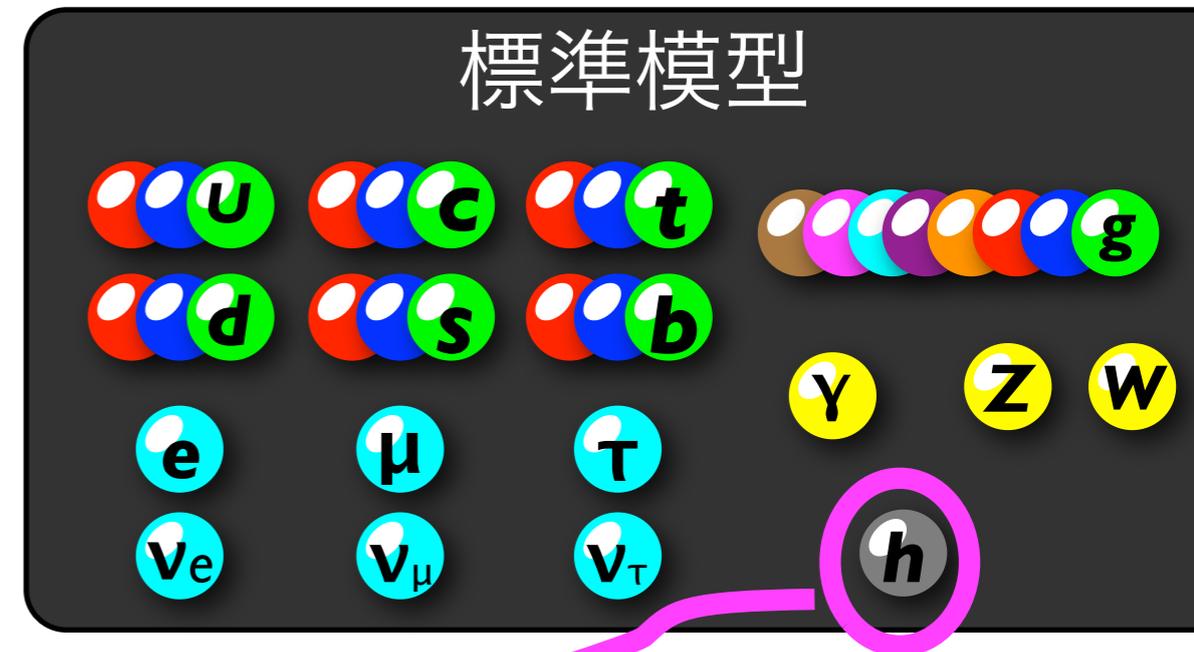
▶ 「ヒッグス場」

- 標準模型の要

- 全ての素粒子の質量の起源

▶ ヒッグス粒子：ヒッグス場に対応する素粒子

標準模型



▶ 「ヒッグス場」

- 標準模型の要
- 全ての素粒子の質量の起源

▶ ヒッグス粒子：ヒッグス場に対応する素粒子

→ とても重要な素粒子

ヒッグス粒子は

「標準模型」の最後の素粒子

「標準模型」 = 現在までに確立している
最先端の素粒子理論



ヒッグス粒子は

「標準模型」の最後の素粒子

「標準模型」 = 現在までに確立している
最先端の素粒子理論



じゃあヒッグス粒子の発見によって
究極の素粒子理論が完成したの??

・・・いや、まだ解けていない謎があるんです。

◆標準模型ここまで

◆ここから本題

標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

素粒子



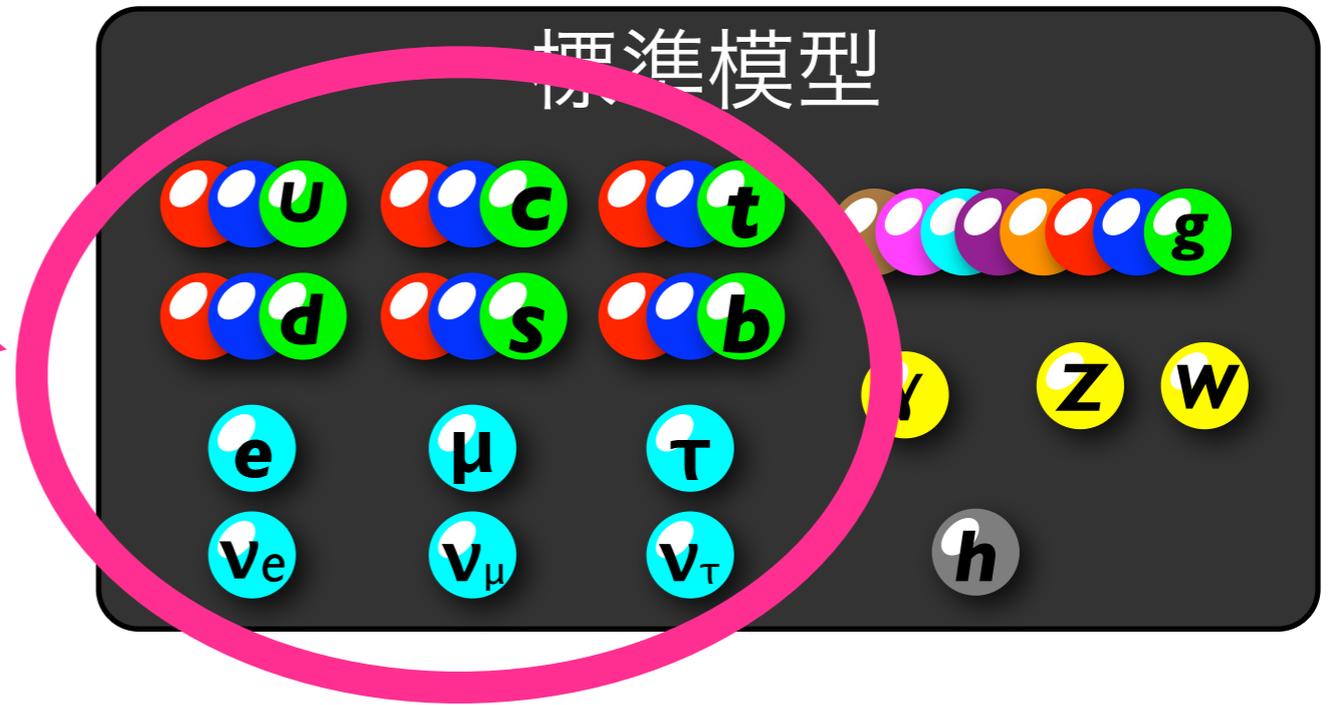
標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

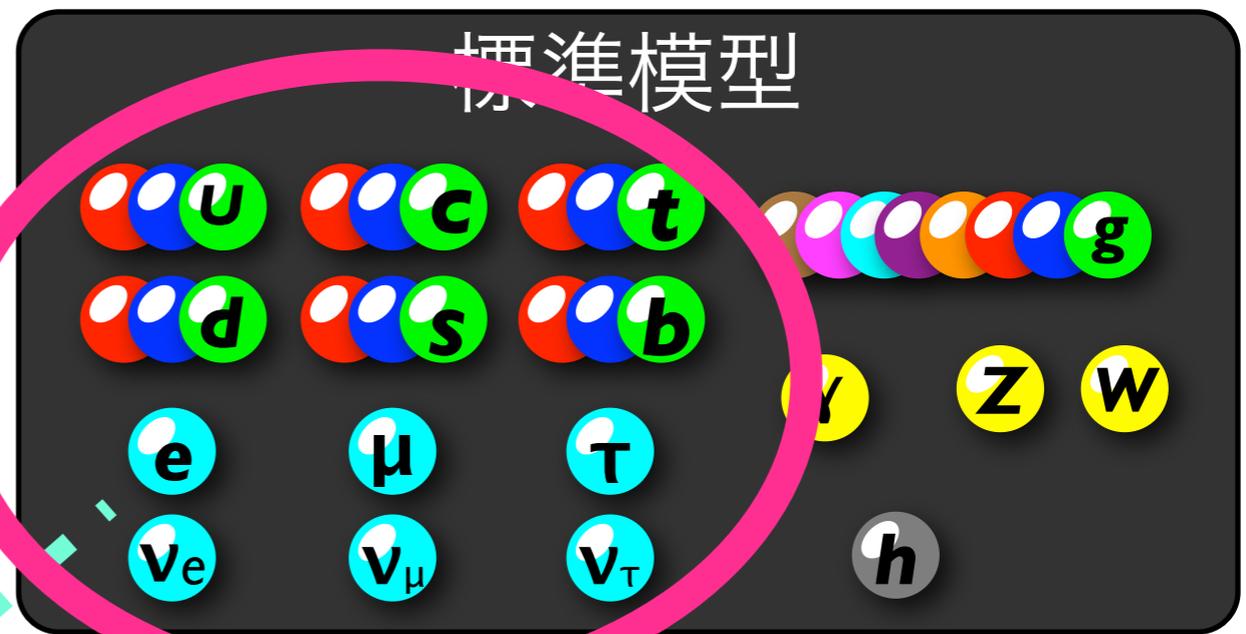
素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

こいつらの話



こいつらの話

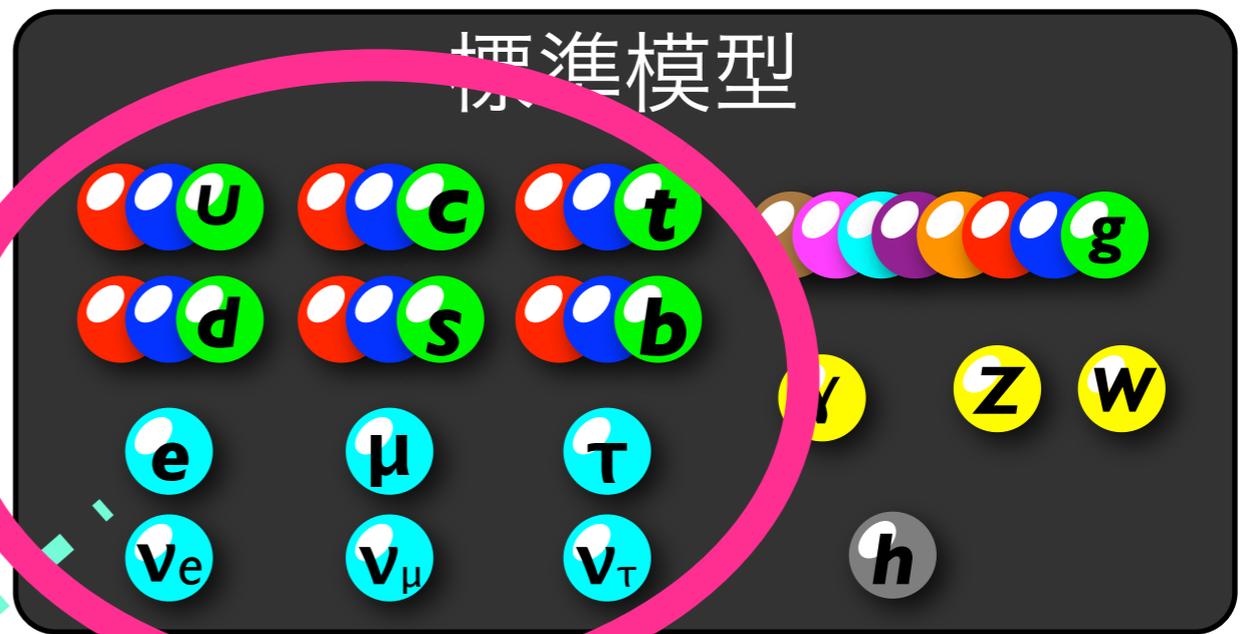


ヒッグスのところの電子の話を出すと・・・

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

(弱い相互作用しない) (弱い相互作用する)

こいつらの話



ヒッグスのところの電子の話を出すと・・・

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

(弱い相互作用しない) (弱い相互作用する)

The diagram shows two blue arrows pointing upwards. Each arrow has a circular arrow around it, indicating the direction of spin. The left arrow is labeled '右巻き' (right-handed) and the right arrow is labeled '左巻き' (left-handed).

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)

$$\begin{pmatrix} \text{u} \\ \text{d} \end{pmatrix}_L$$

$(3, 2)_{+1/6}$

$$\text{u}_R$$

$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$

$$\text{d}_R$$

$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$

$$\begin{pmatrix} \text{e} \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$$

$(1, 2)_{-1/2}$

$$\text{e}_R$$

$(1, 1)_{+1}$

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)

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

$(3, 2)_{+1/6}$

$$u_R$$

$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$

$$d_R$$

$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$$

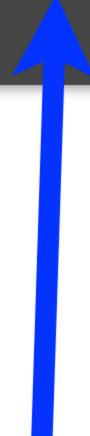
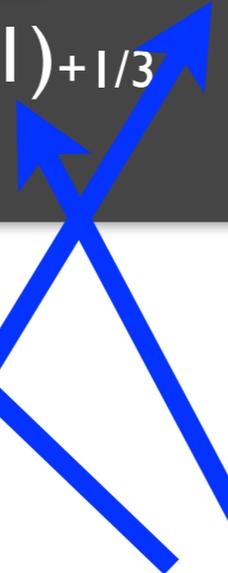
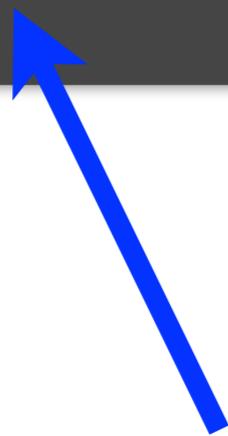
$(1, 2)_{-1/2}$

$$e_R$$

$(1, 1)_{+1}$

弱い力を受ける

弱い力を受けない



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)

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

$(3, 2)_{+1/6}$

$$u_R$$

$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$

$$d_R$$

$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$$

$(1, 2)_{-1/2}$

$$e_R$$

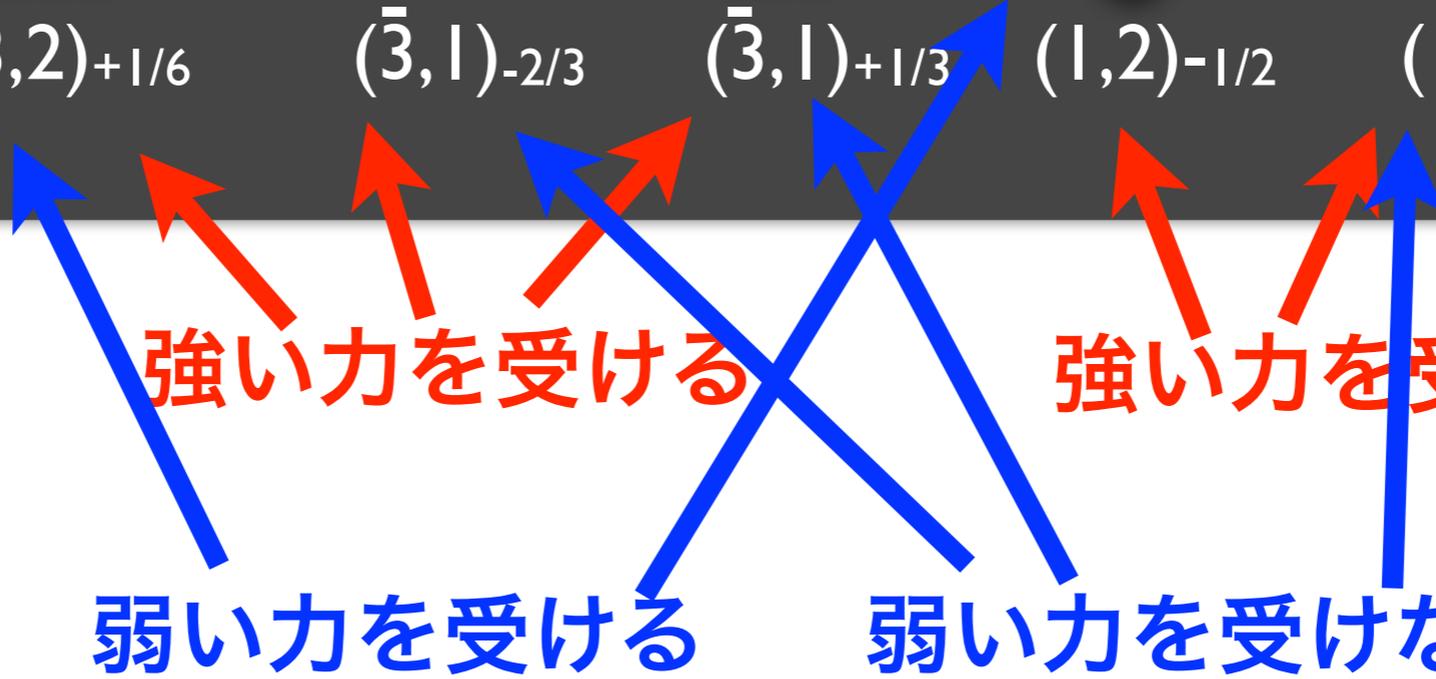
$(1, 1)_{+1}$

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



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)

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

$$(3, 2)_{+1/6}$$

$$u_R$$

$$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$$

$$d_R$$

$$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$$

$$(1, 2)_{-1/2}$$

$$e_R$$

$$(1, 1)_{+1}$$

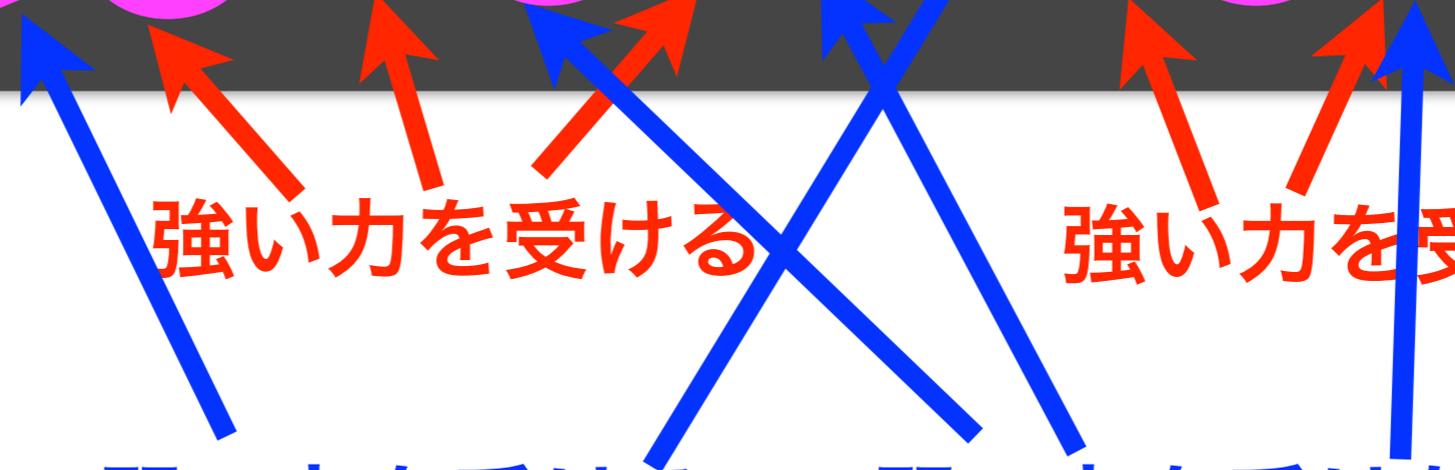
電弱ハイパー電荷
(電荷みたいなもの)

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



左巻き
クォーク

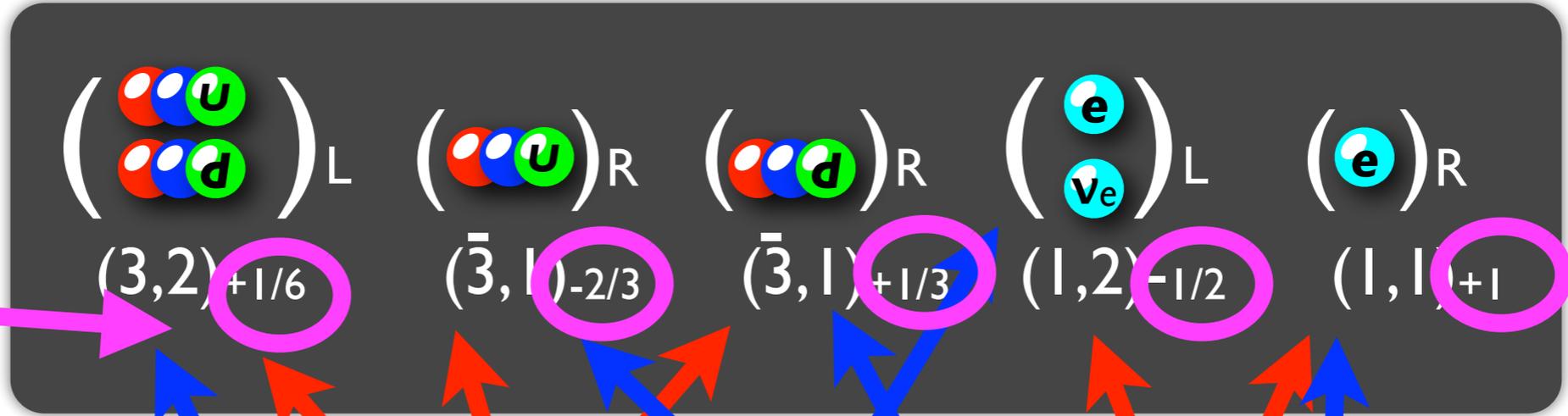
右巻き
アップクォーク

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！

左巻き
クォーク

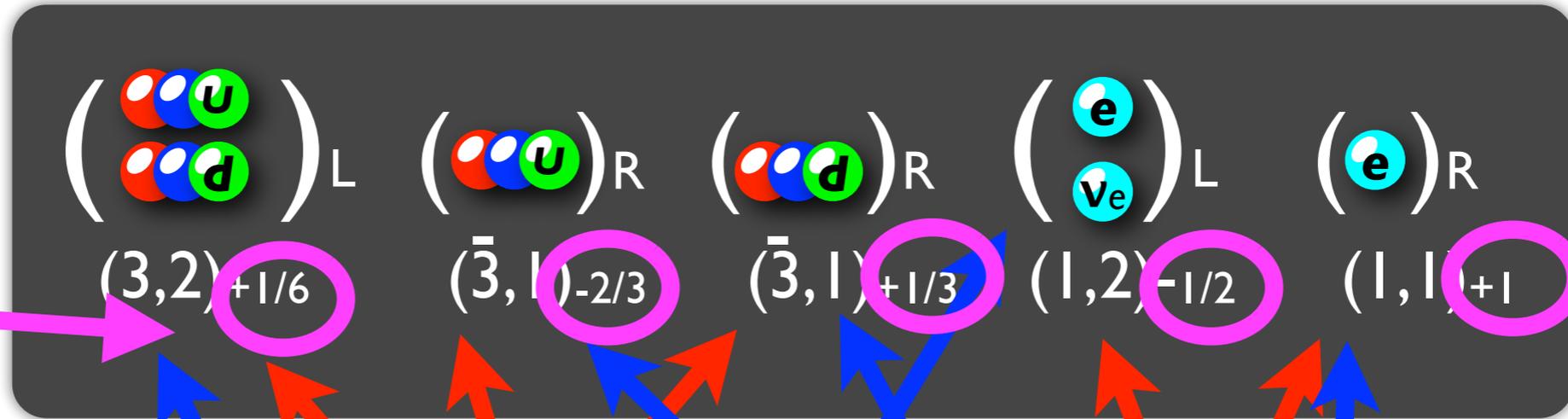
右巻き
アップクォーク

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

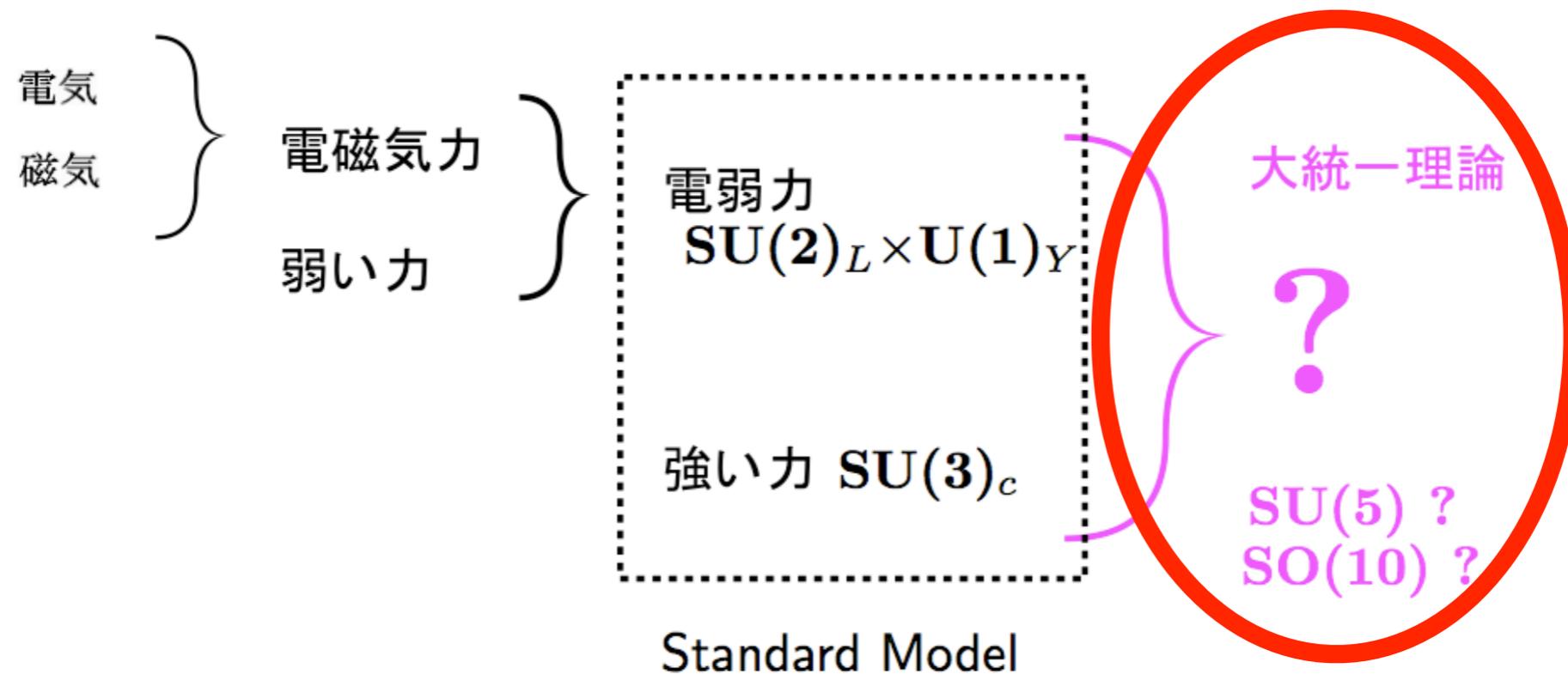
・・・なんかバラバラ！

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

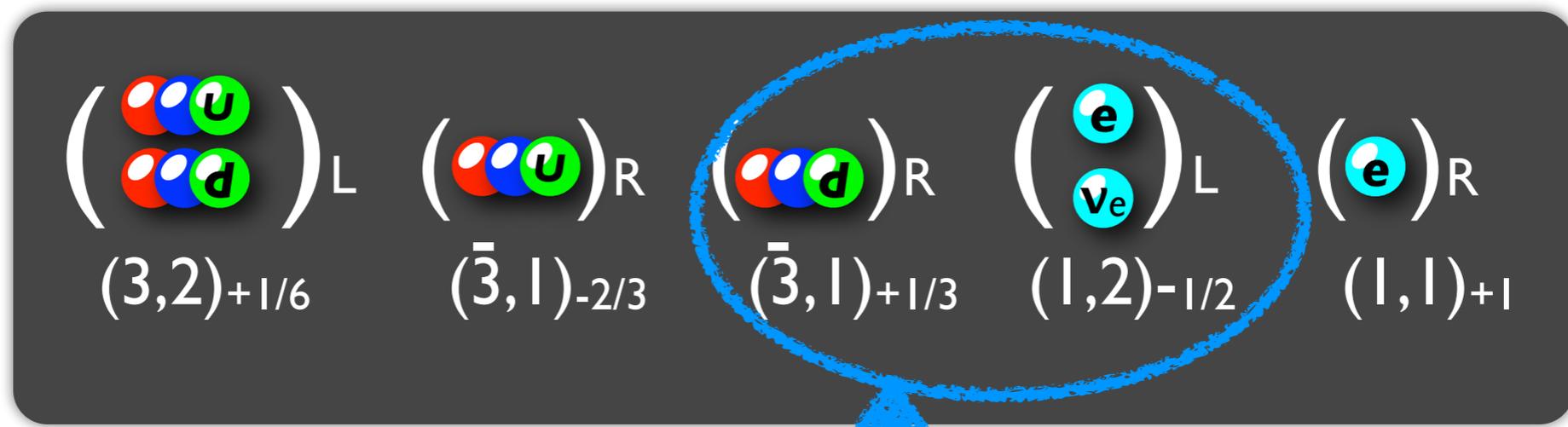
大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)

[Georgi, Glashow 1974]

謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

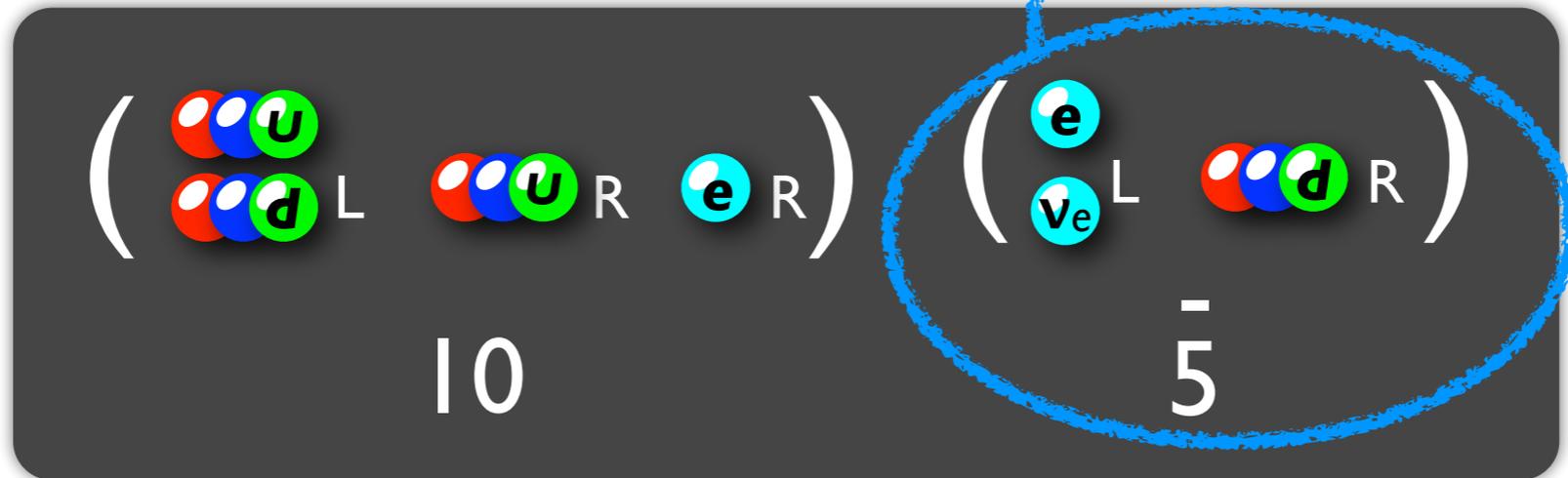
統一的に理解出来ないのか??

標準模型ではクォーク・レプトンはバラバラ



$$1/3 + 1/3 + 1/3 - 1/2 - 1/2 = 0$$

大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)



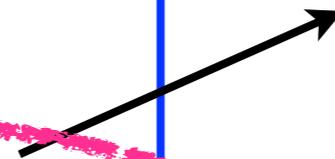
[Georgi, Glashow 1974]

標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数



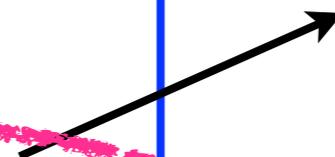
標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

大統一理論

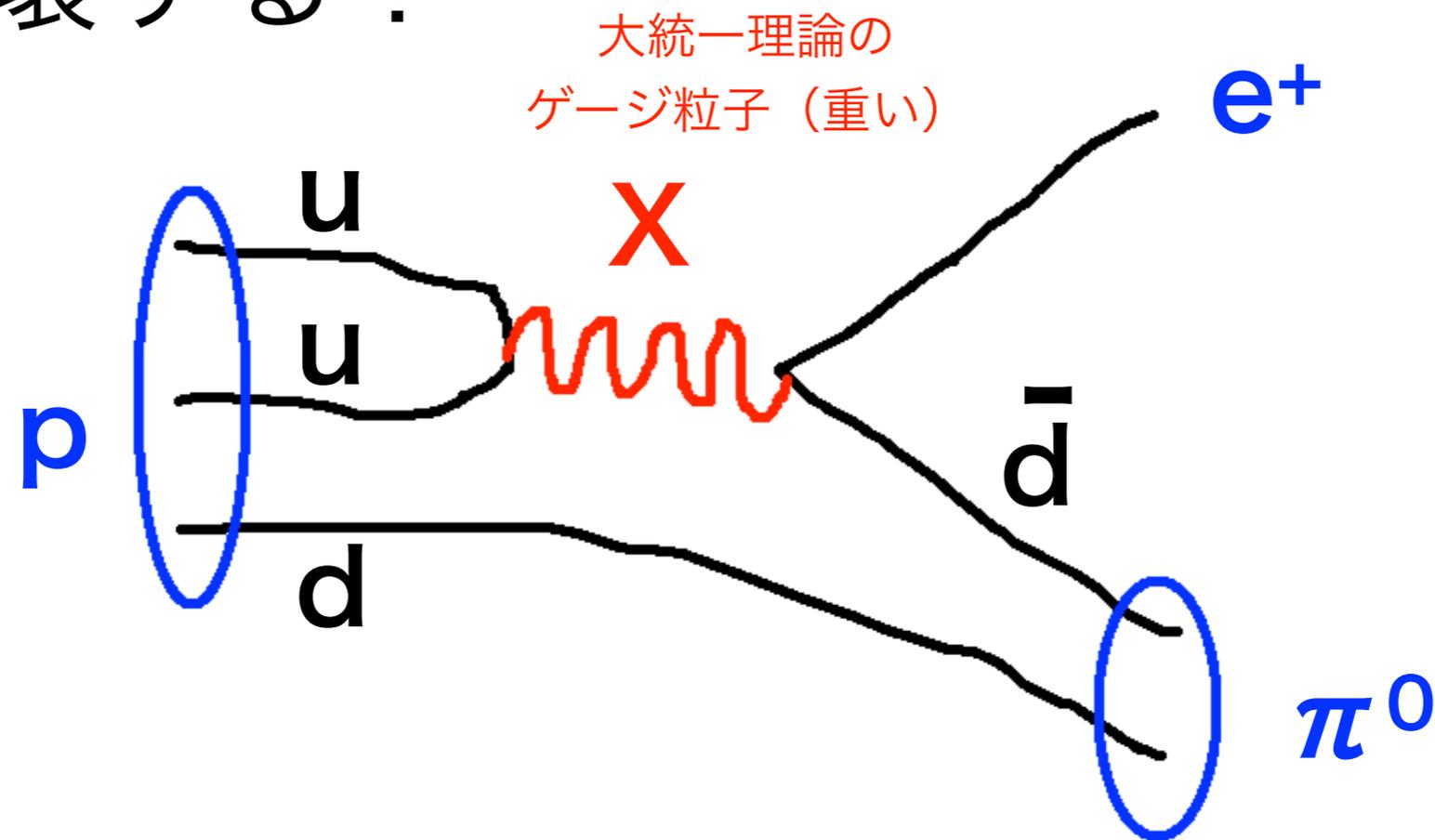


「大統一理論」の予言は？

「大統一理論」の予言は？

予言① もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

陽子が崩壊する！



でも寿命の予言は大統一理論の模型によって大きく異なります。

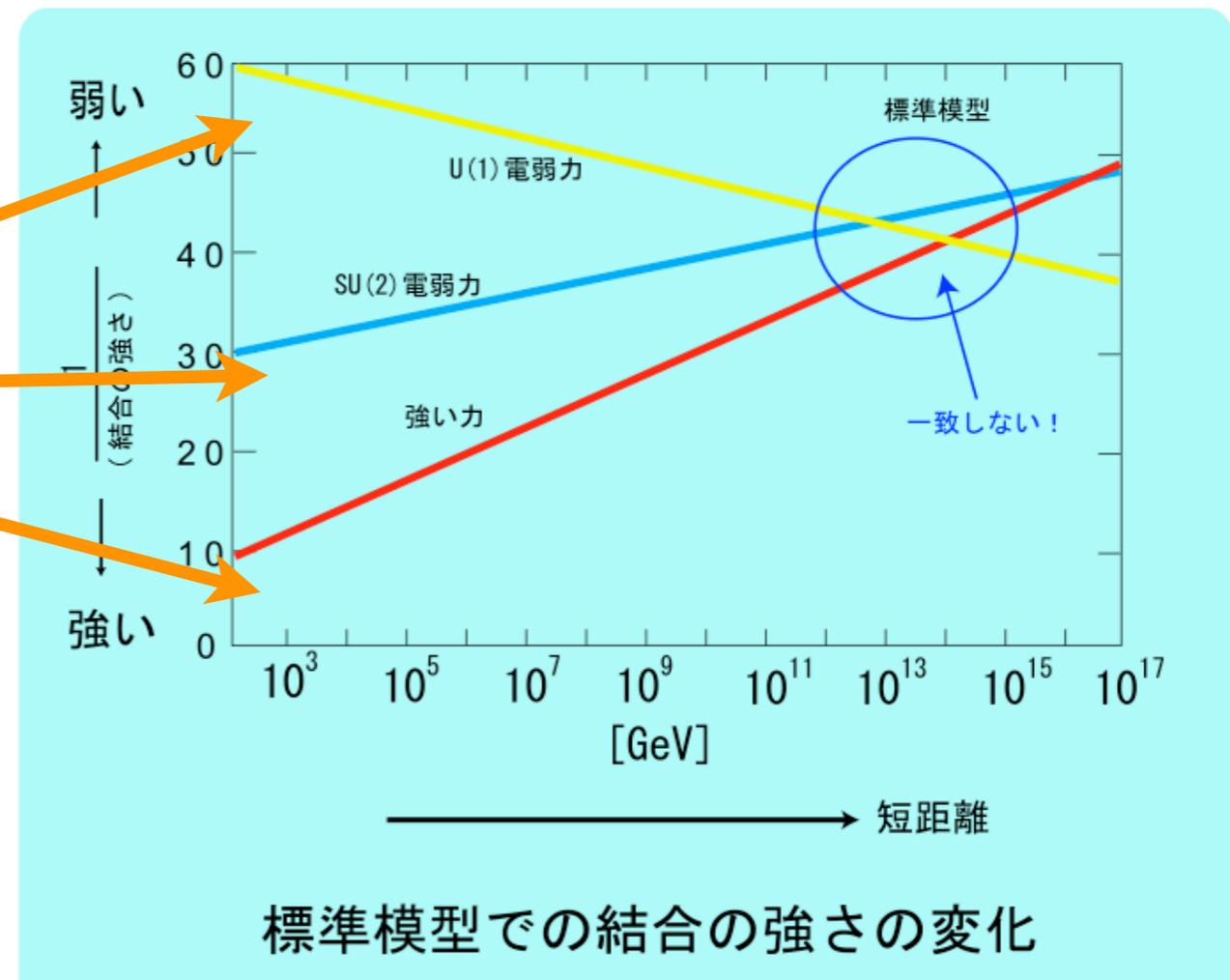
~~(理論屋さんは好き勝手なこと言うので・・・)~~

「大統一理論」の予言は？

予言② もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致する。

3つの力

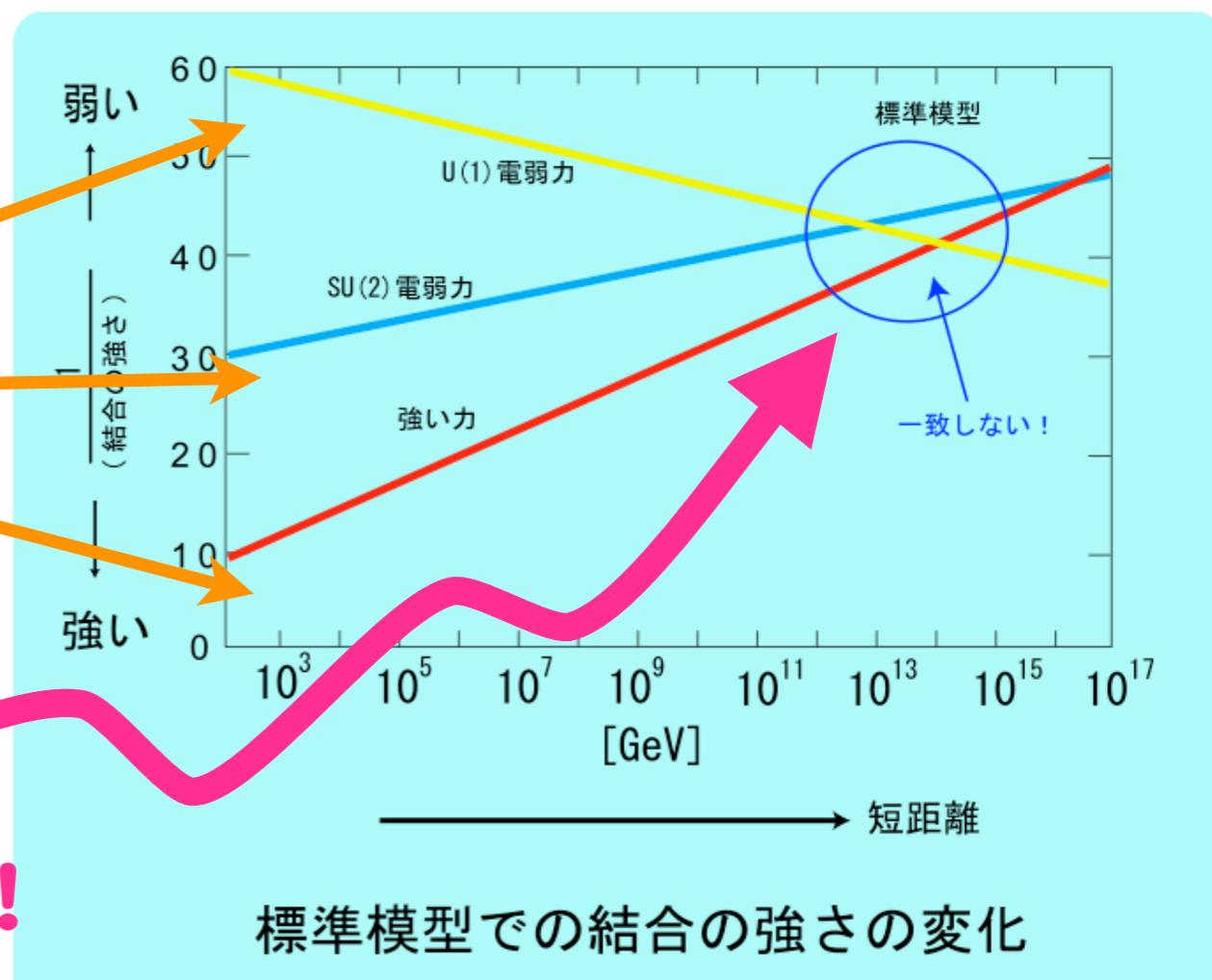


「大統一理論」の予言は？

予言② もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致する。

3つの力



よく見るとちゃんと一致してない！

・・・これについては後ほど。

陽子崩壊 ?!

大統一理論

標準模型を超える物理の動機 / ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

次は . . .

陽子崩壊 ?!

大統一理論

標準模型を超える物理の動機 / ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

小さなニュートリノ質量

次は・・・

謎：ニュートリノの質量

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

$$u_R \quad (\bar{3}, 1)_{-2/3}$$

$$d_R \quad (\bar{3}, 1)_{+1/3}$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L \quad (1, 2)_{-1/2}$$

$$e_R \quad (1, 1)_{+1}$$

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

謎：ニュートリノの質量

The diagram shows five fermion representations in a dark grey rounded rectangle. Each representation consists of a column of colored spheres (red, blue, green, or cyan) inside a large parenthesis, followed by a subscript (L or R) and a quantum number. Below each representation is its name in Japanese. A red arrow points from the text below to the left-handed neutrino representation.

Representation	Quantum Number	Label
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$(3, 2)_{+1/6}$	左巻き クォーク
u_R	$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$	右巻き アップクォーク
d_R	$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$	右巻き ダウンクォーク
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$(1, 2)_{-1/2}$	左巻き レプトン
e_R	$(1, 1)_{+1}$	右巻き レプトン

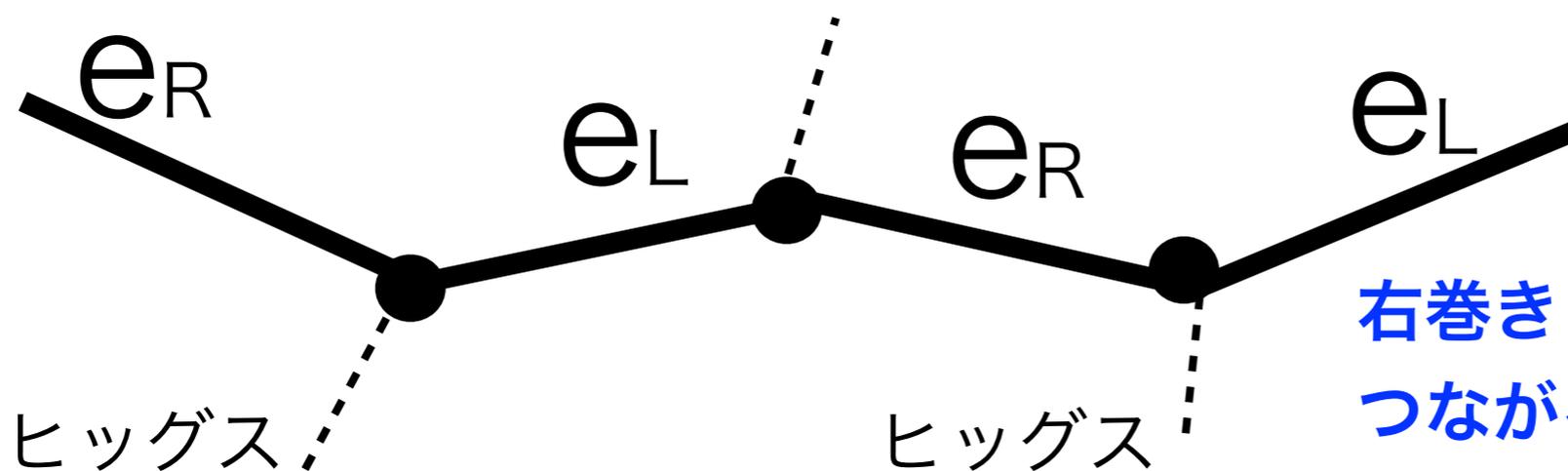
よく見るとニュートリノは左巻きしかない

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

再びヒッグスのところの電子の話を出すと・・・



右巻きと左巻きがヒッグスでつながることで「質量」を得る。

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
質量を持ってない！（質量ゼロ）

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、

ニュートリノは質量を持っている！



Ill: N. Elmehed. © Nobel Media 2015

2015 Nobel Prize
in Physics

謎：ニュートリノの質量

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

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

解決方法は . . .

謎：ニュートリノの質量

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

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

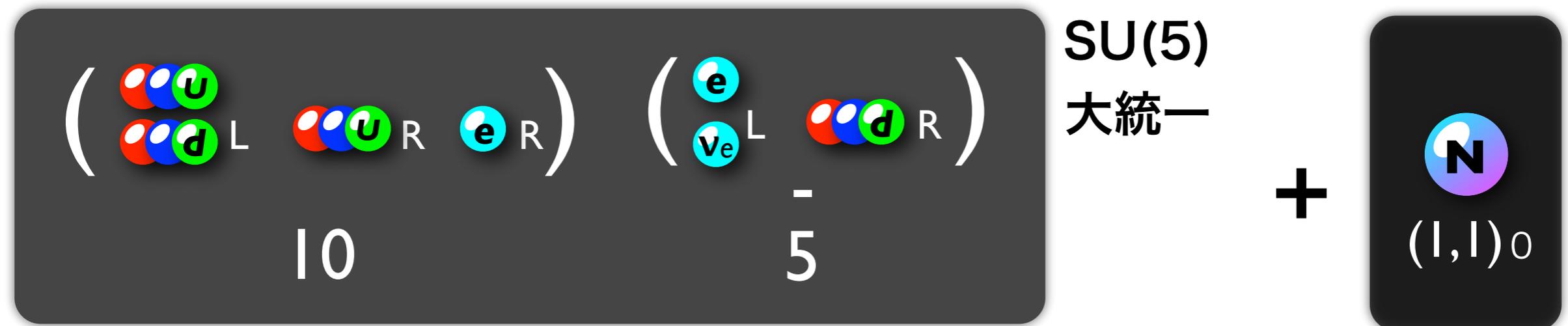
解決方法は・・・

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



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

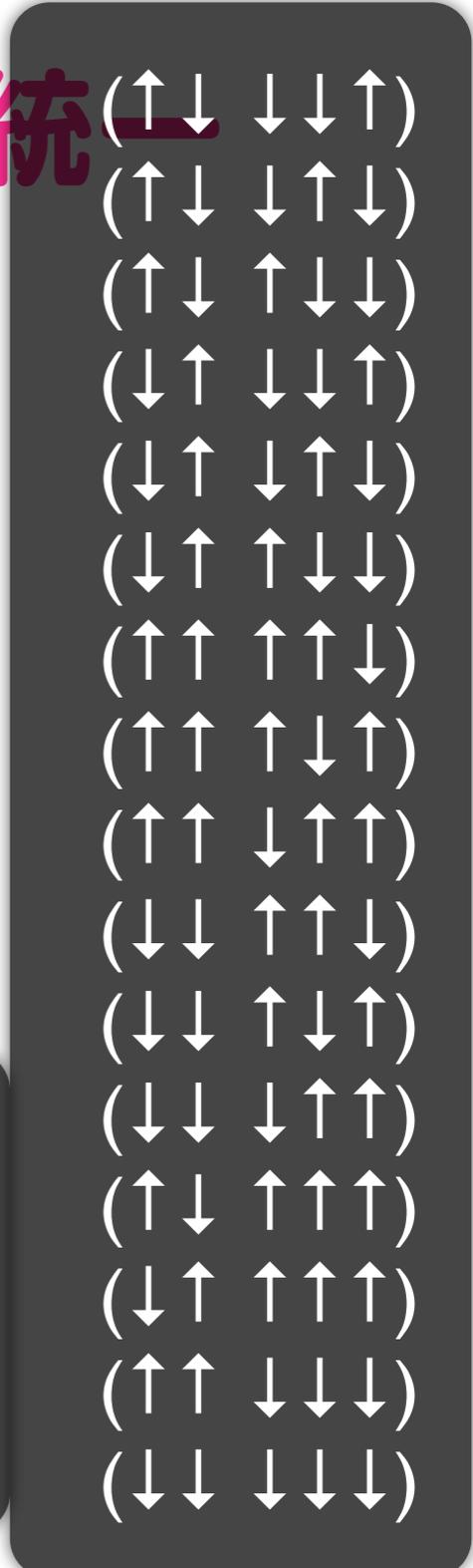
全てのクォーク
レプトンが統一！

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

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

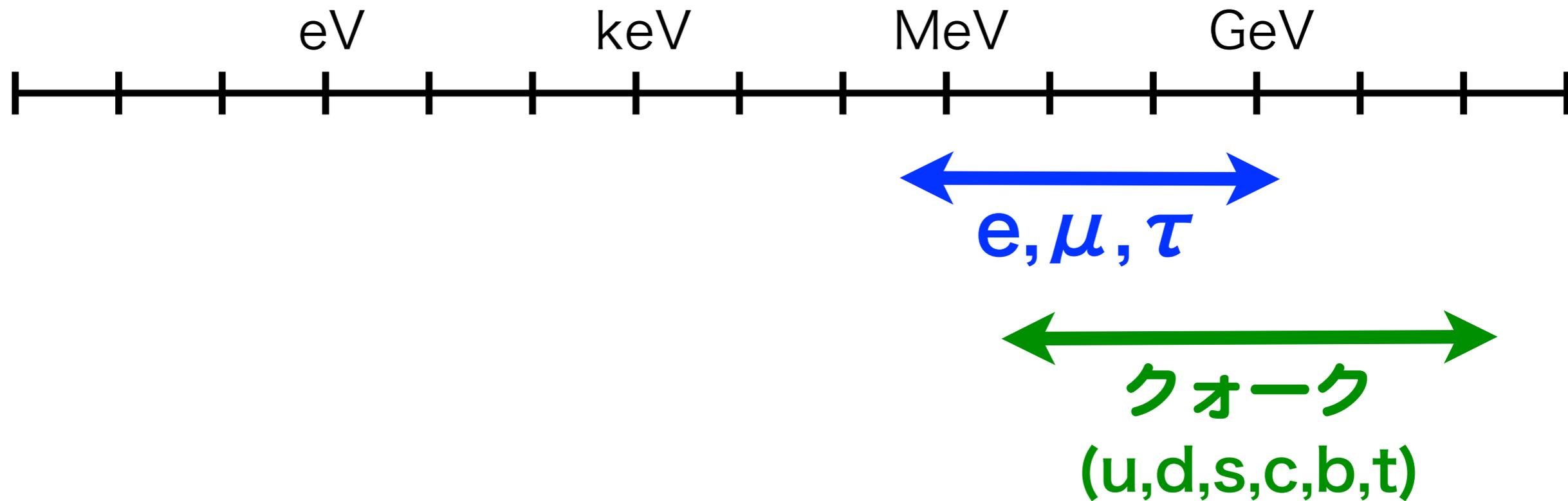
16



右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

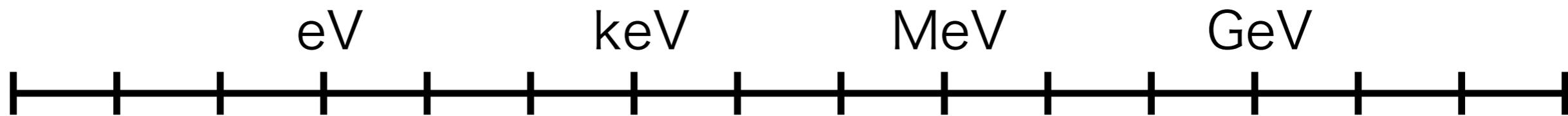
クォーク、レプトンの質量



右巻きニュートリノ、実はすごい

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

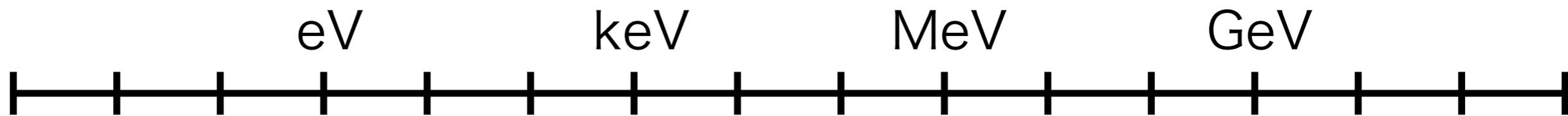


クォーク
(u,d,s,c,b,t)

右巻きニュートリノ、実はすごい

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)



・・・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

② 小さなニュートリノ質量を説明

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

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

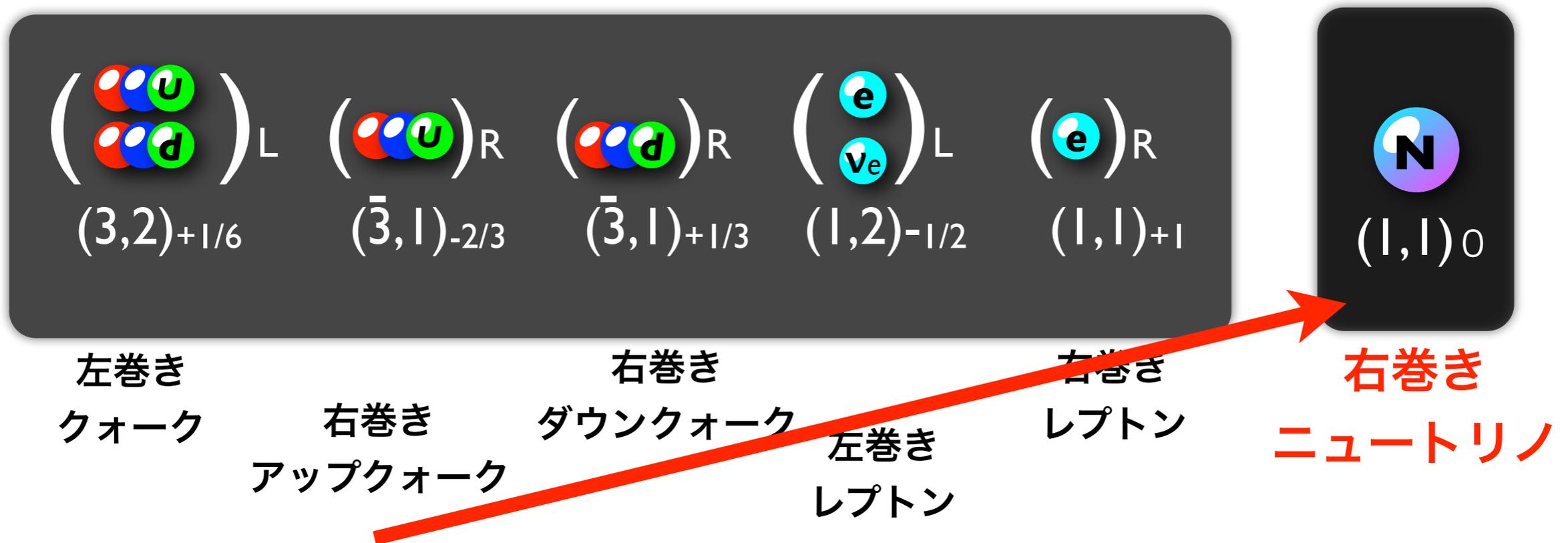
左巻き
レプトン

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、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

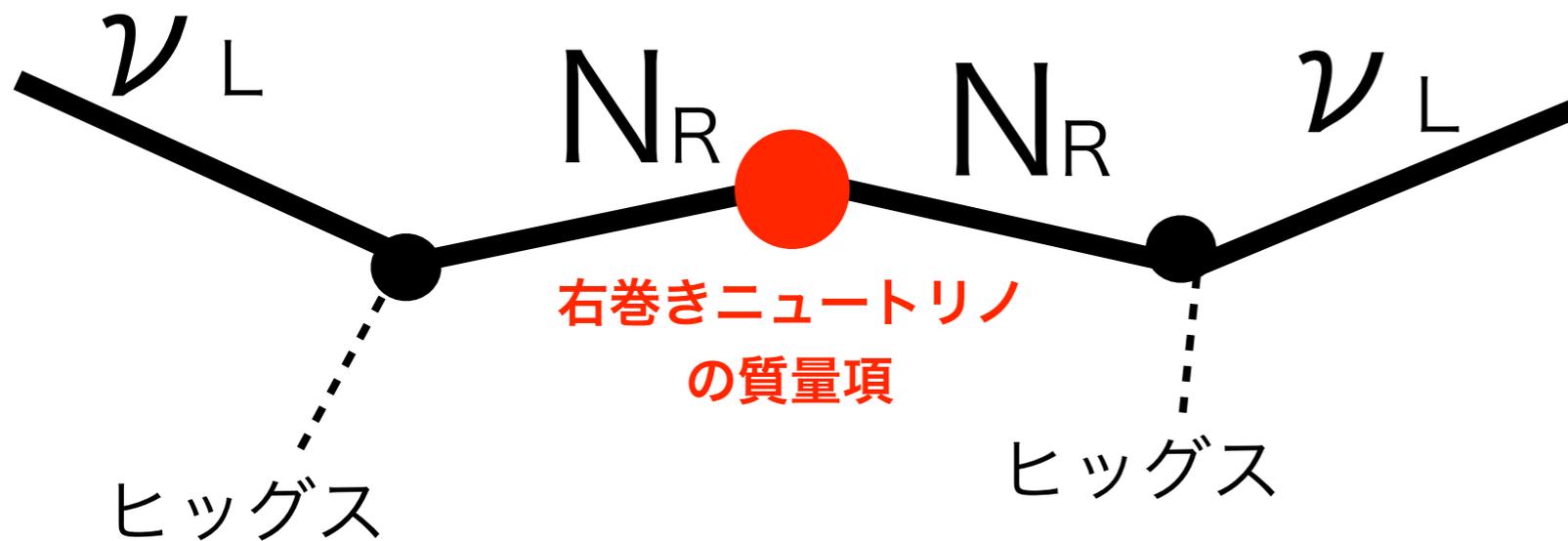


実はこいつだけ特別！ 電磁気・弱い力・強い力どれとも反応しない。

- 電荷を全く持ってない。
- 自分自身の反粒子になれる。
- 自分だけで質量を持てる！

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

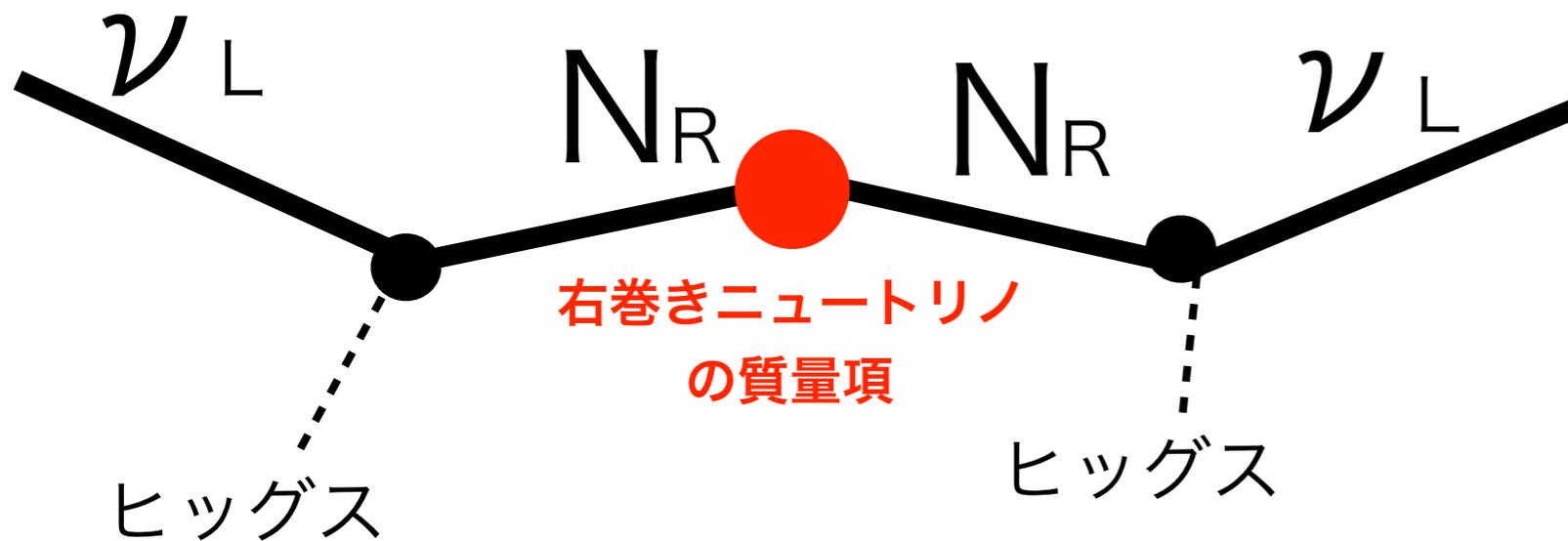


$$\text{(振動実験とかで見える) ニュートリノ質量} = \frac{\text{(他のクォークやレプトンの質量くらい)}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量}}$$

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)
(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



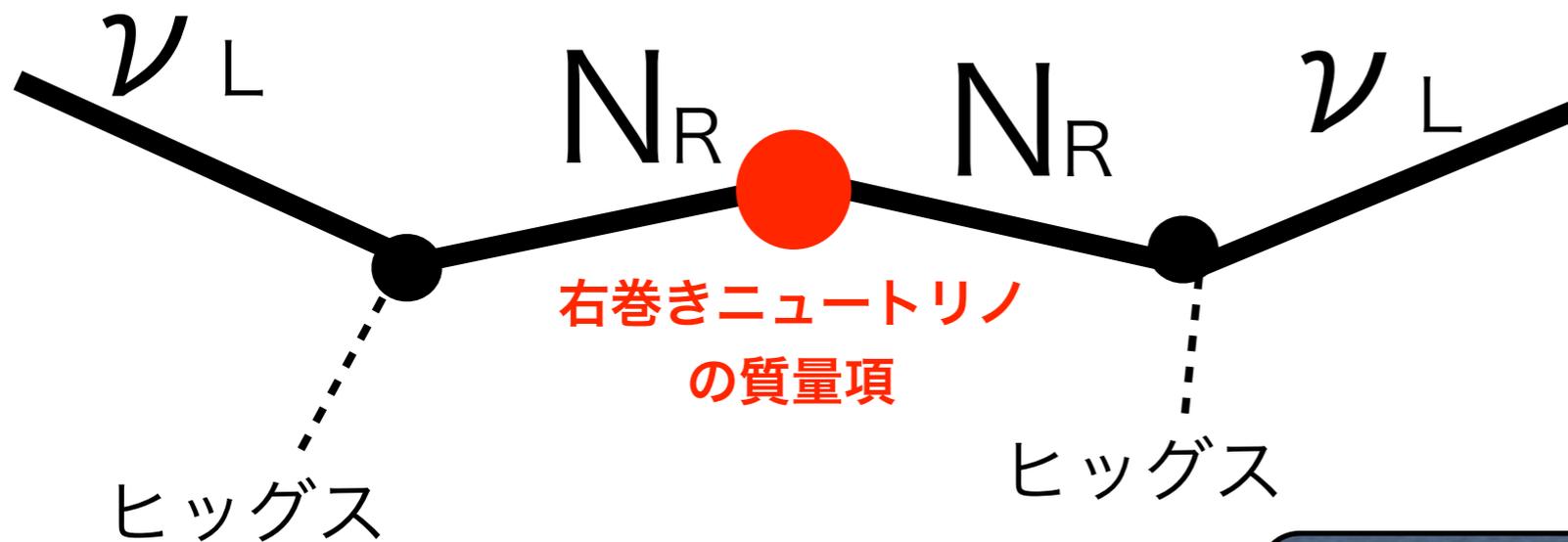
$$\text{(振動実験とかで見える) ニュートリノ質量} = \frac{\text{(他のクォークやレプトンの質量くらい)}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量}}$$

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



e.g. 100 GeV

(振動実験とかで見える)
ニュートリノ質量

=

(他のクォークやレプトンの質量くらい)²

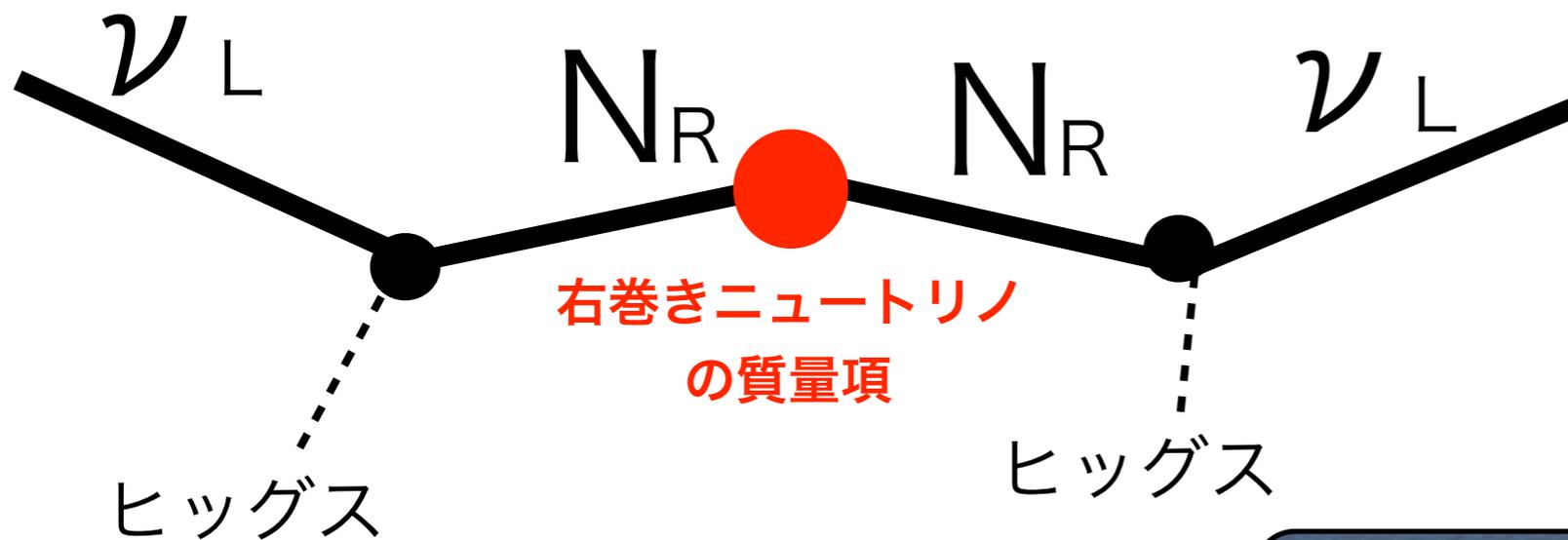
右巻きニュートリノ質量

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



e.g. 100 GeV

(振動実験とかで見える)
ニュートリノ質量

=

(他のクォークやレプトンの質量くらい)²

右巻きニュートリノ質量

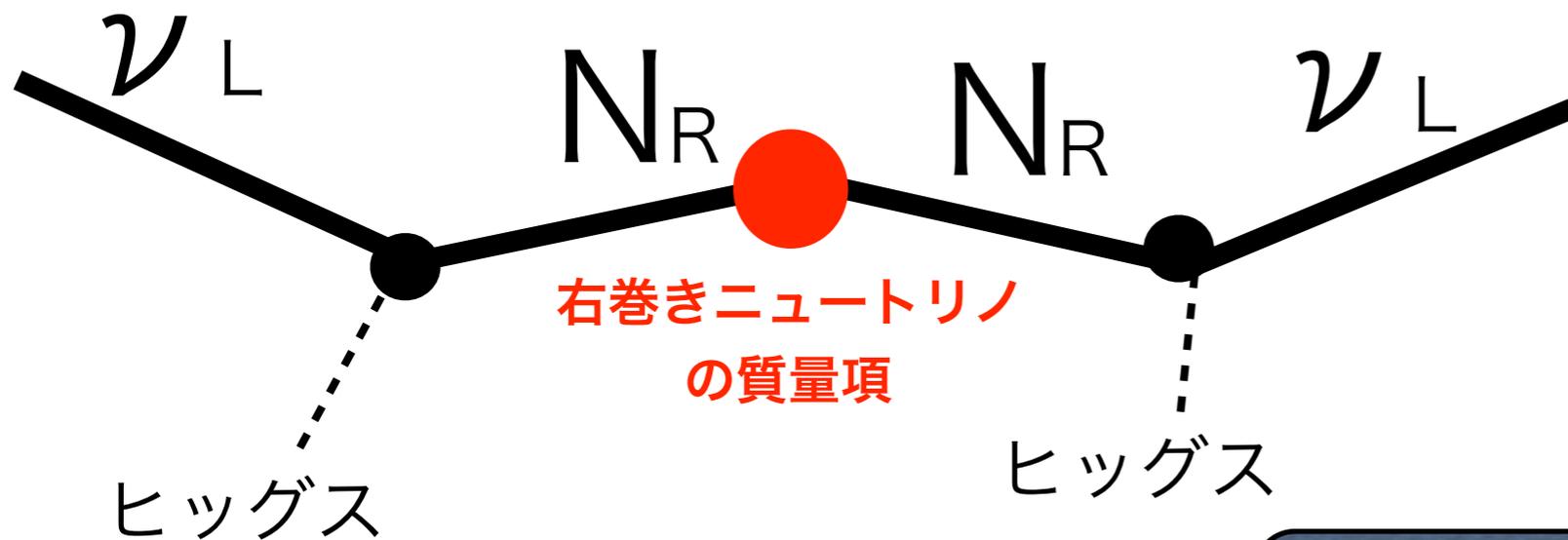
e.g. 10¹⁵ GeV

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



e.g. 100 GeV

(他のクォークやレプトンの質量くらい)²

(振動実験とかで見える)

ニュートリノ質量

0.01 eV

右巻きニュートリノ質量

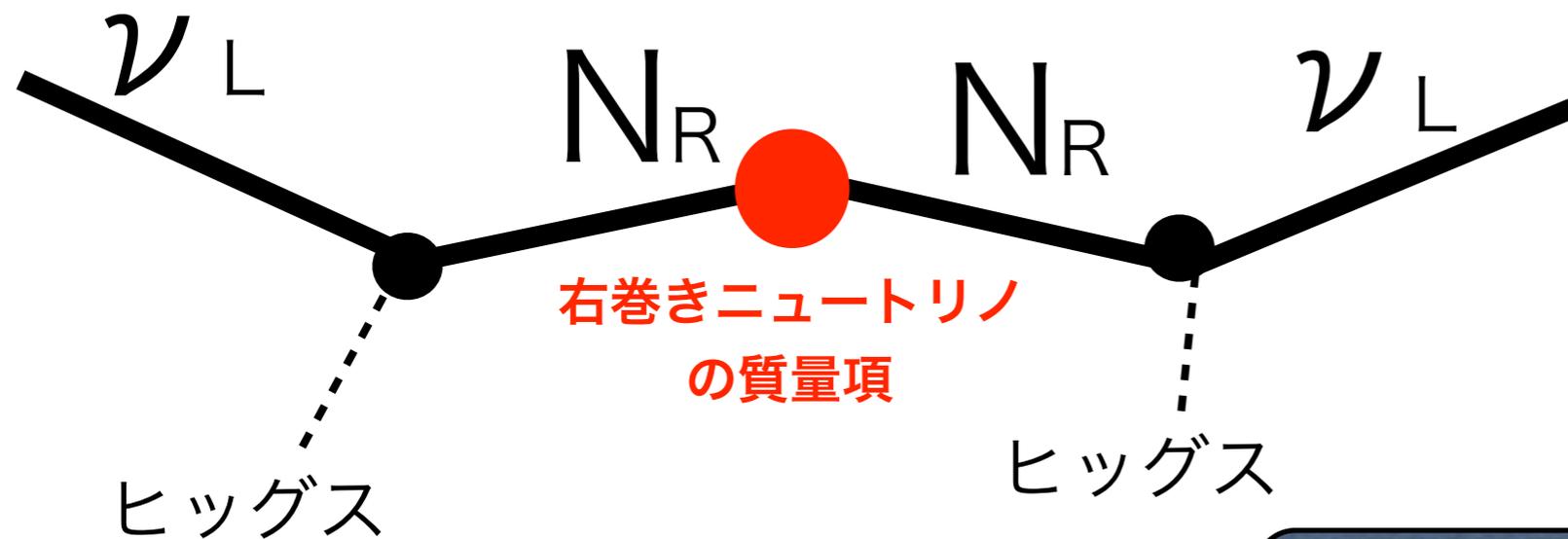
e.g. 10¹⁵ GeV

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



このときニュートリノはマヨラナになる
→ $0\nu\beta\beta$ 崩壊!!

e.g. 100 GeV

(他のクォークやレプトンの質量くらい)²

(振動実験とかで見える)

ニュートリノ質量

0.01 eV

右巻きニュートリノ質量

e.g. 10^{15} GeV

右巻き ν : 重い → 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

③ 宇宙の物質 > 反物質を . . .

. . . これについては後ほど。

陽子崩壊 ?!

大統一理論

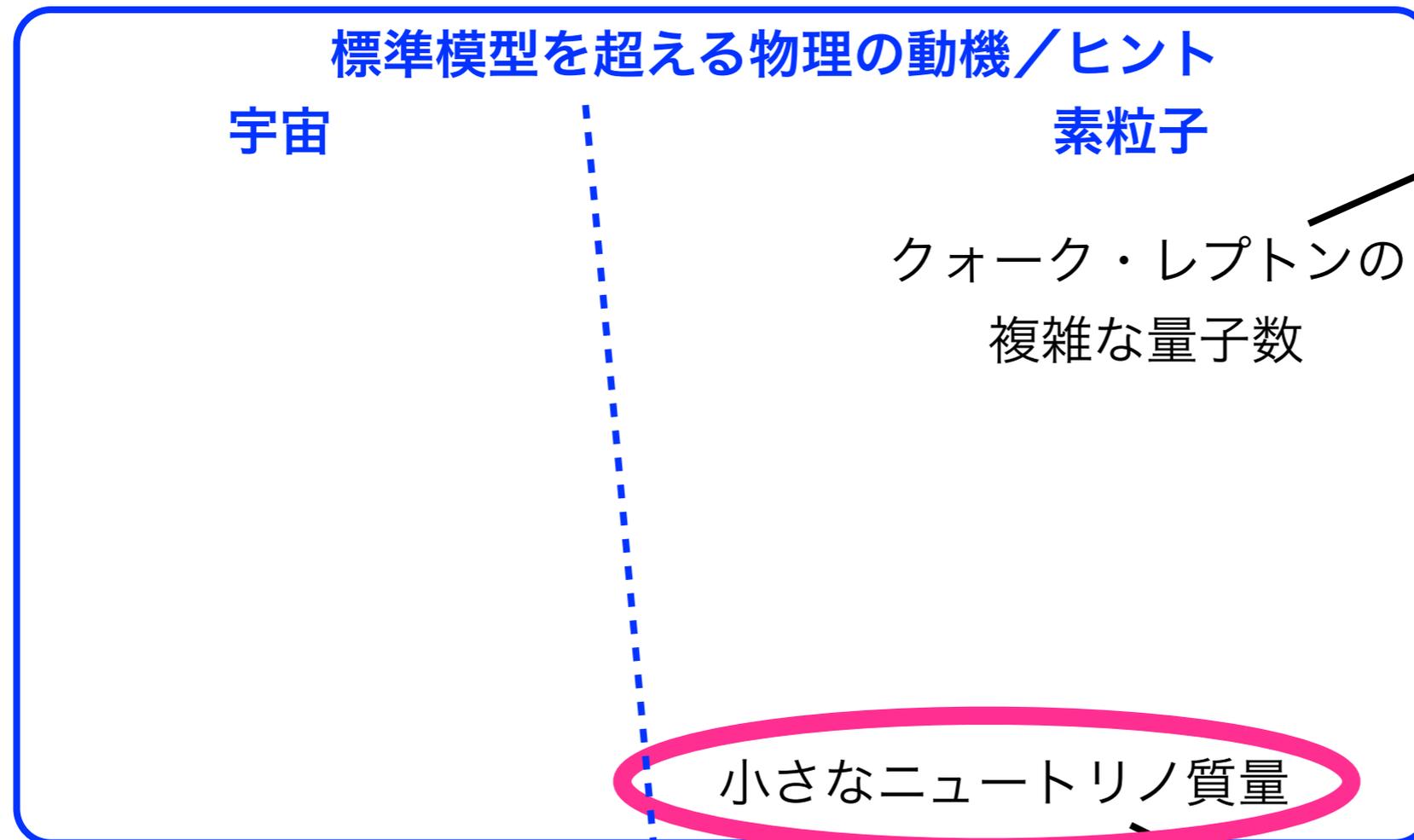
標準模型を超える物理の動機 / ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

小さなニュートリノ質量



陽子崩壊 ?!

大統一理論

標準模型を超える物理の動機 / ヒント

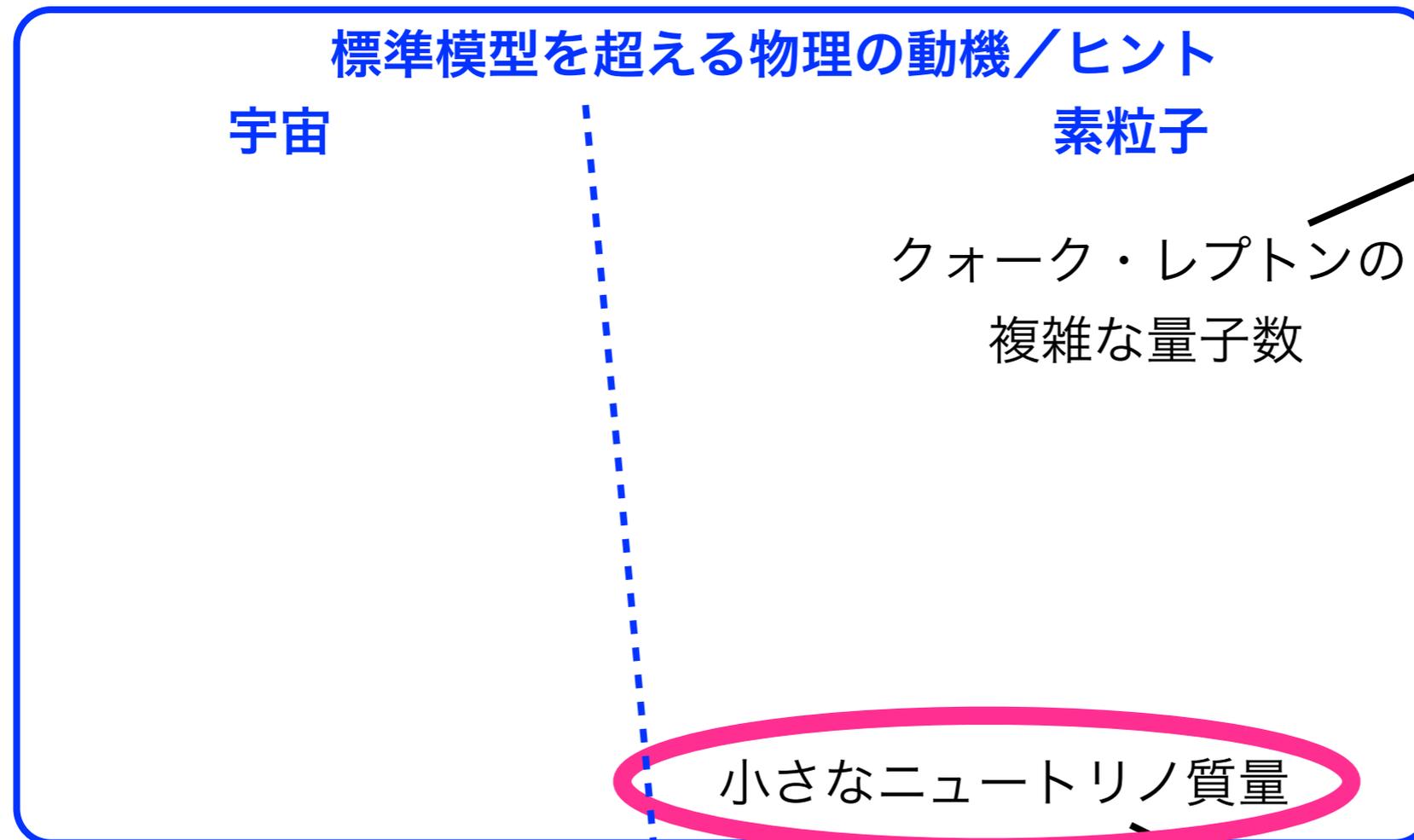
宇宙

素粒子

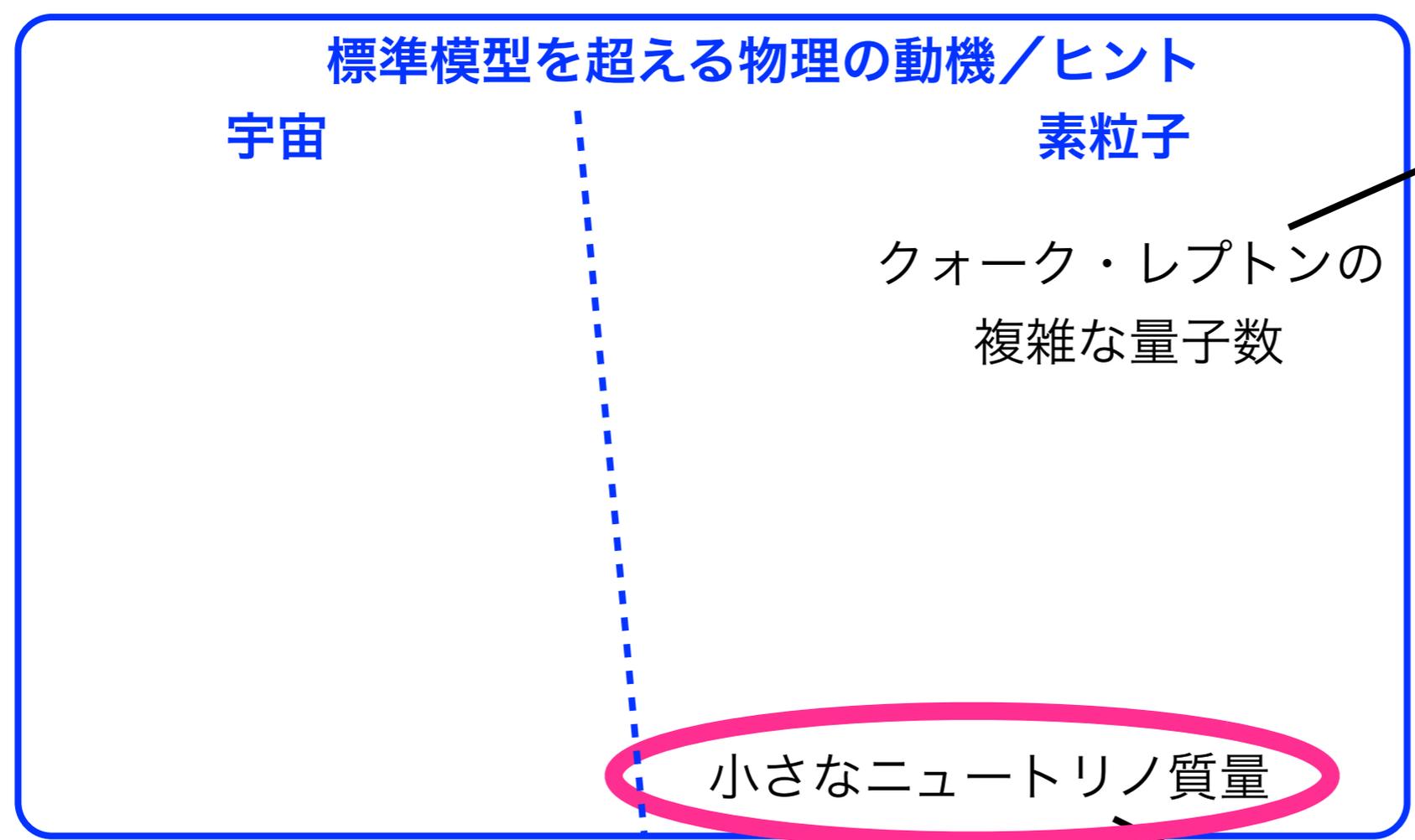
クォーク・レプトンの
複雑な量子数

小さなニュートリノ質量

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在



陽子崩壊 ?!



標準模型を超える物理の動機 / ヒント

宇宙

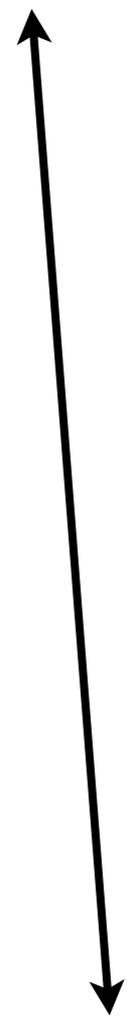
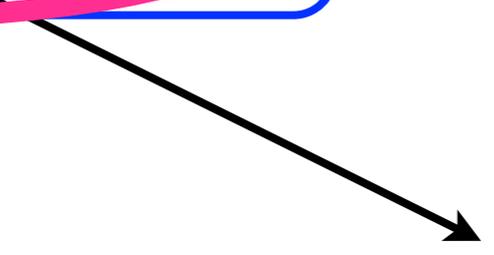
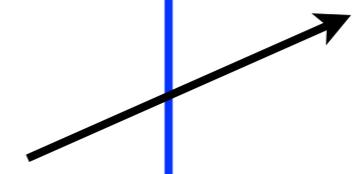
素粒子

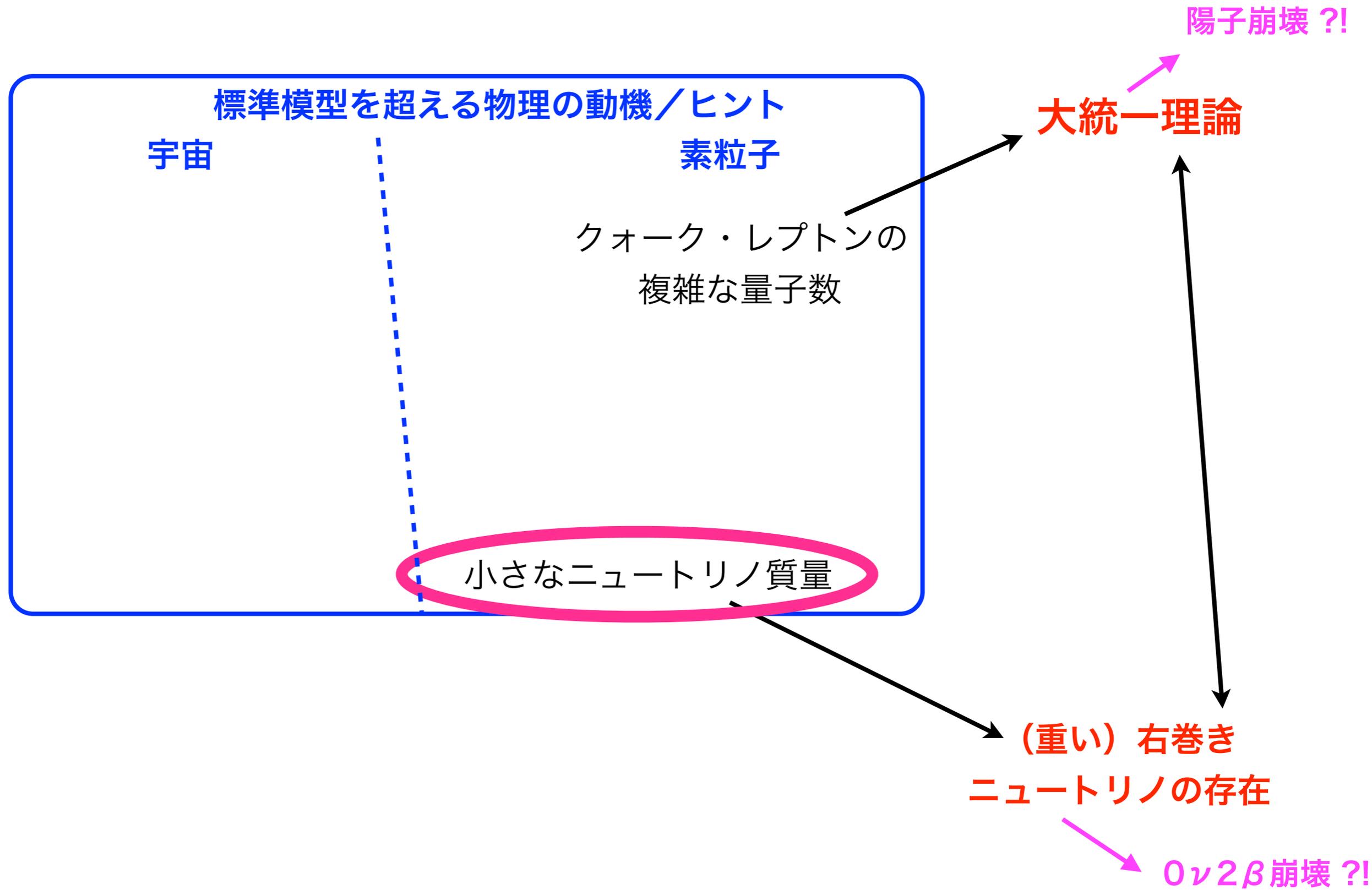
クォーク・レプトンの
複雑な量子数

小さなニュートリノ質量

大統一理論

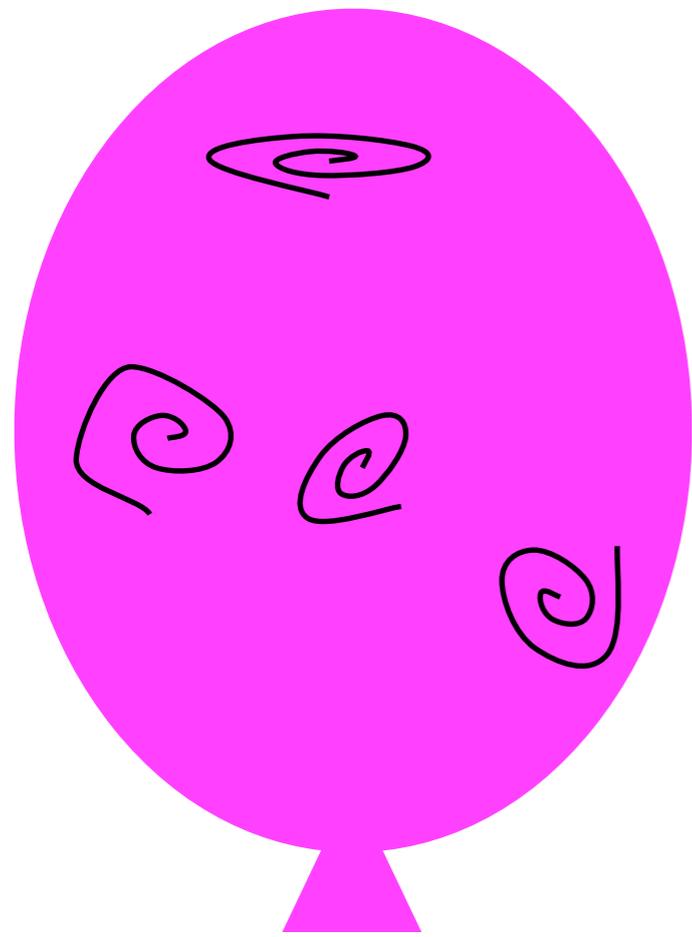
(重い) 右巻き
ニュートリノの存在





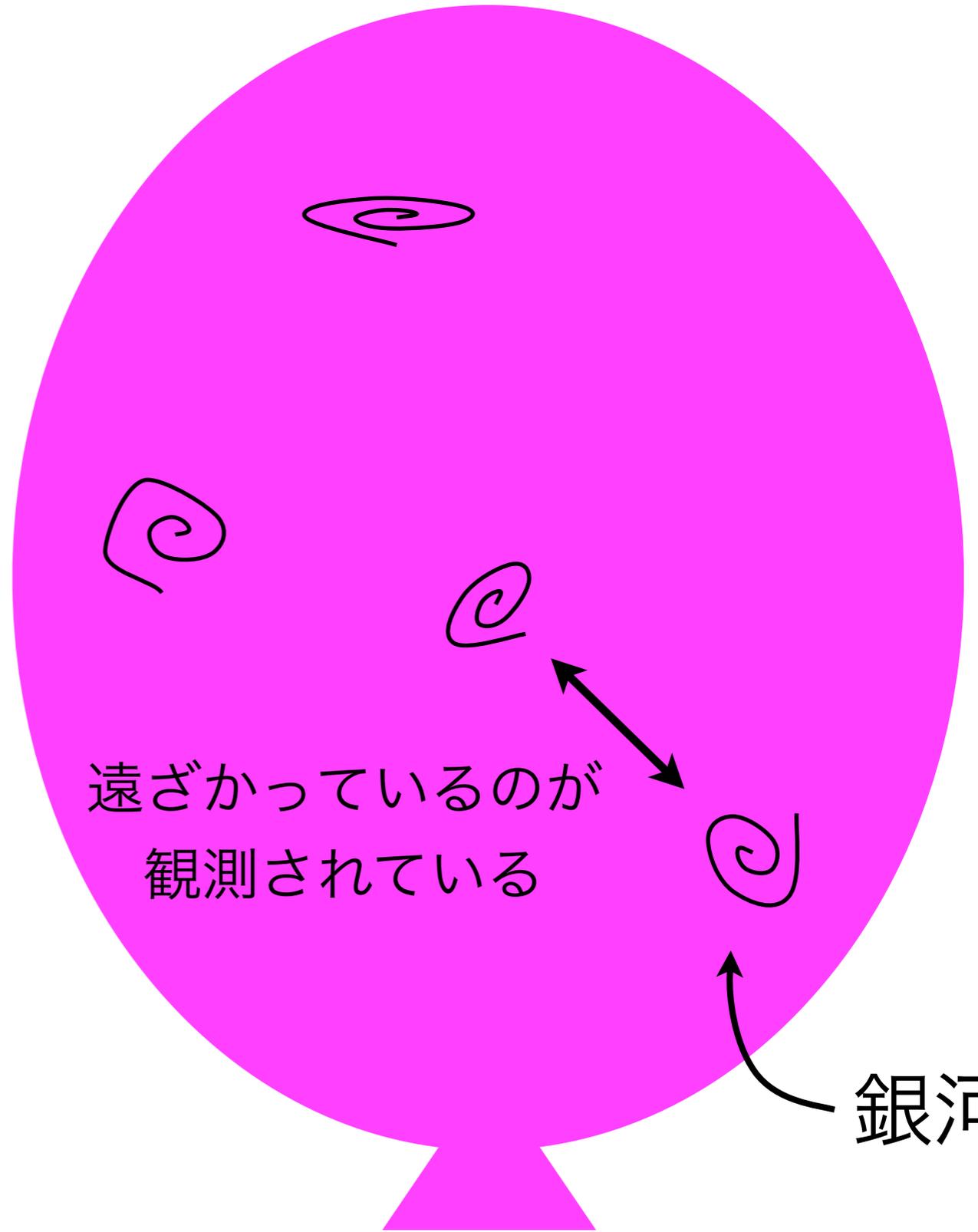
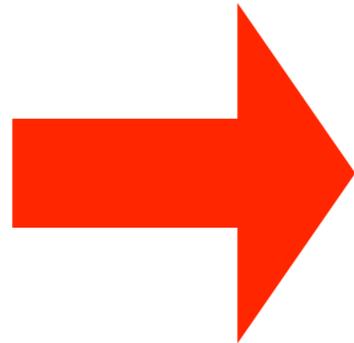
◆ 話はがらっと変わって . . .

宇宙は膨張している。



宇宙風船

膨張

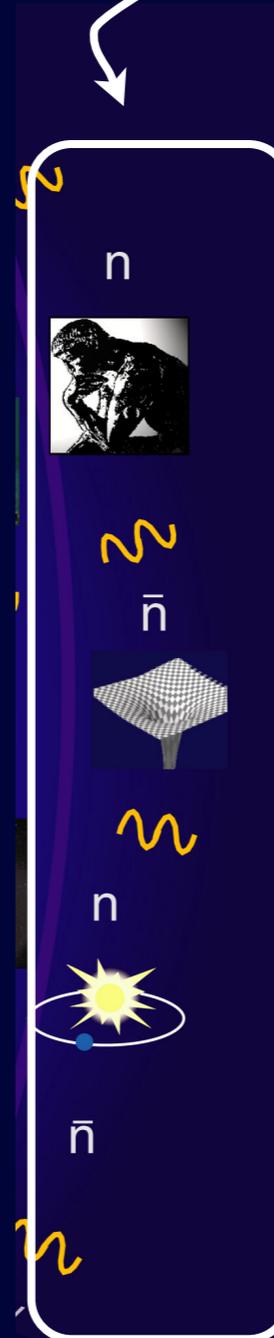


遠ざかっているのが
観測されている

銀河

宇宙は膨張している。

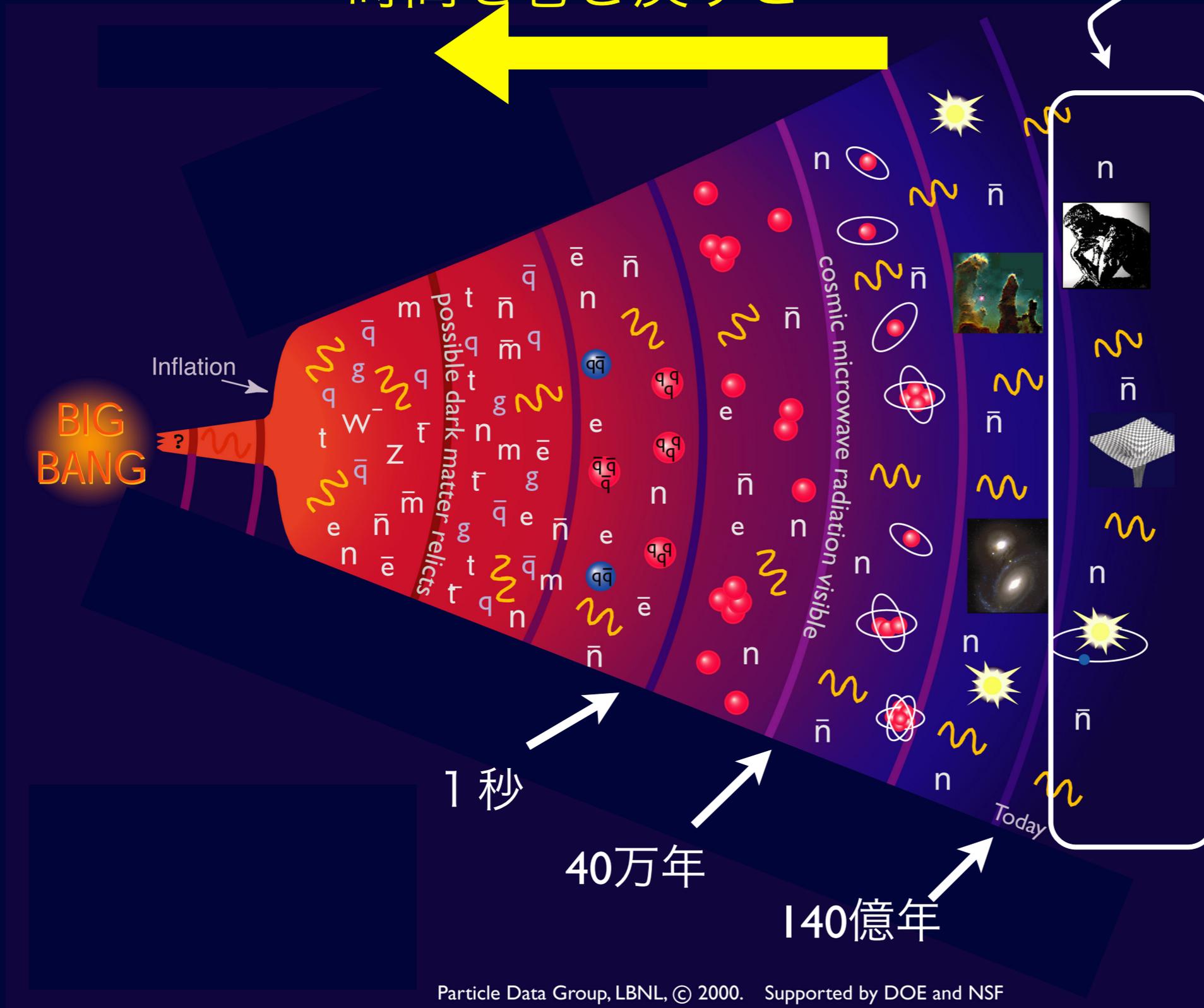
現在の宇宙



宇宙は膨張している。

現在の宇宙

時間を巻き戻すと・・・



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

http://pdg.ge.infn.it/particleadventure/frameless/chart_cutouts/universe_original.pdf

宇宙は膨張している。

現在の宇宙

時間を巻き戻すと・・・

初期の宇宙は高温・高密度の
「火の玉宇宙」だった！

BIG BANG

dark matter relicts

cosmic microwave radiation visible

Today

1 秒

40万年

140億年

Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

http://pdg.ge.infn.it/particleadventure/frameless/chart_cutouts/universe_original.pdf

宇宙は膨張している。

現在の宇宙

時間を巻き戻すと・・・

初期の宇宙は高温・高密度の
「火の玉宇宙」だった！

BIG BANG

dark matter relicts

cosmic microwave radiation

1秒

40万年

140億年

証拠は？

誕生**40万年**後の宇宙
(温度**3000度**) から出た光

現在の宇宙

BIG BANG

Inflation

possible dark matter relicts

cosmic microwave radiation visible

1 秒

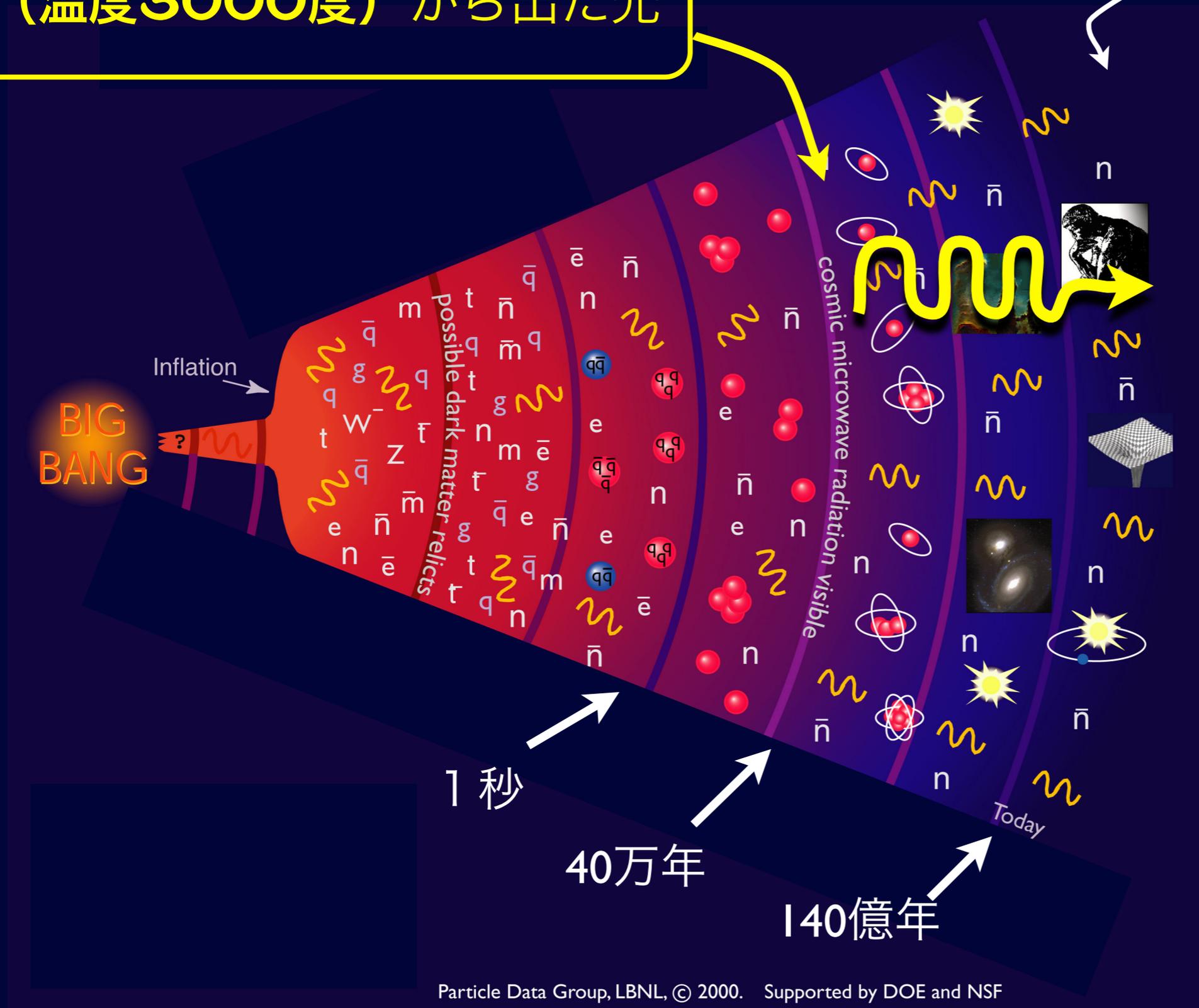
40万年

140億年

Today

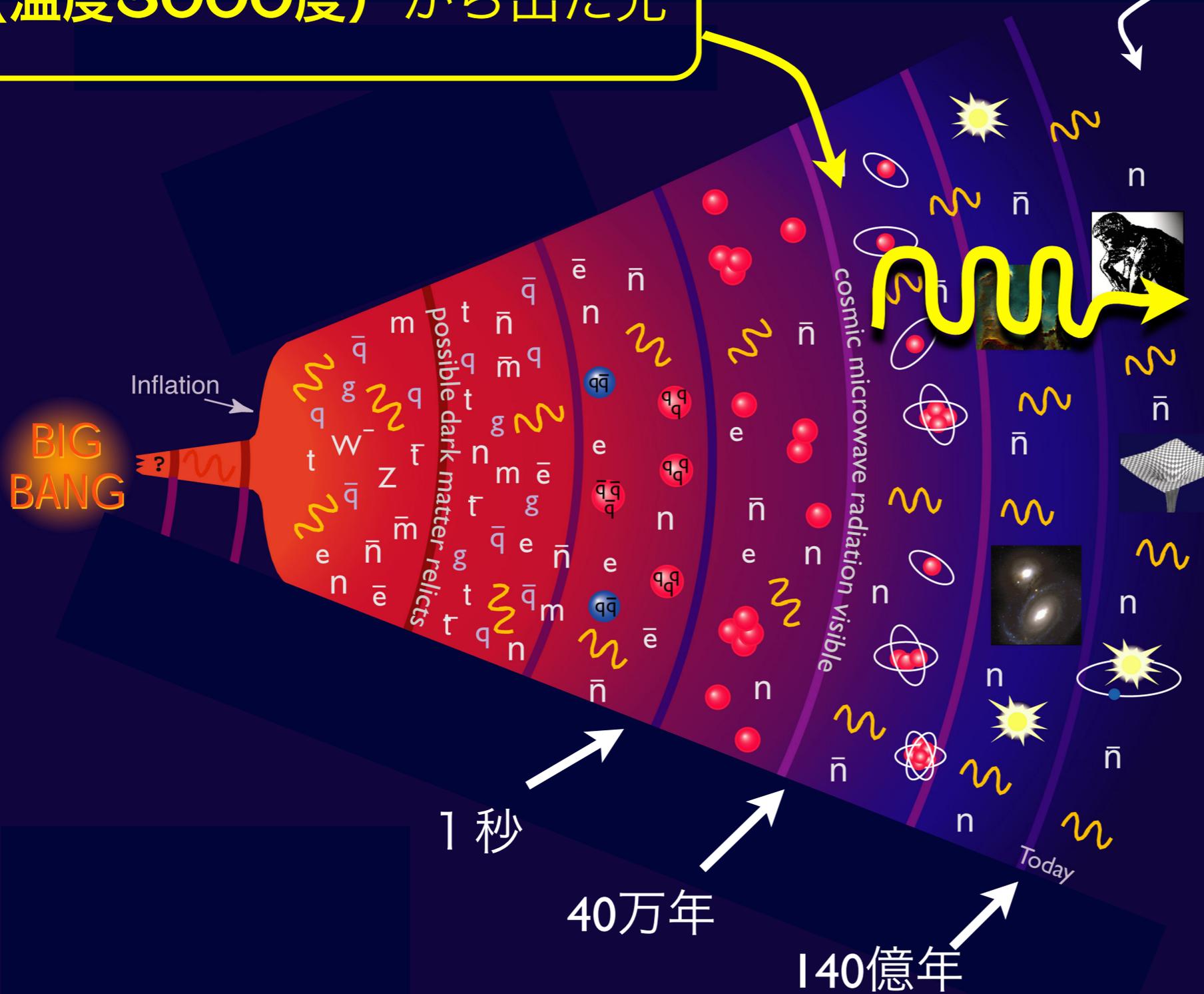
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

http://pdg.ge.infn.it/particleadventure/frameless/chart_cutouts/universe_original.pdf



誕生**40万年**後の宇宙
(温度**3000度**) から出た光

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

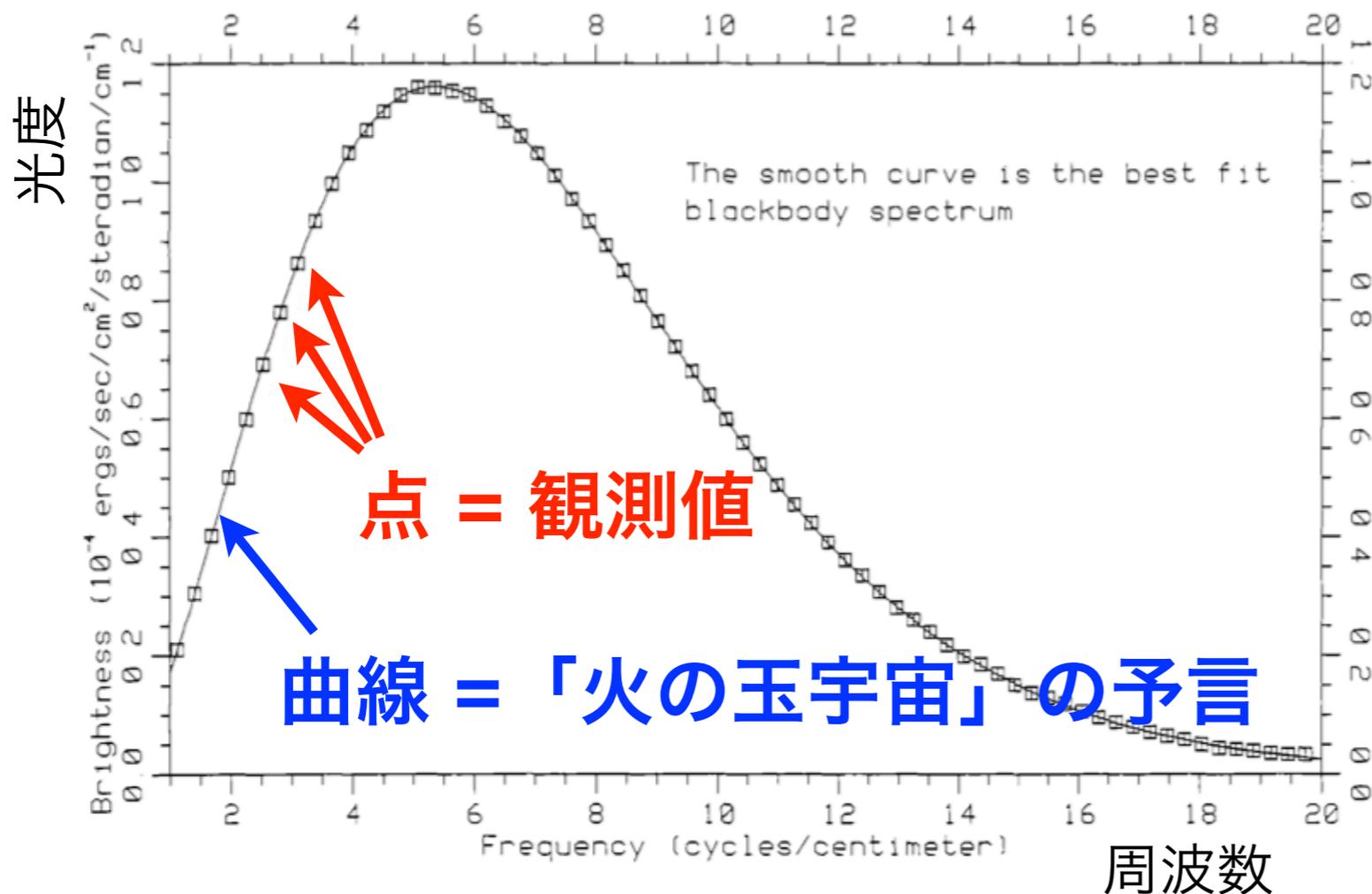


・・・が
140億年後の今
見えている！

誕生**40万年**後の宇宙
(温度**3000度**) から出た光

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

宇宙背景放射



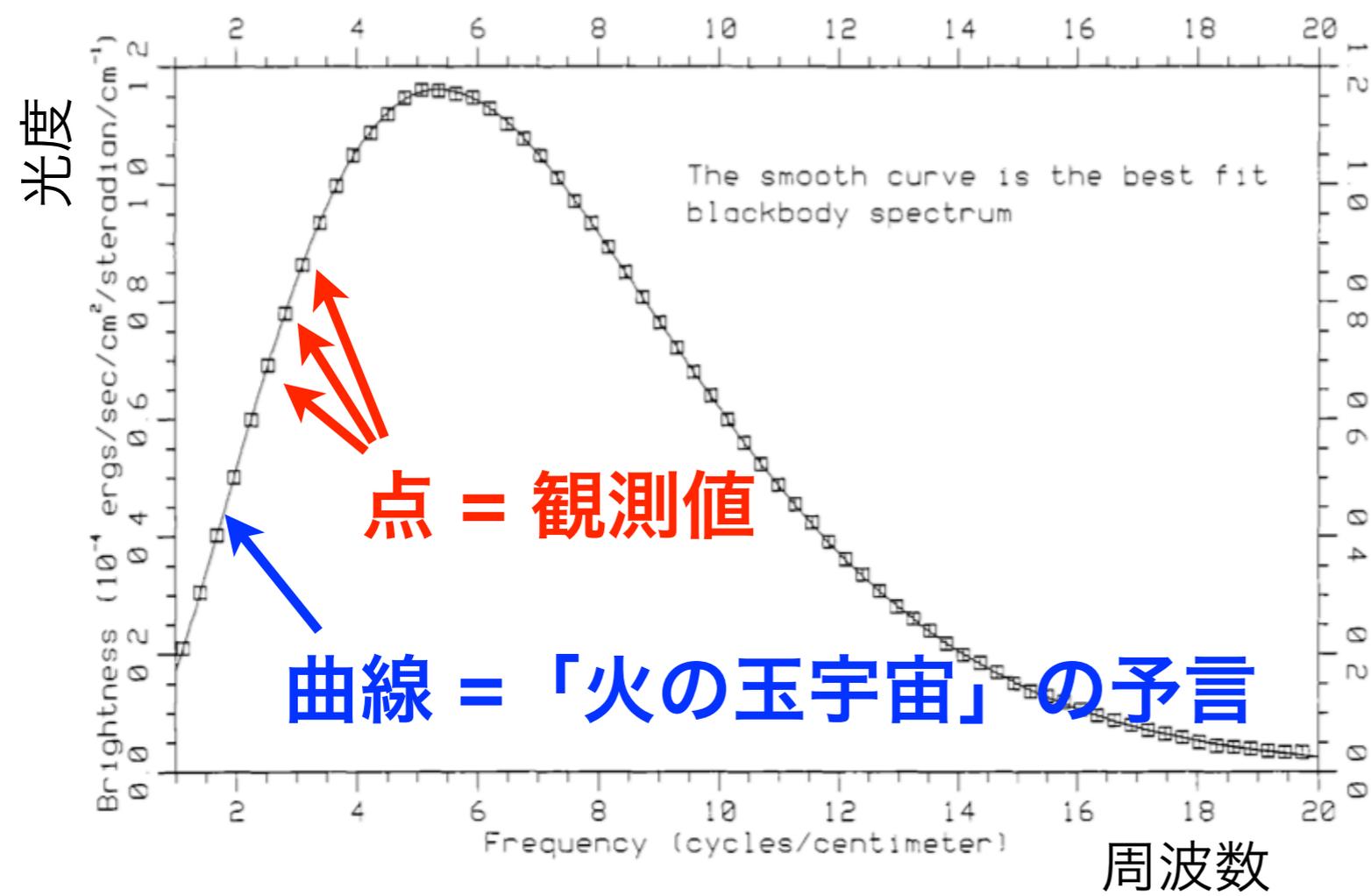
・・・が
140億年後の今
見えている！

J.C.Mather et al. Astrophys. J. 354: L37-L40, 1990

誕生40万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

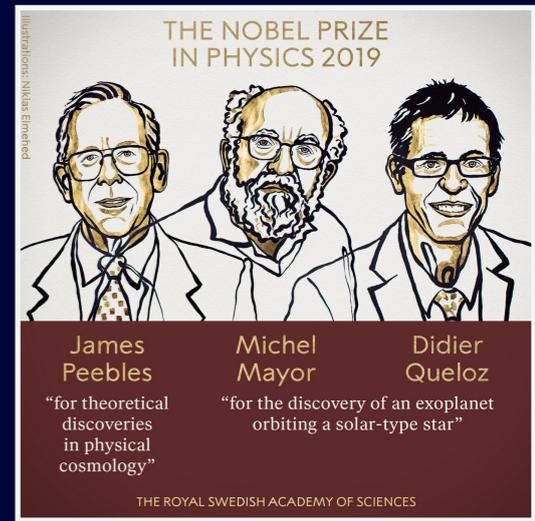
現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

宇宙背景放射



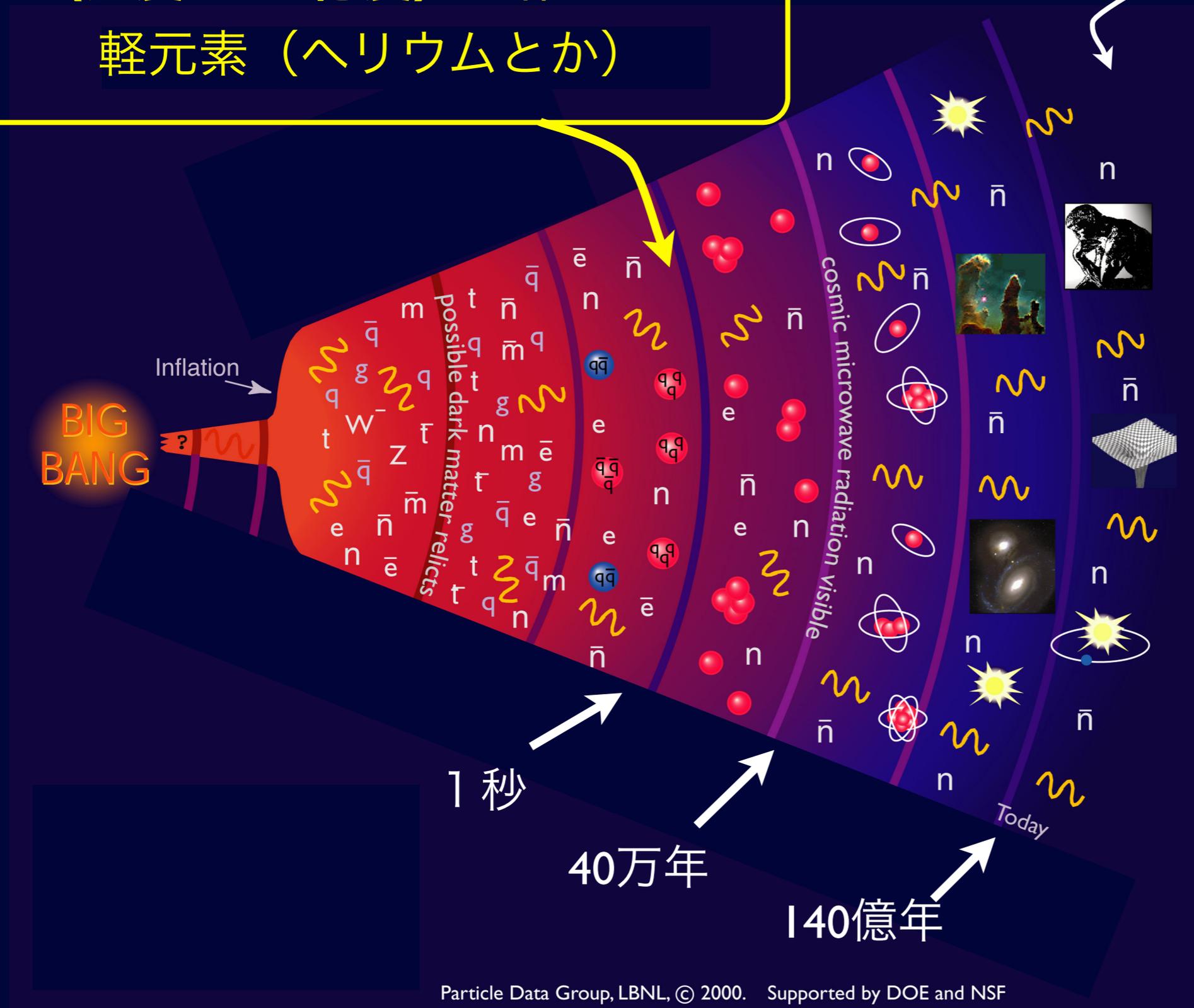
J.C.Mather et al. Astrophys. J. 354: L37-L40, 1990

・・・が
140億年後の今
見えている！



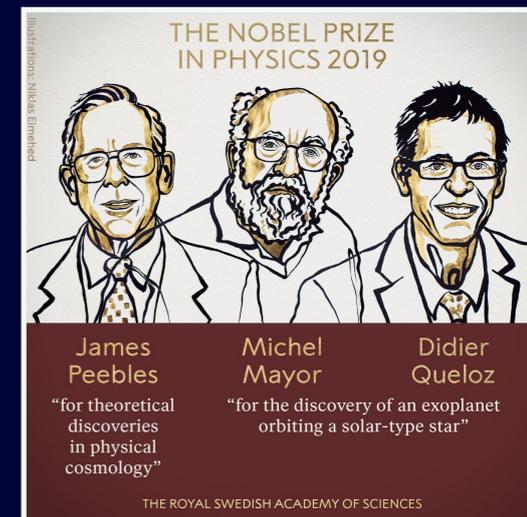
誕生 **1秒後～3分後**の宇宙
 (温度**100億度**) で作られた
 軽元素 (ヘリウムとか)

現在の宇宙
 = 宇宙誕生後
140億年



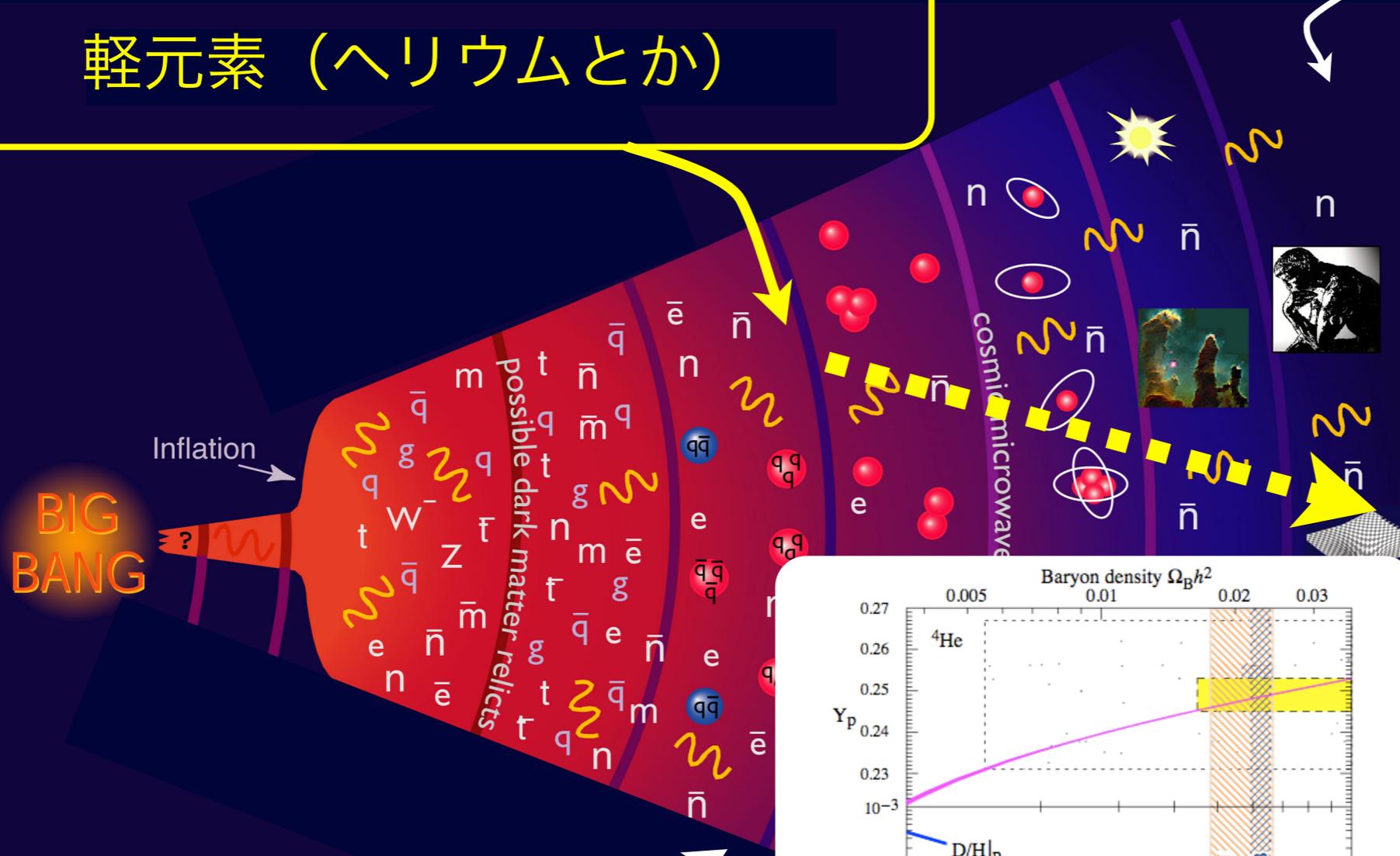
Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

http://pdg.ge.infn.it/particleadventure/frameless/chart_cutouts/universe_original.pdf



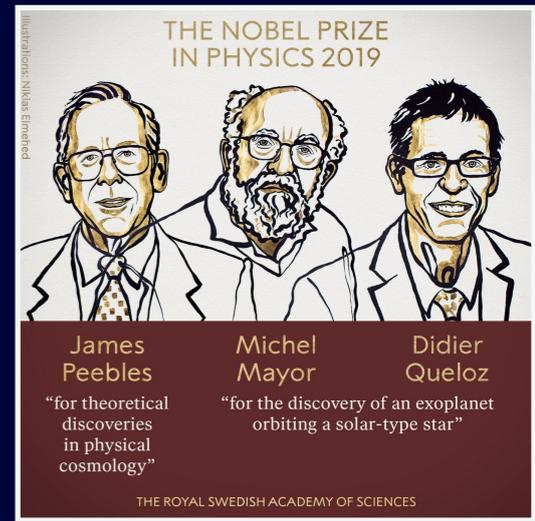
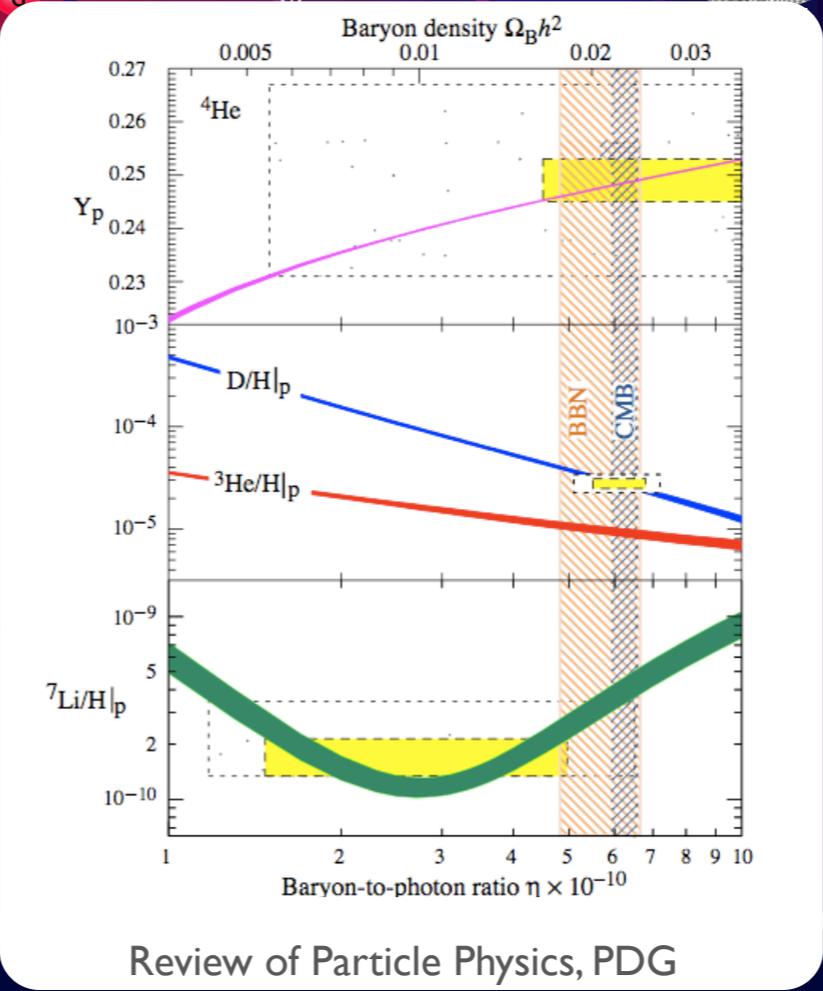
誕生 **1秒後～3分後**の宇宙
 (温度**100億度**) で作られた
 軽元素 (ヘリウムとか)

現在の宇宙
 = 宇宙誕生後
140億年



・・・が
140億年後の今
 見えている！

1秒
 40万



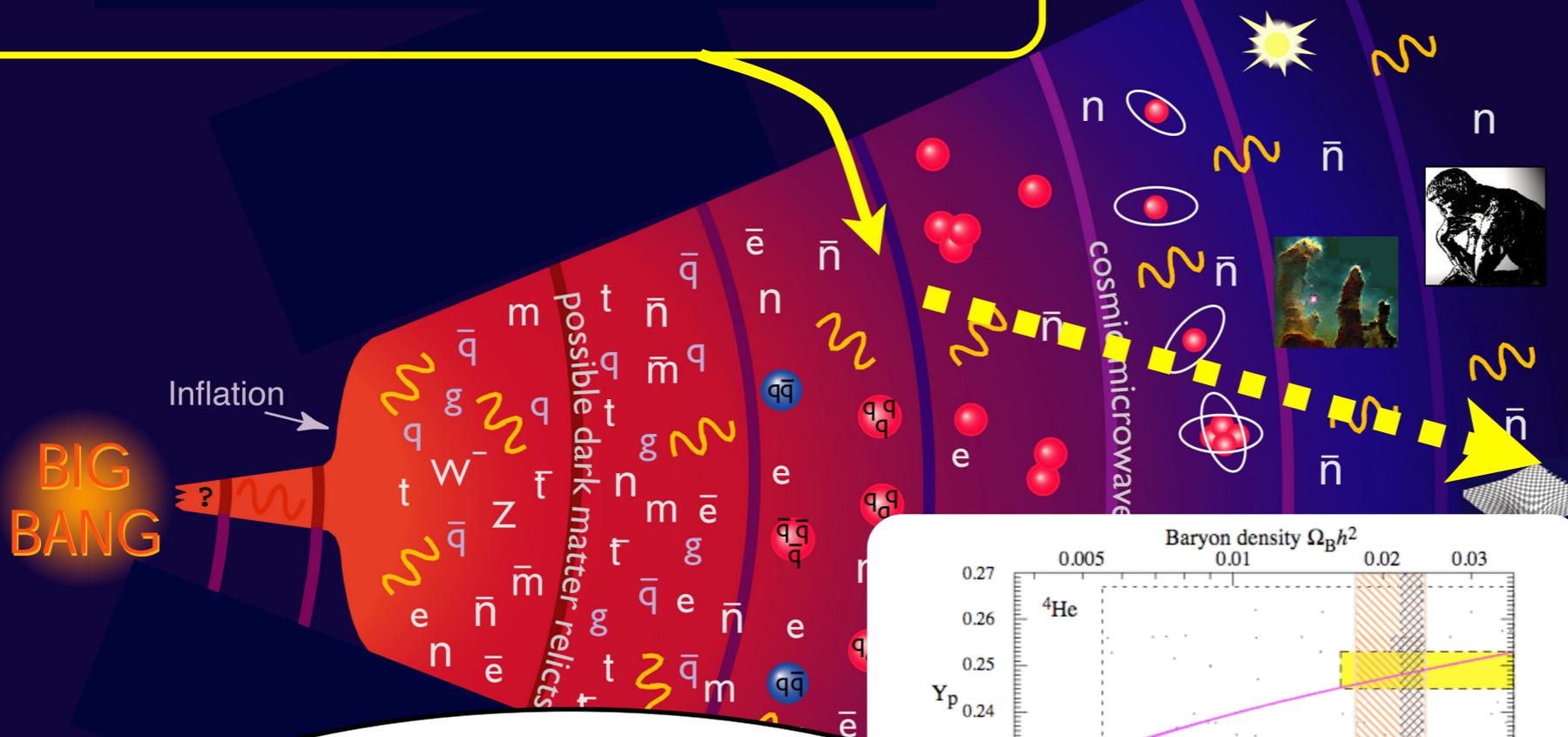
Particle Data Group, LBNL
<http://pdg.ge.infn.it/>

outs/universe_original.pdf

Review of Particle Physics, PDG

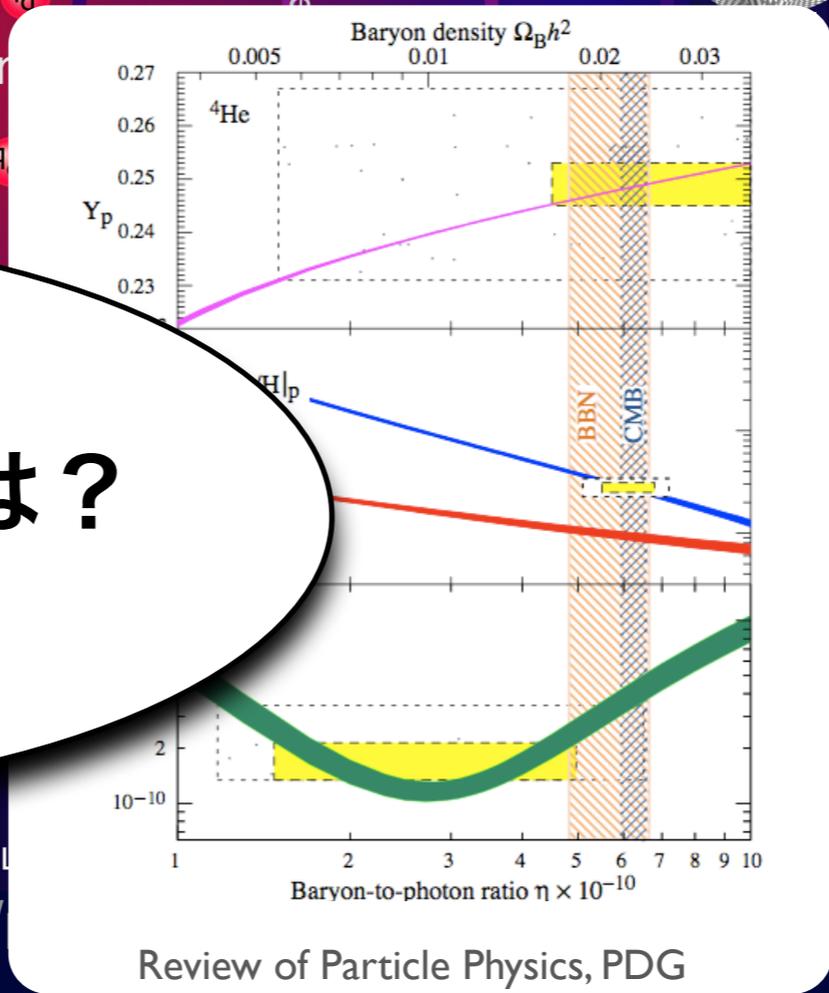
誕生 **1秒後～3分後**の宇宙
 (温度**100億度**) で作られた
 軽元素 (ヘリウムとか)

現在の宇宙
 = 宇宙誕生後
140億年



・・・が
140億年後の今
 見えている！

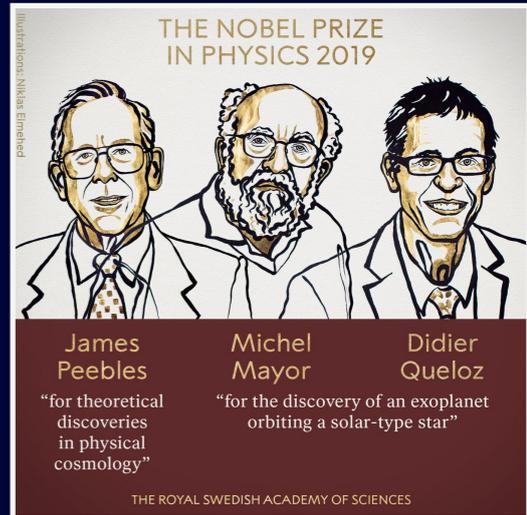
じゃあ1秒より前は？



Particle Data Group, LBNL
<http://pdg.ge.infn.it/>

Review of Particle Physics, PDG

outs/universe_original.pdf



宇宙誕生後最初の1秒に何が起きたか
直接的な証拠はない。

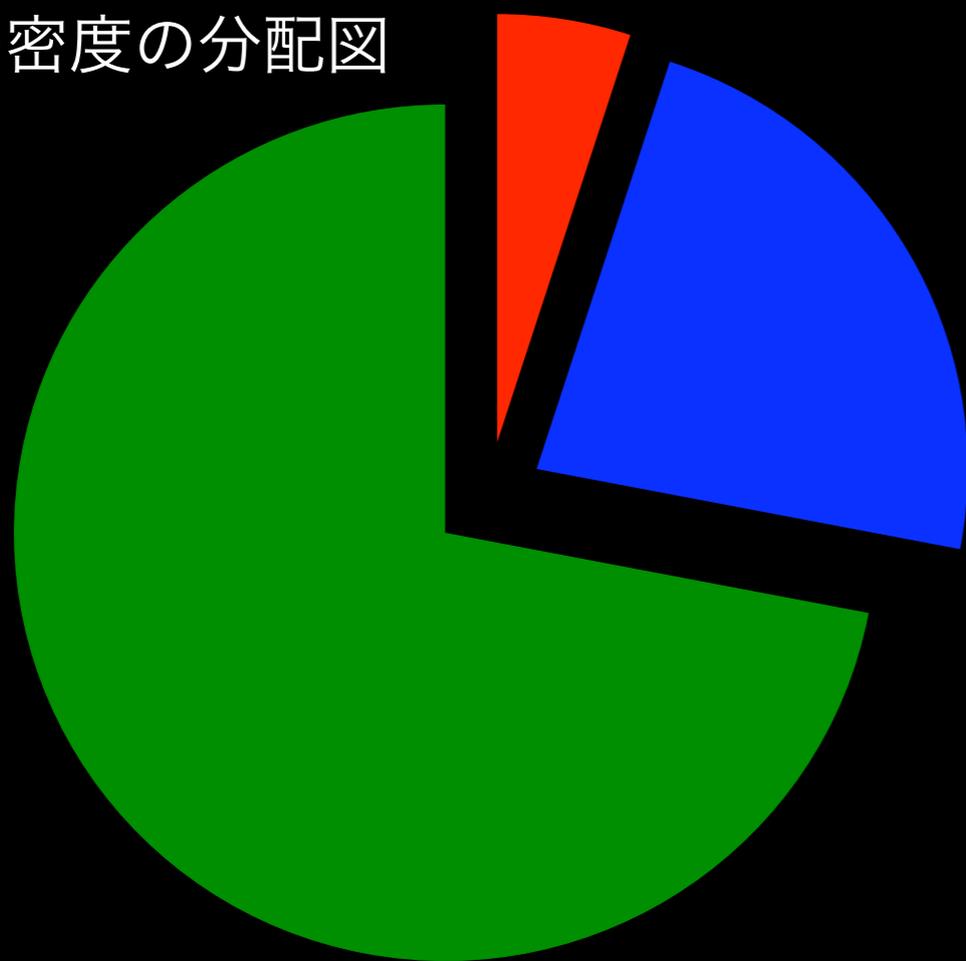
宇宙誕生後最初の1秒に何が起きたか
直接的な証拠はない。

しかしこの1秒の事を理解しないと
解けない謎がある・・・。

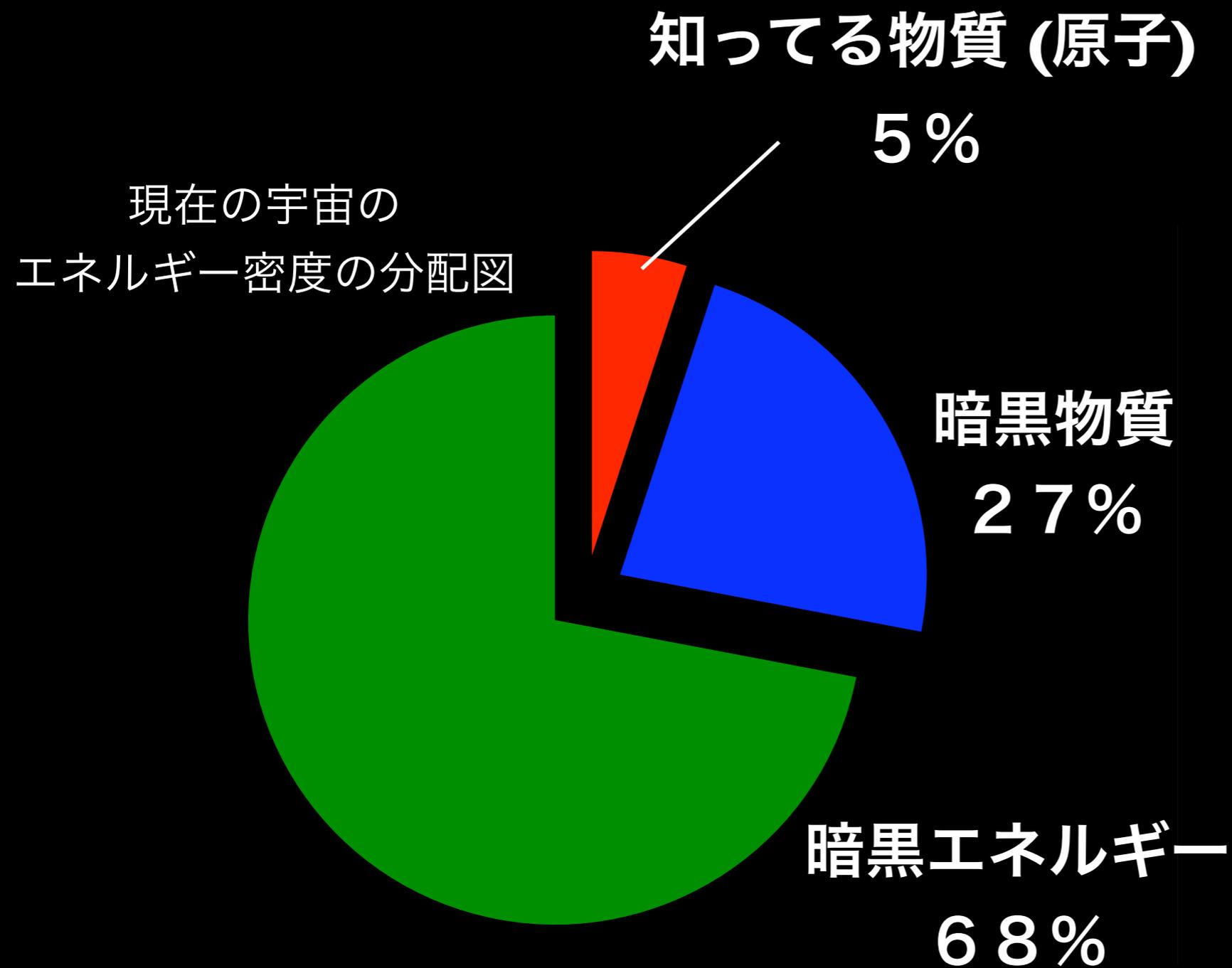
宇宙に残された謎

宇宙に残された謎

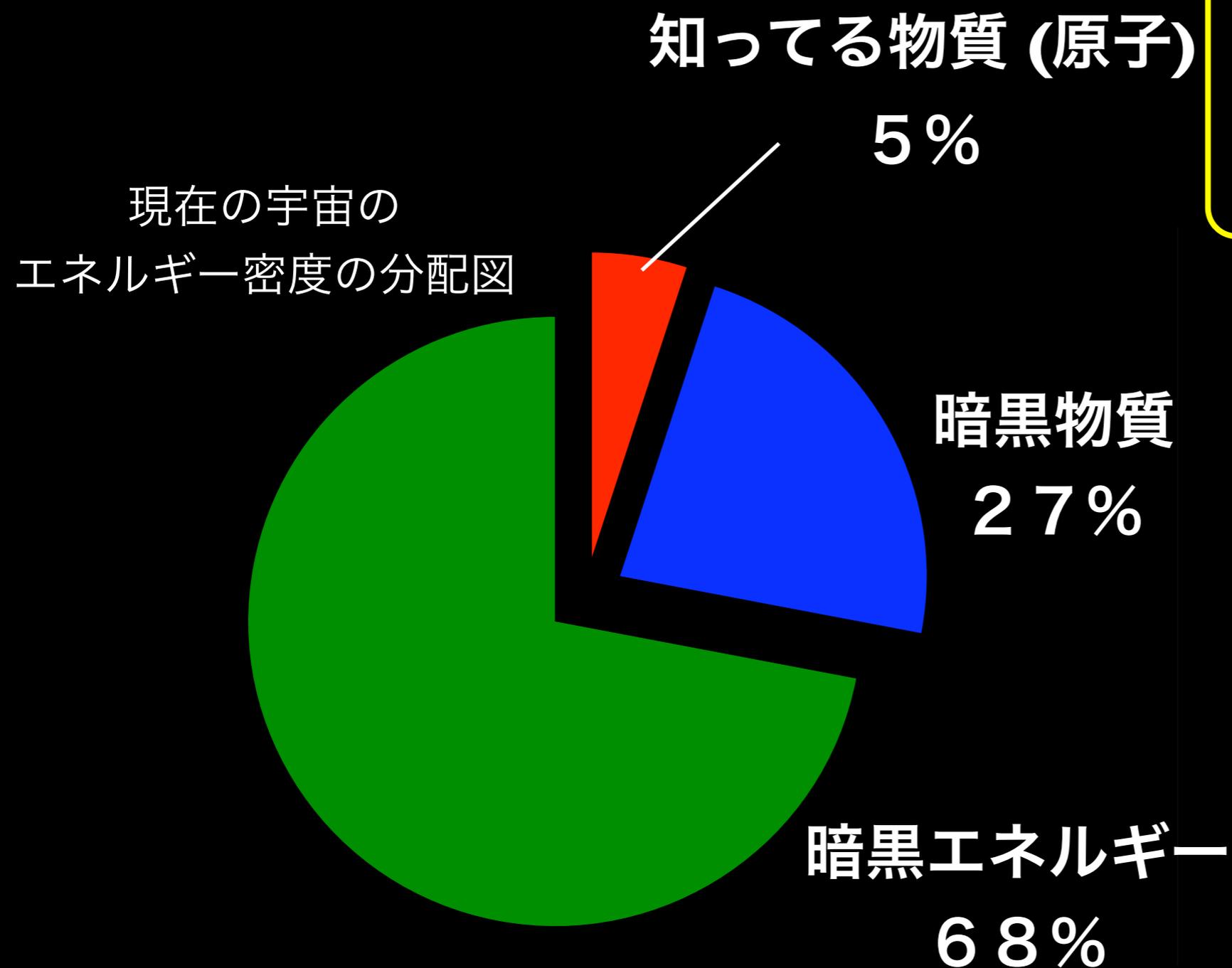
現在の宇宙の
エネルギー密度の分配図



宇宙に残された謎

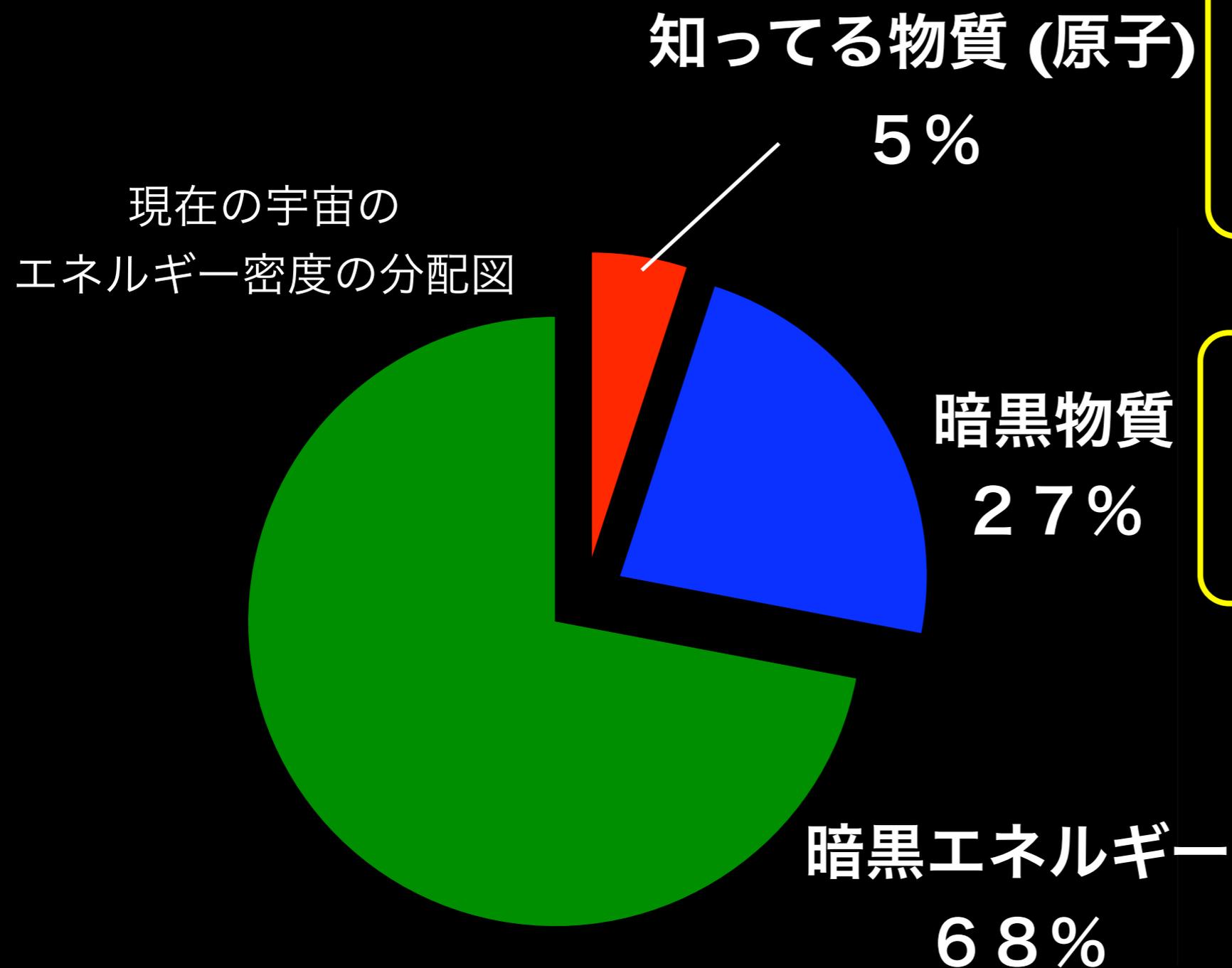


宇宙に残された謎



消えた
反物質の謎

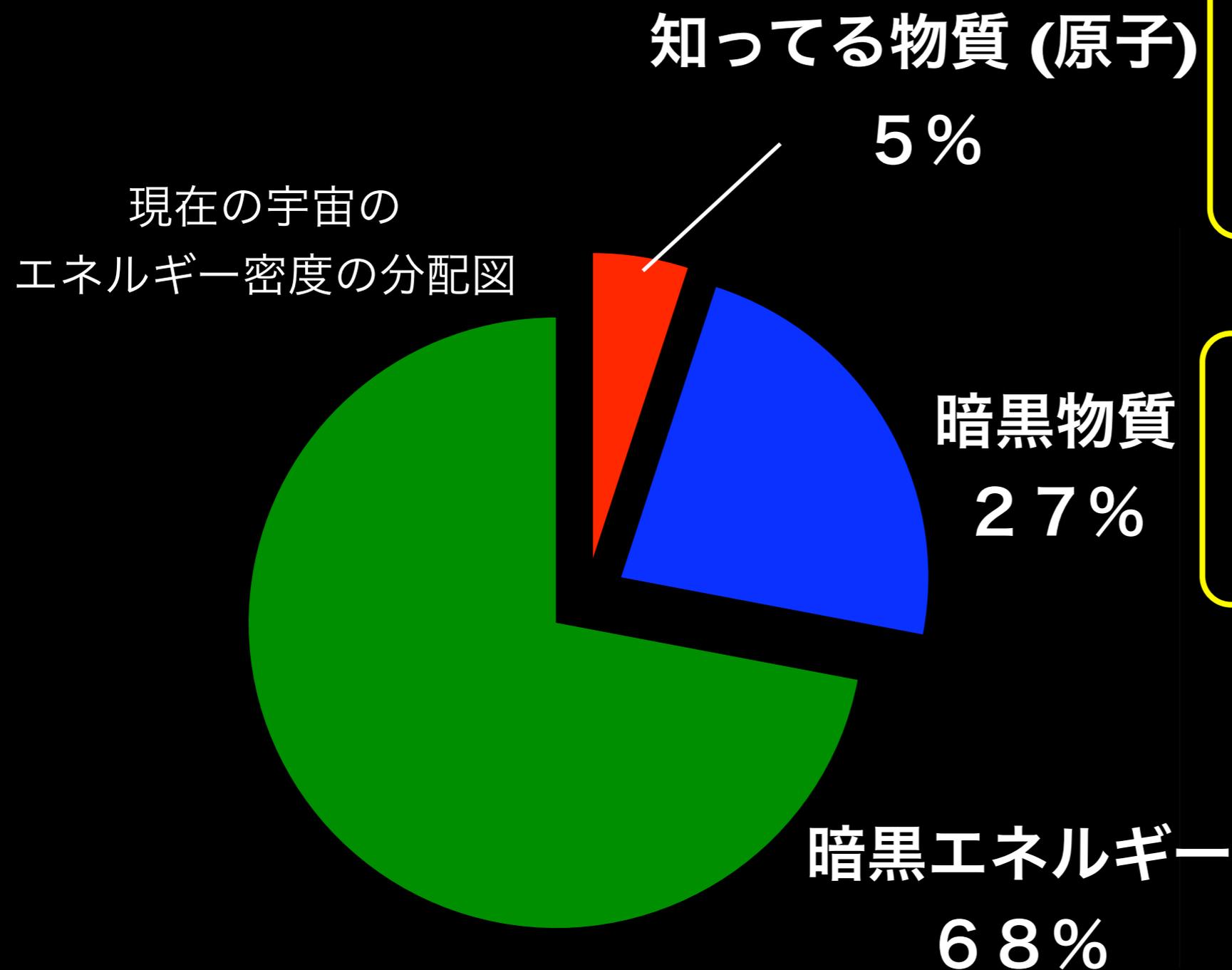
宇宙に残された謎



消えた
反物質の謎

暗黒物質
の正体は？

宇宙に残された謎

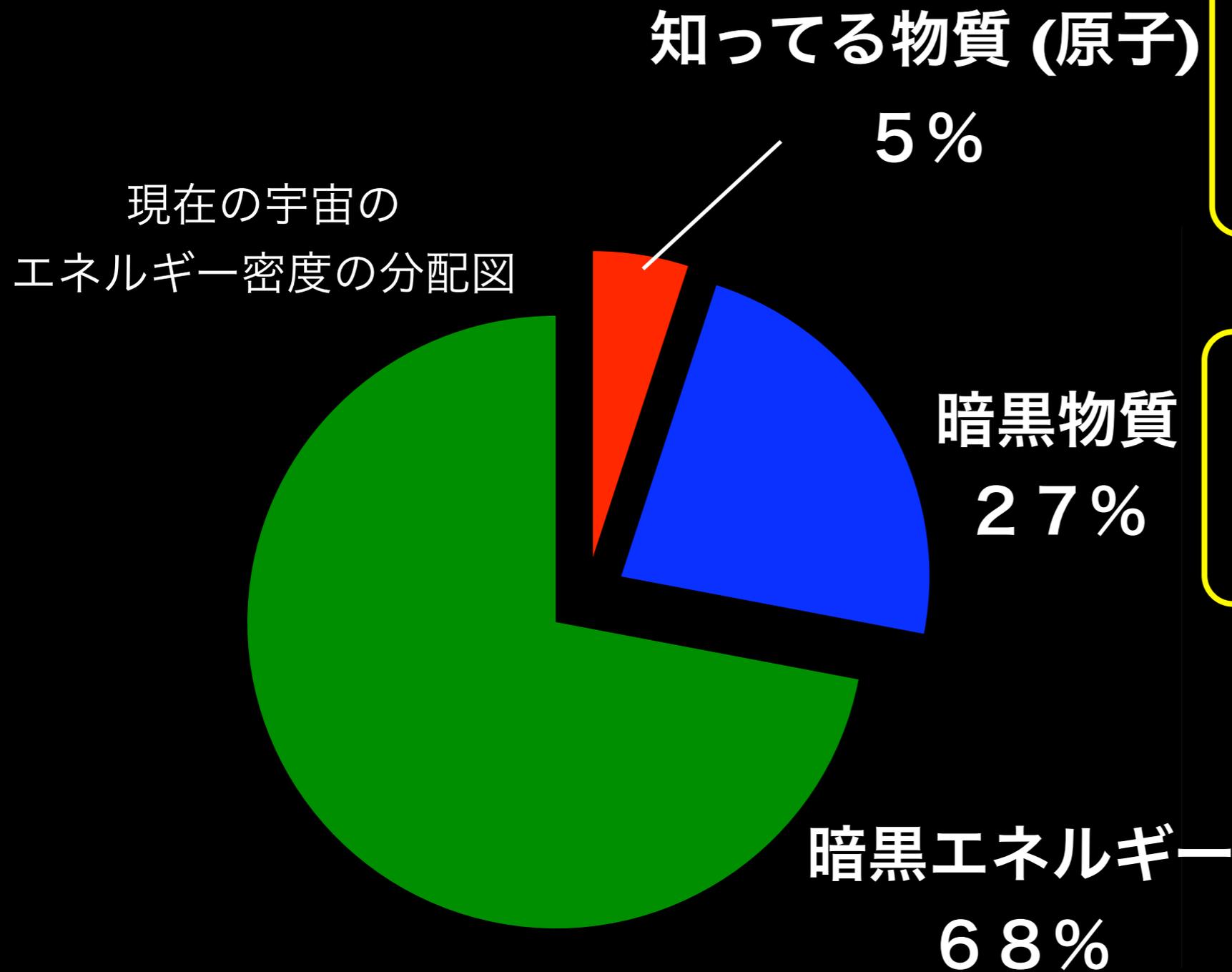


消えた
反物質の謎

暗黒物質
の正体は？

暗黒エネルギー
の正体は？

宇宙に残された謎



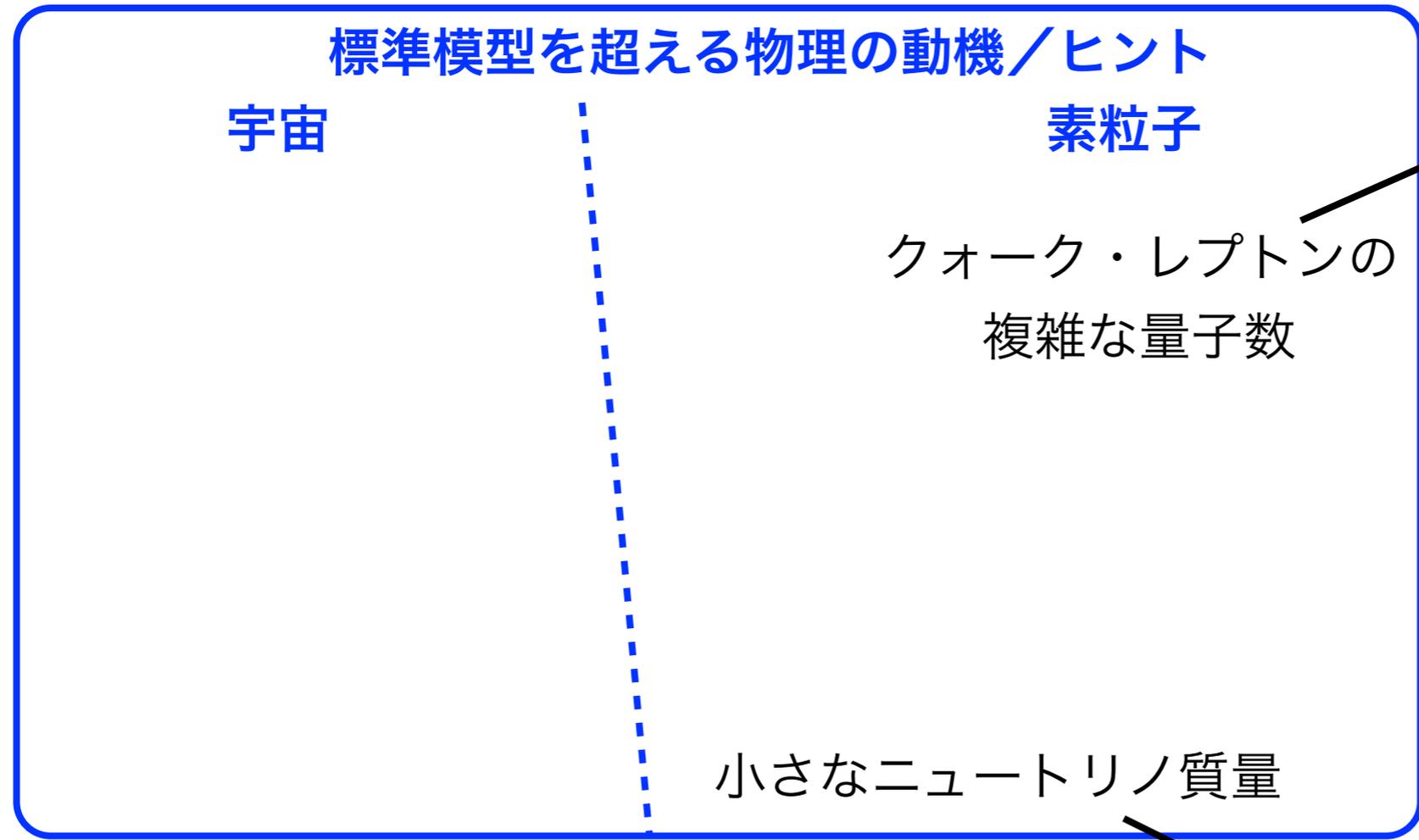
消えた
反物質の謎

暗黒物質
の正体は？

暗黒エネルギー
の正体は？

さらに . . .

宇宙の初期条件の問題

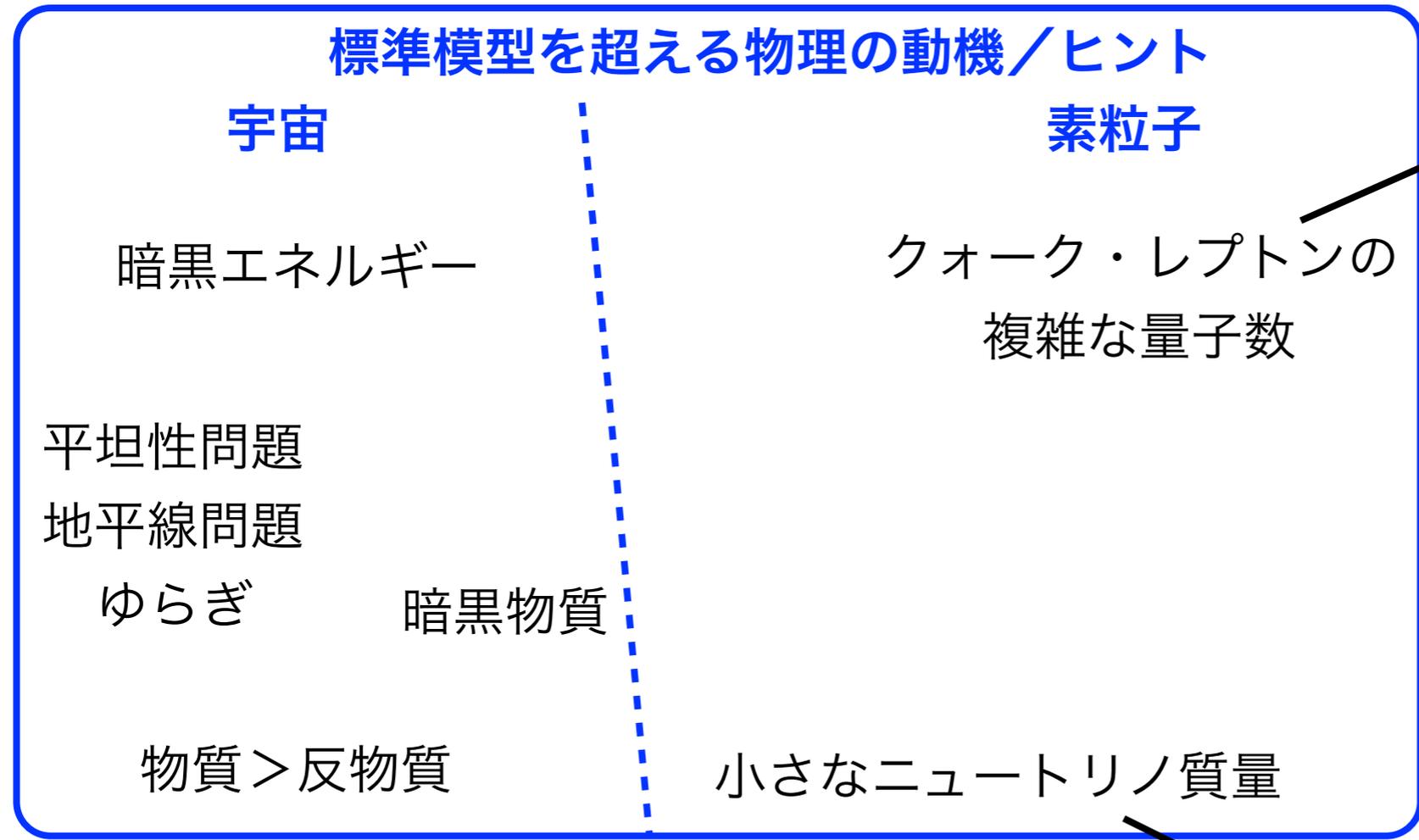


大統一理論

陽子崩壊 ?!

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



大統一理論

陽子崩壊 ?!

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

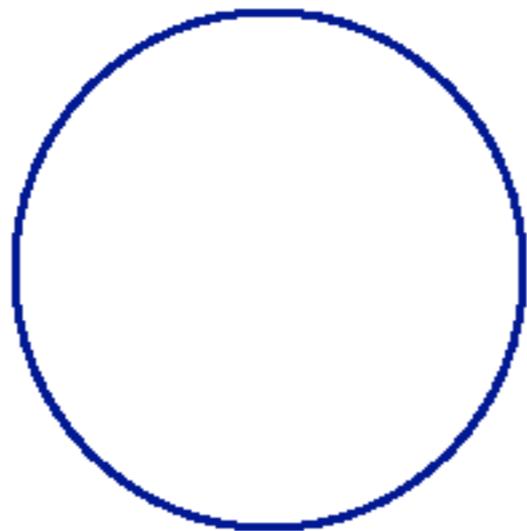
$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

現在の宇宙はとっても平坦！

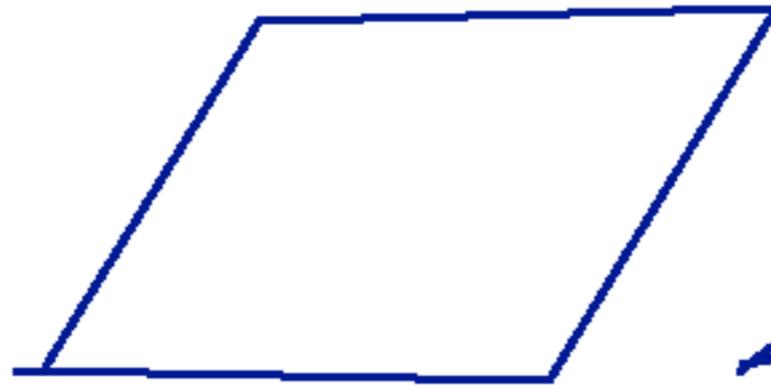
「宇宙の平坦さ」
を表す量：

$$\Omega = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho}{H^2}$$

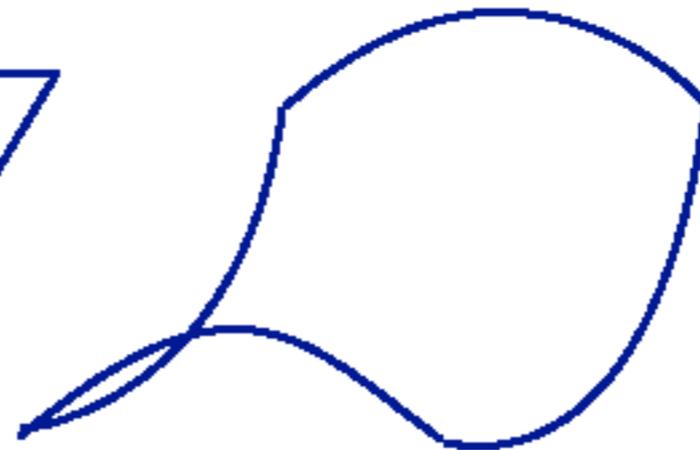
Newton定数
宇宙のエネルギー密度
Hubbleパラメータ
(宇宙の膨張速度)



$\Omega > 1$
閉じた宇宙



$\Omega = 1$
平坦な宇宙



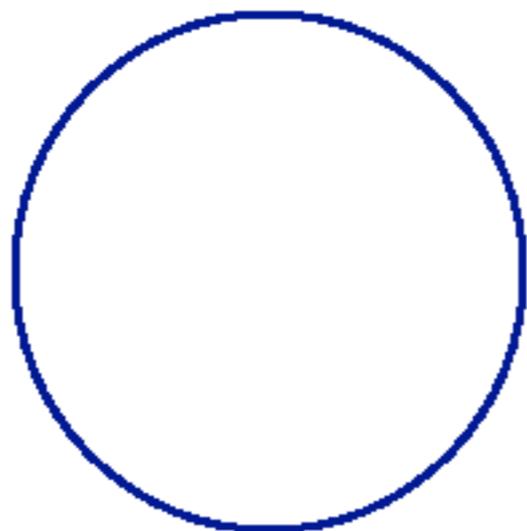
$\Omega < 1$
開いた宇宙

現在の宇宙はとっても平坦！

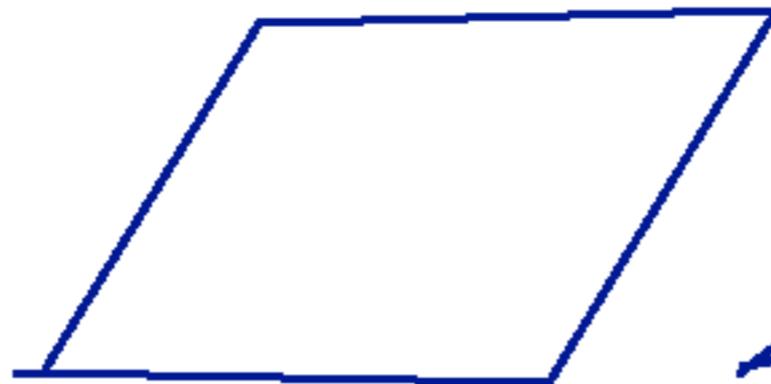
「宇宙の平坦さ」
を表す量：

$$\Omega = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho}{H^2}$$

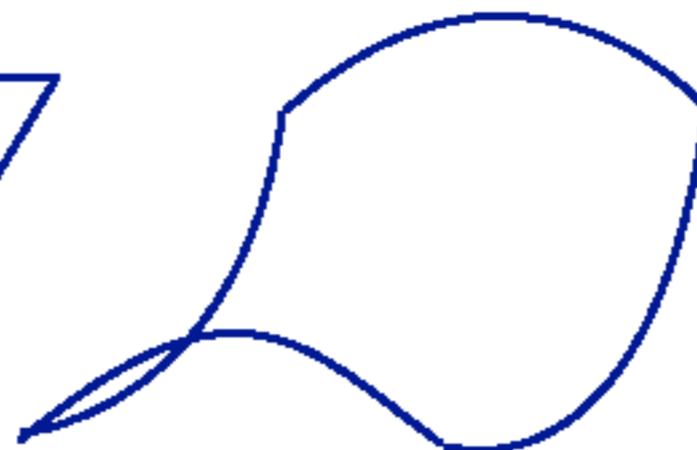
Newton定数 (pointing to G)
宇宙のエネルギー密度 (pointing to ρ)
Hubbleパラメータ (宇宙の膨張速度) (pointing to H^2)



$\Omega > 1$
閉じた宇宙



$\Omega = 1$
平坦な宇宙



$\Omega < 1$
開いた宇宙

観測値： $\Omega = 0.999 \pm 0.002$ (とても平坦)

• • • • 実はコレがものすごく不思議！

Einstein 方程式
によると：

$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right|$$

$$\propto \frac{1}{\rho \cdot a^2}$$

宇宙の scale factor
(~宇宙の"大きさ")

宇宙のエネルギー密度

ところが標準宇宙論によると：

(Einstein 方程式 + 初期条件は火の玉宇宙)

$$\frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto \begin{cases} t & (\text{for } t < 1 \text{ 万年}) \\ t^{2/3} & (\text{for } t > 1 \text{ 万年}) \end{cases}$$

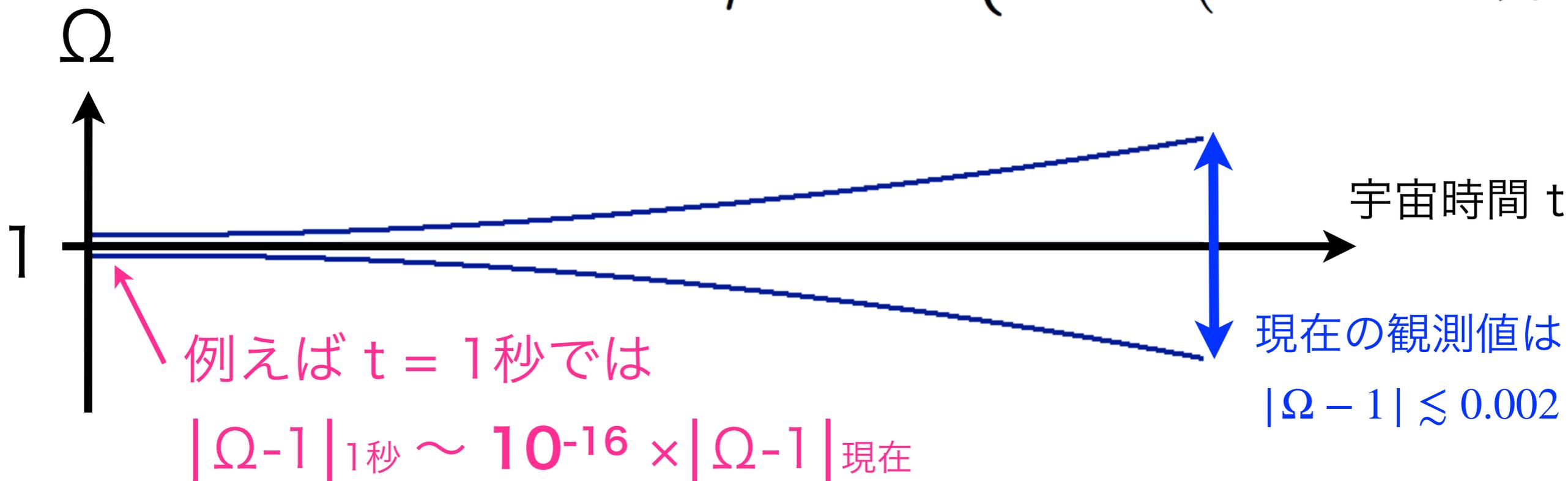
Einstein 方程式によると：

$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2}$$

宇宙の scale factor
(~宇宙の"大きさ")

宇宙のエネルギー密度

ところが標準宇宙論によると：
(Einstein 方程式 + 初期条件は火の玉宇宙)

$$\frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto \begin{cases} t & (\text{for } t < 1 \text{ 万年}) \\ t^{2/3} & (\text{for } t > 1 \text{ 万年}) \end{cases}$$


初期宇宙はものすごく〜〜平坦だった！

なんで?? どうやって? 初期条件の fine-tuning 問題

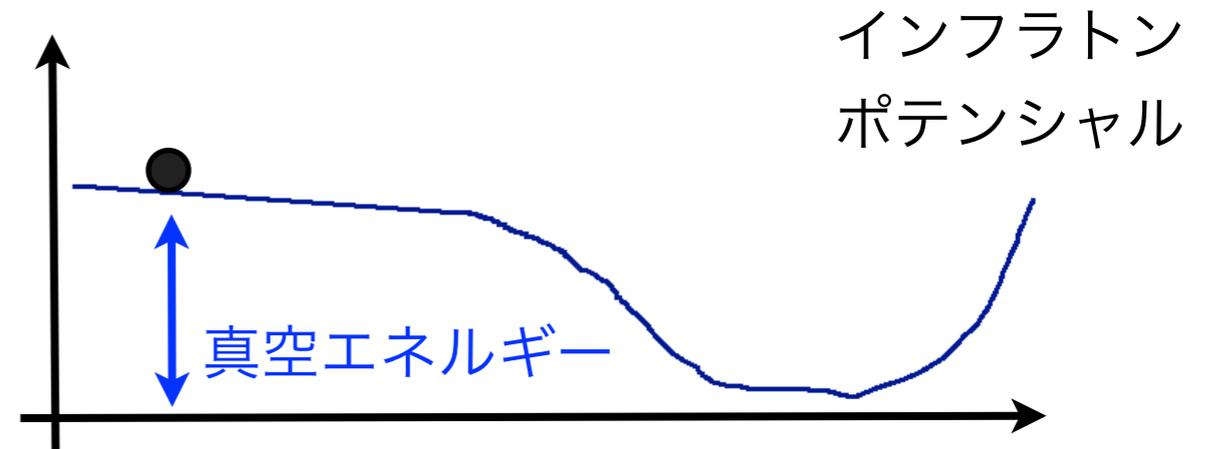
インフレーション：

宇宙の始まり：宇宙のエネルギーが真空のエネルギー
(=「インフラトン」のポテンシャルエネルギー)
に占められていた、と考える。

すると・・・

エネルギー密度 $\rho \sim \text{constant}$

scale factor $a \propto e^{H_i t}$ (指数関数的膨張 = インフレーション)

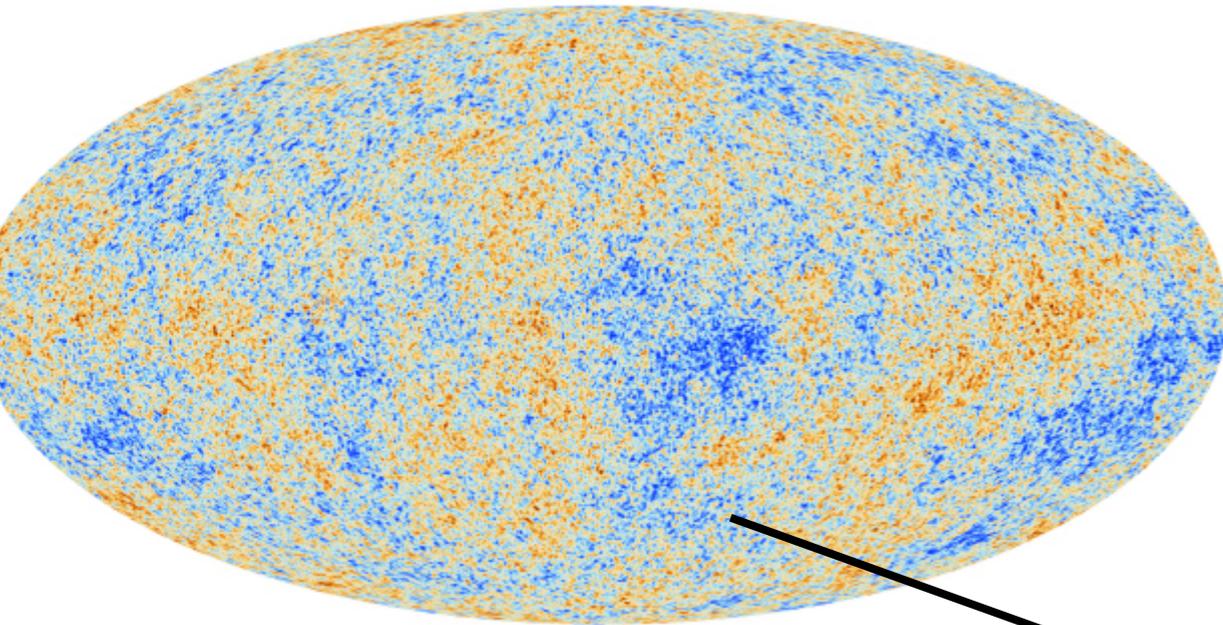


$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto e^{-2H_i t}$$

自動的に $\Omega = 1$ (平坦な宇宙) に tune してくれる！

しかも・・・

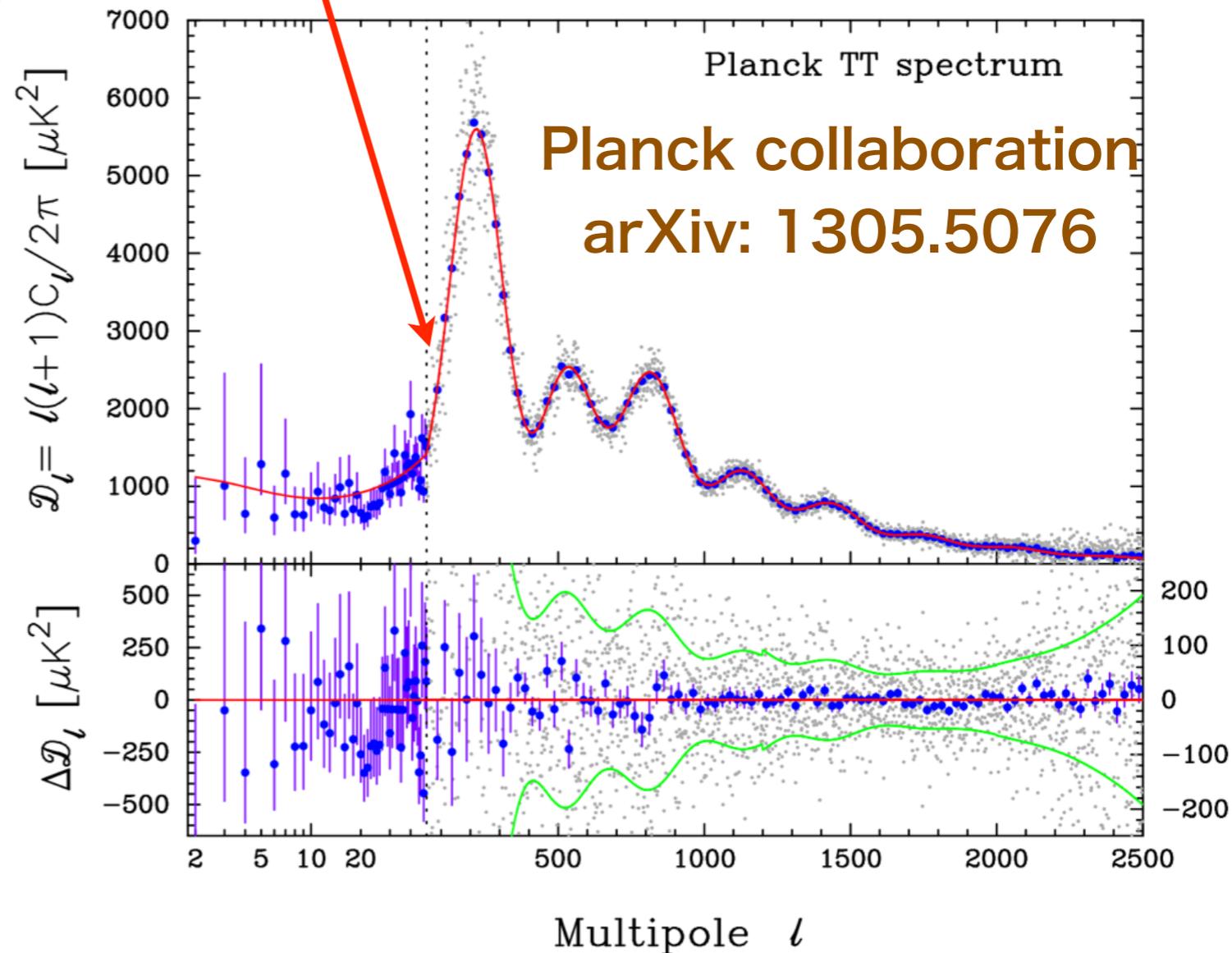
温度ゆらぎ



球面調和関数で展開

<http://sci.esa.int/planck/>

インフレーションの予言する
“scale invariant” な初期ゆらぎで
非常によくフィット出来ている!
(パラメータ数個)



陽子崩壊 ?!

大統一理論

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題

地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

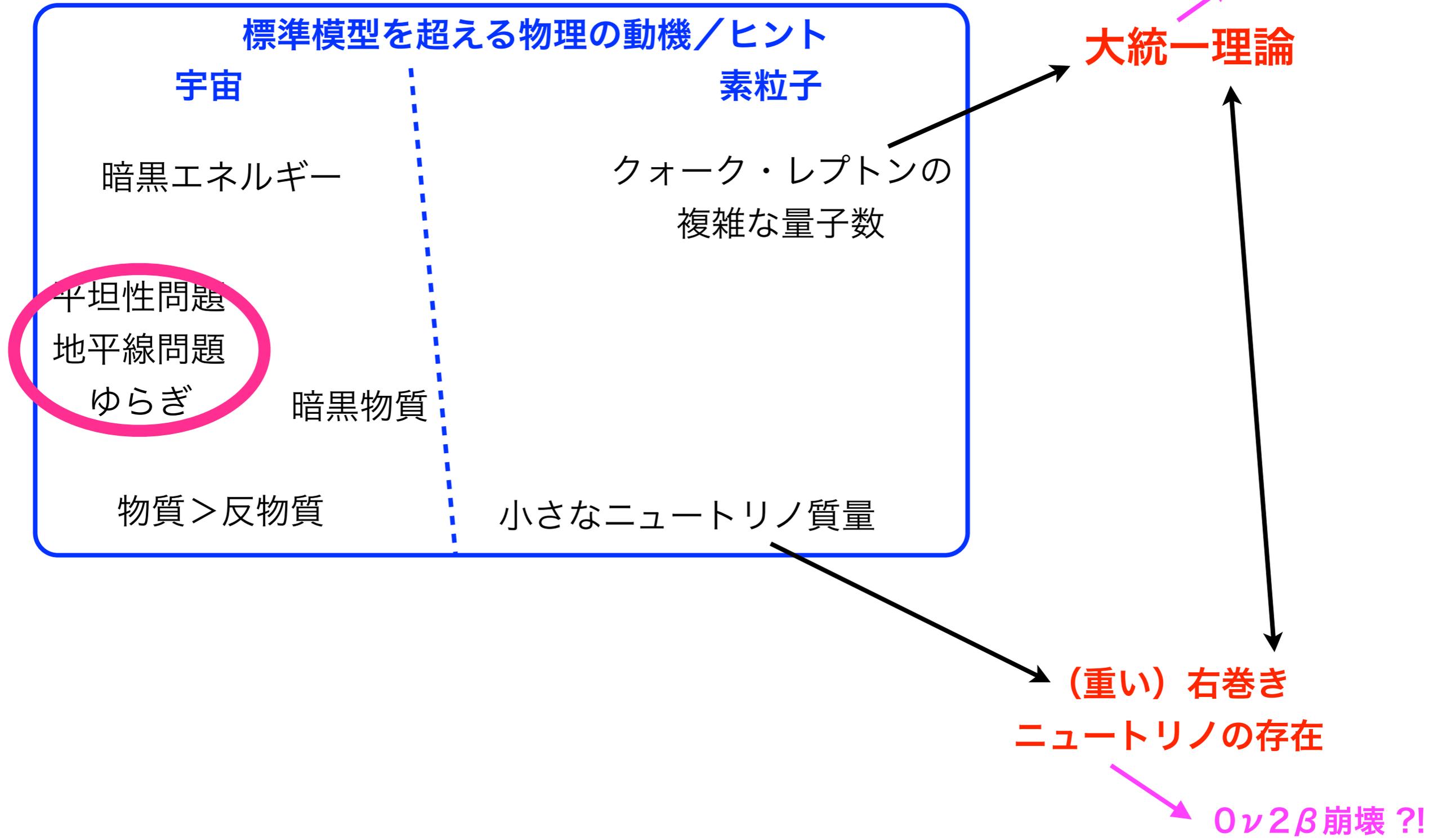
物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

次は . . .

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

次は . . .

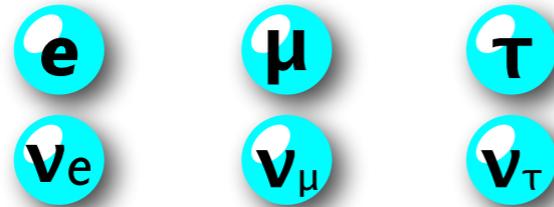
全ての素粒子には

粒子

クォーク



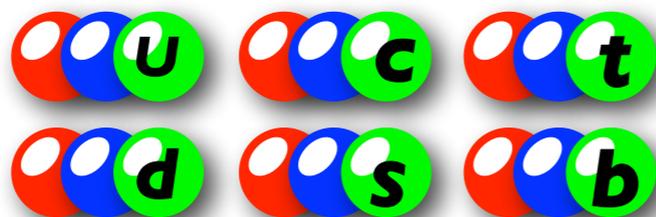
レプトン



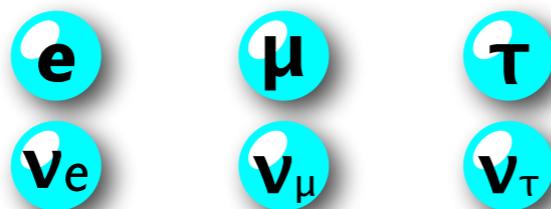
全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

粒子

クォーク



レプトン



反粒子

反クォーク



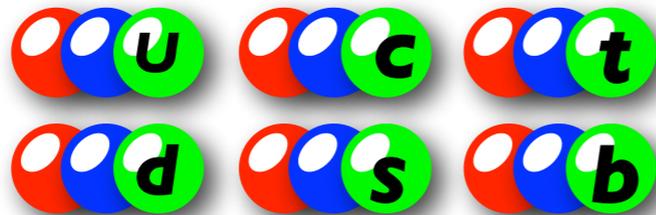
反レプトン



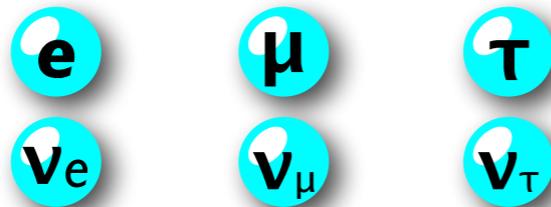
全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

粒子

クォーク



レプトン



反粒子



反クォーク



反レプトン

粒子と反粒子は、重さが全く同じで反対の電荷を持つ。

電子



電荷 マイナス

反粒子

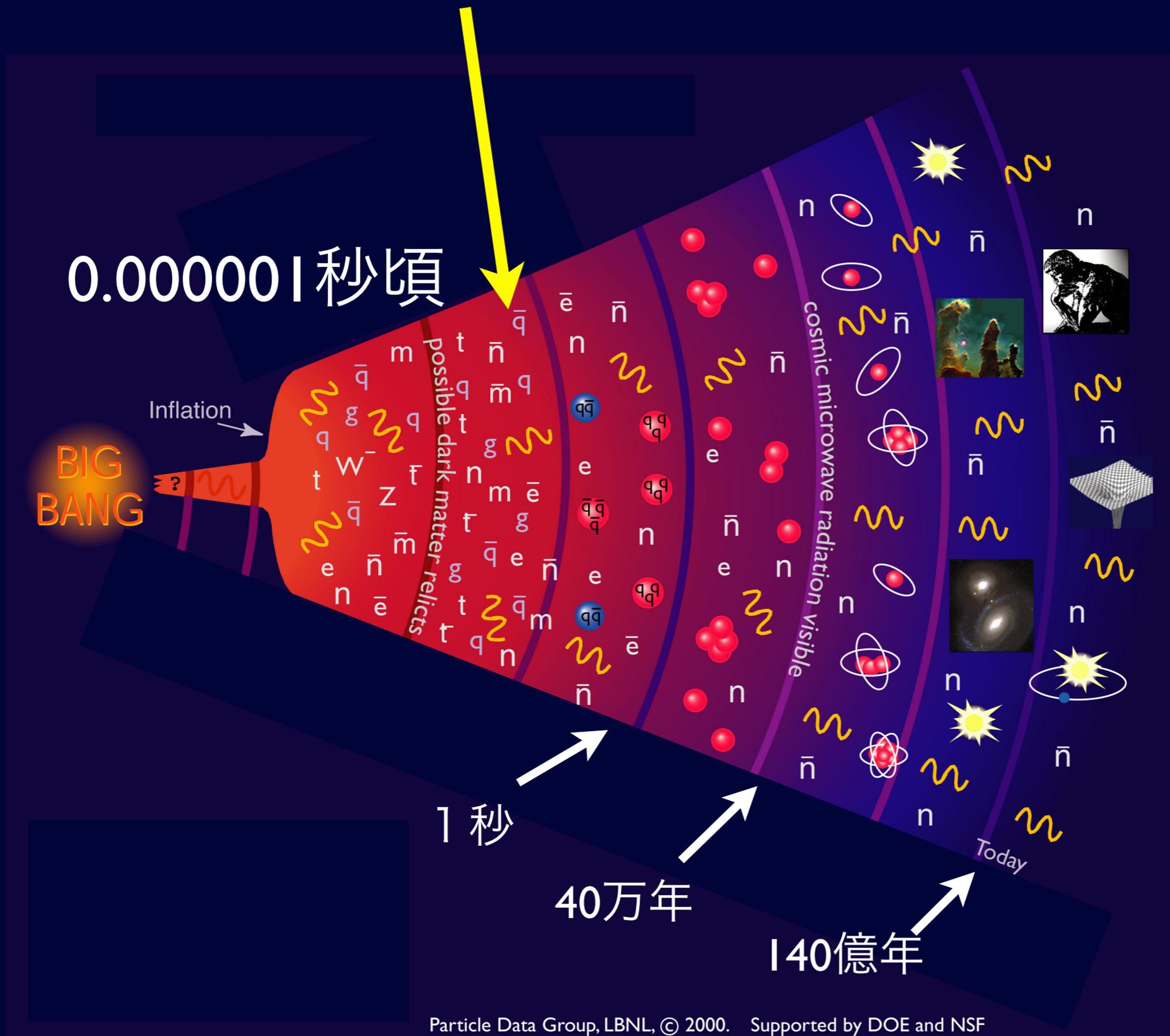


陽電子



電荷 プラス

宇宙のずっと始めの頃は . . .

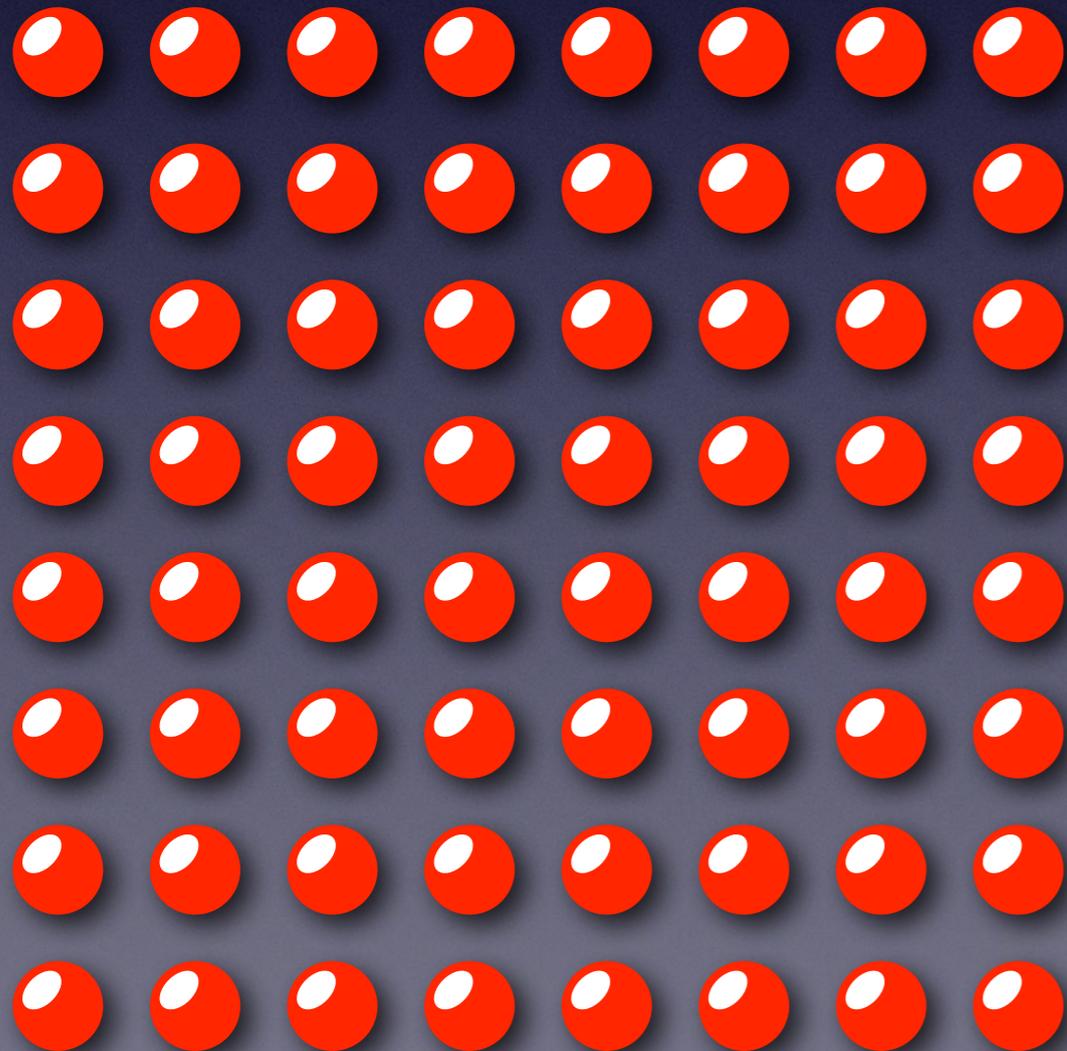


Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

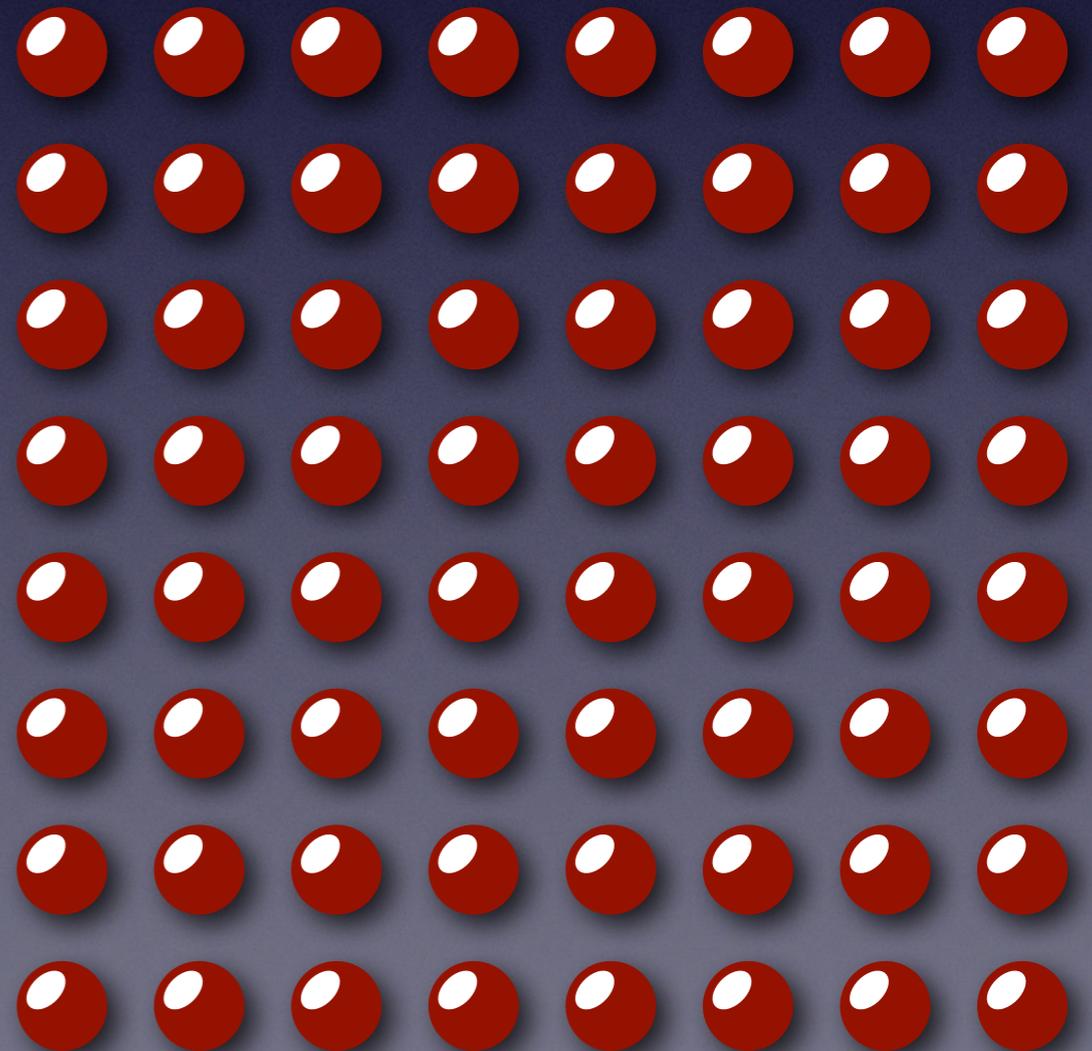
http://pdg.ge.infn.it/particleadventure/frameless/chart_cutouts/universe_original.pdf

宇宙のずっと始めの頃は・・・
物質と反物質がほぼ同数あった。

物質



反物質



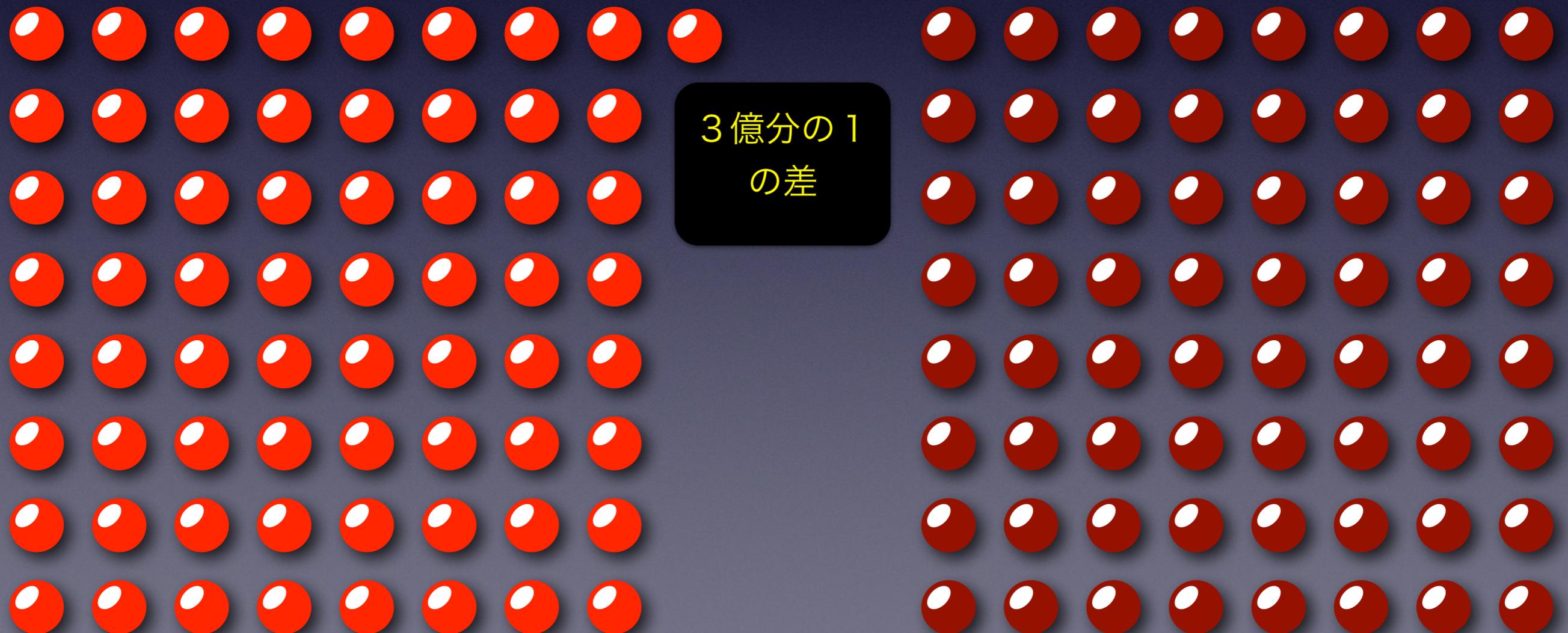
宇宙のずっと始めの頃は・・・

物質と反物質がほぼ同数あった。

ただし物質の方がほんの少しだけ多かった。

物質

反物質

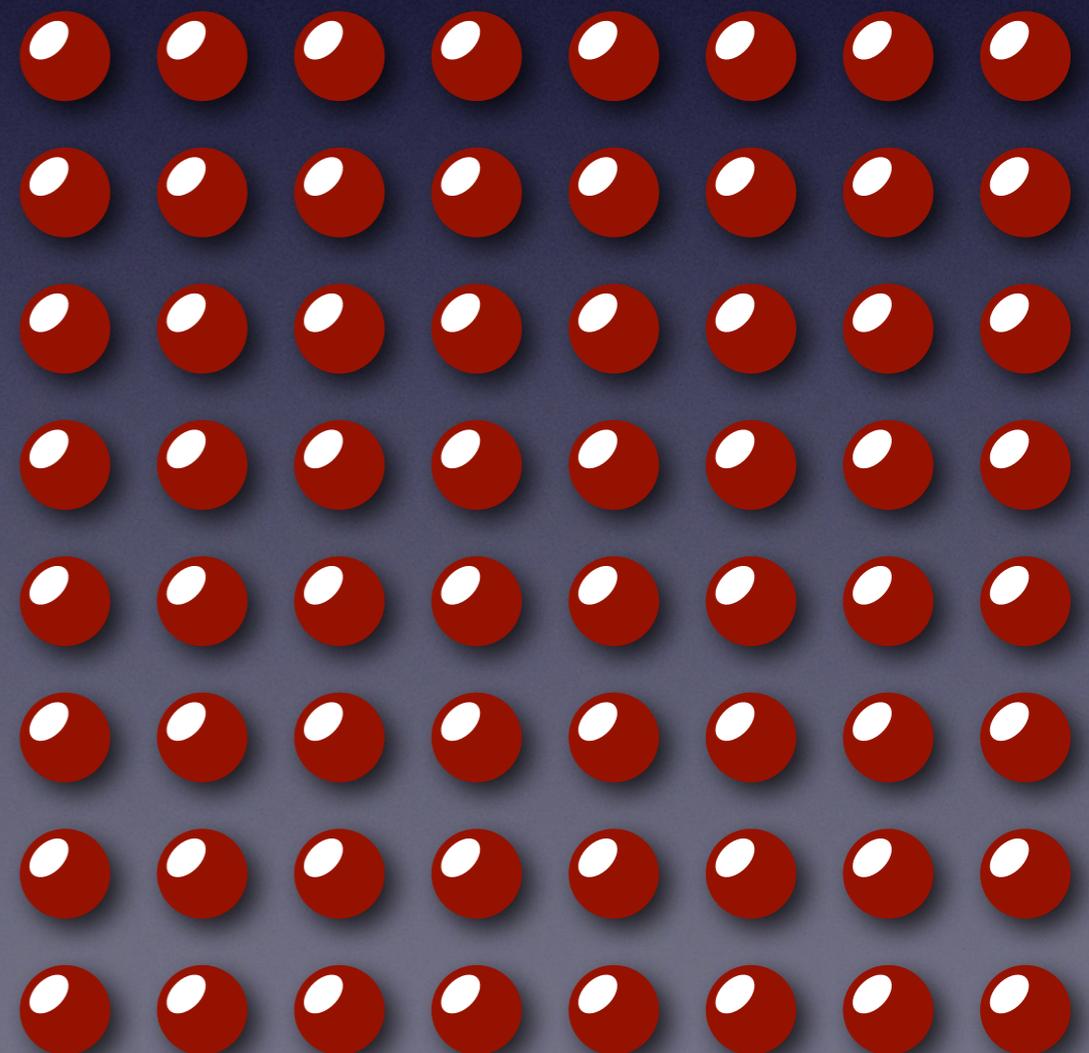


宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

反物質



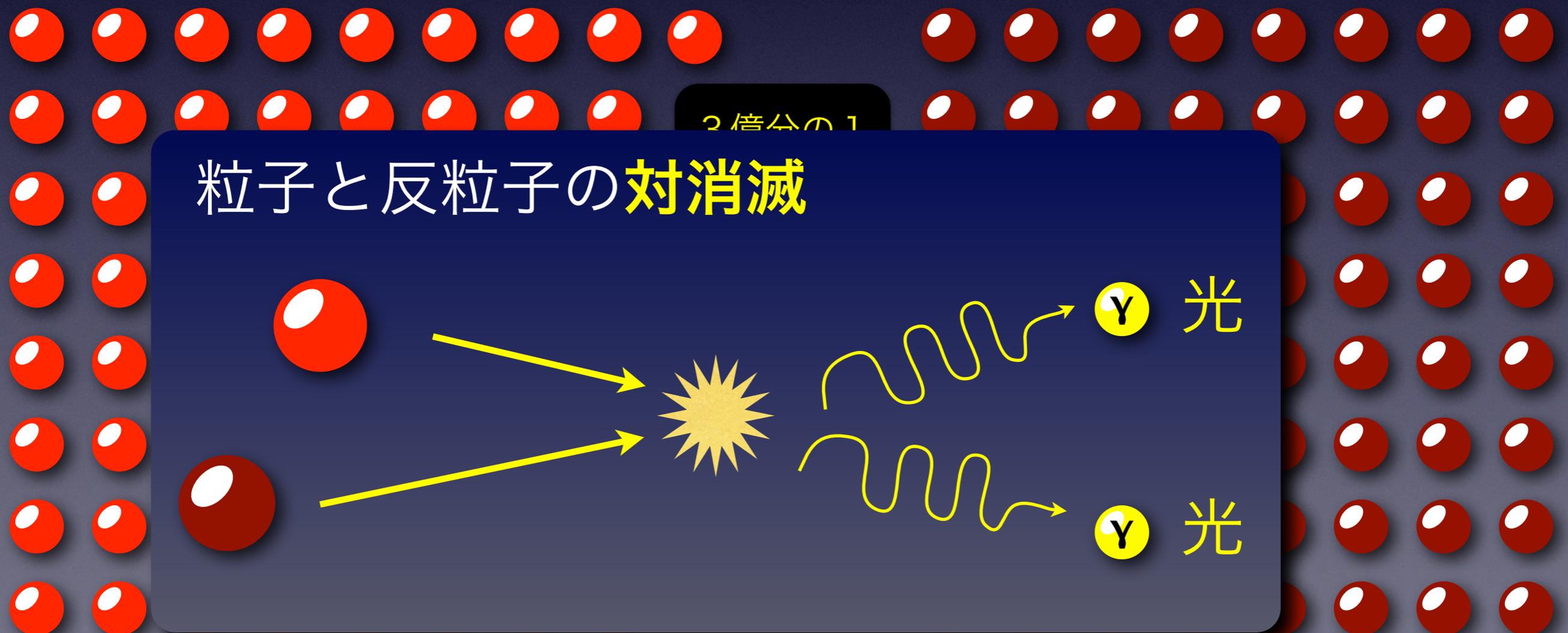
3億分の1
の差

宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

反物質



宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

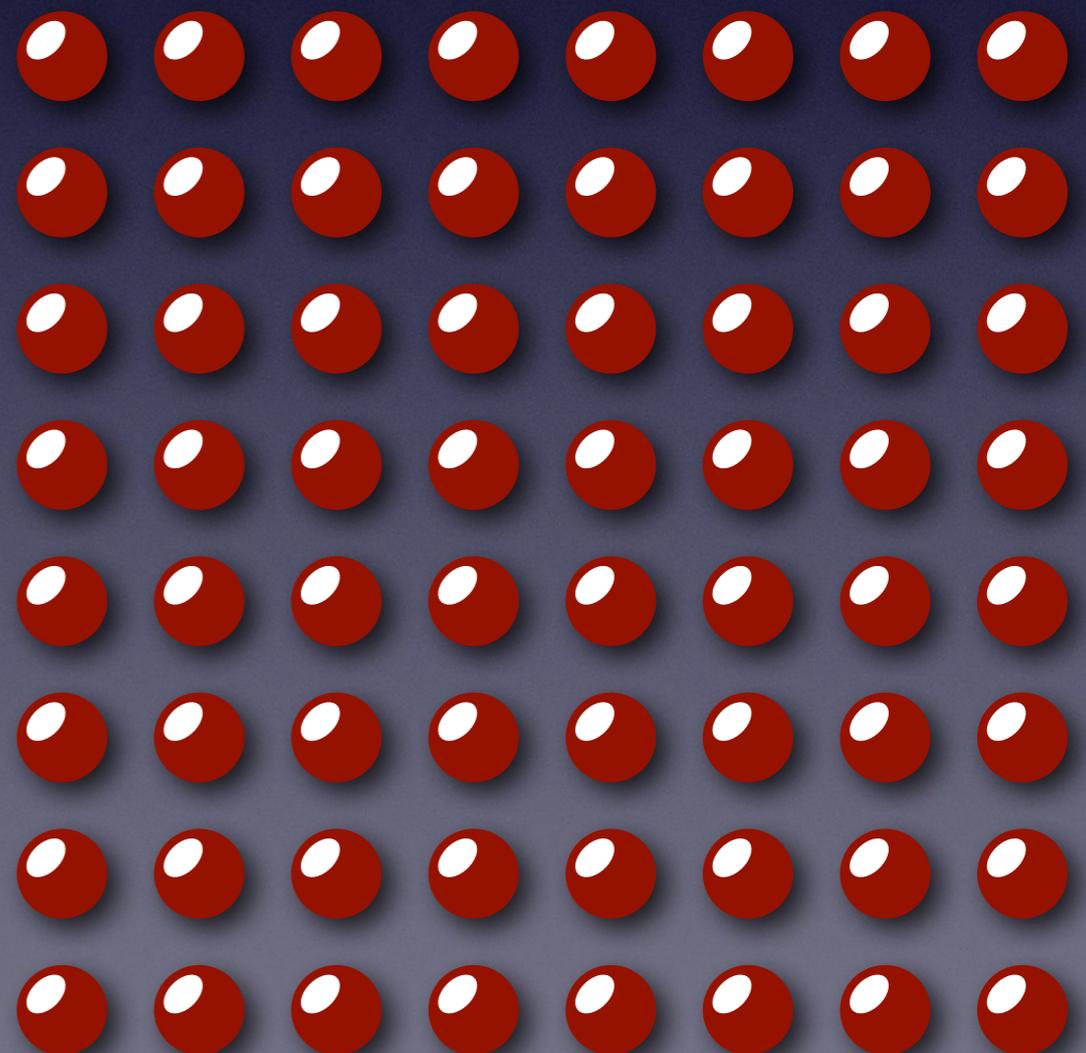
やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

反物質



3億分の1
の差



宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

反物質



宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質だけが残った



(反物質は消滅)



我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）

この残った物質で出来ている！



最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？



物質

反物質



謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

物質

反物質



3億分の1
の差

最初っから
あったんじゃない？

謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

物質

反物質



3億分の1
の差

最初っから
あったんじゃない？

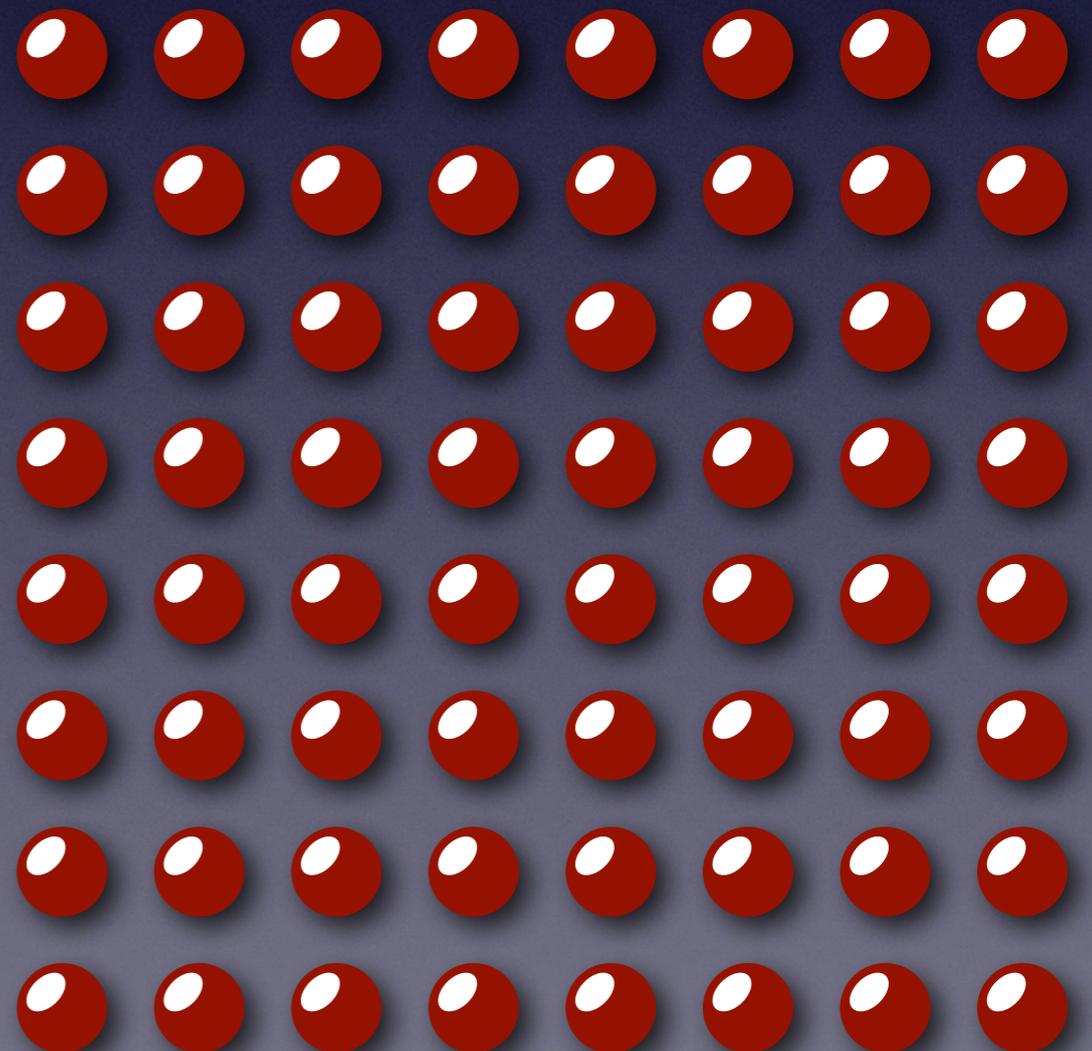
そうはいかないんです。

謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

物質

反物質

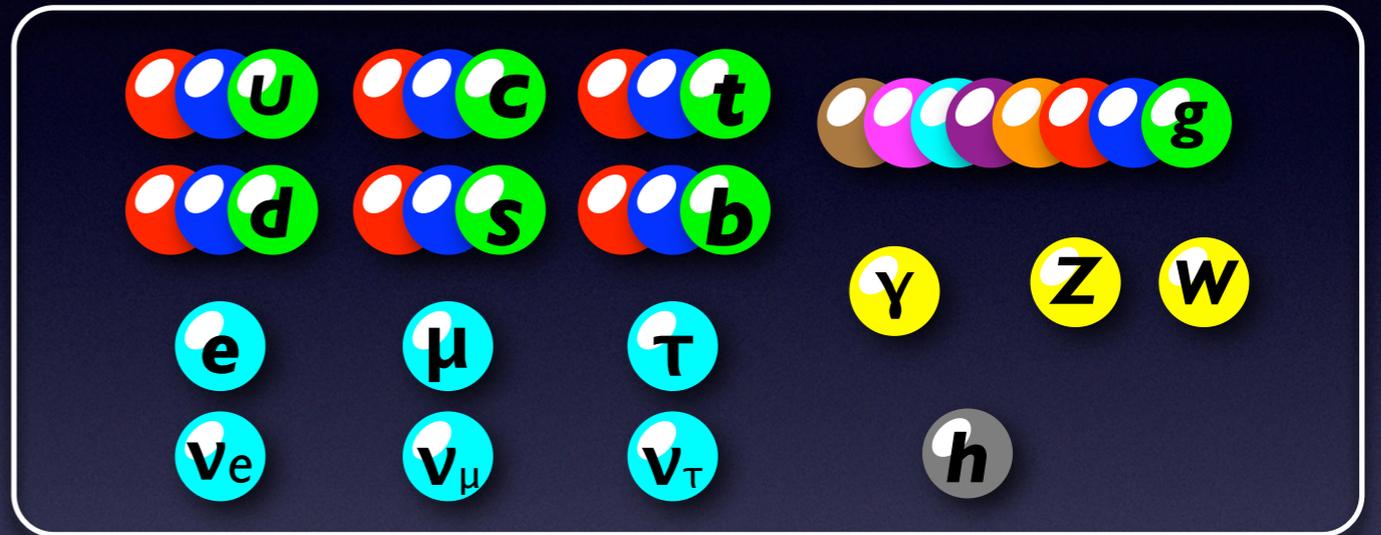


3億分の1
の差

謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

実は . . . **標準模型**



では **物質 > 反物質の起源**は説明出来ない
と考えられている。

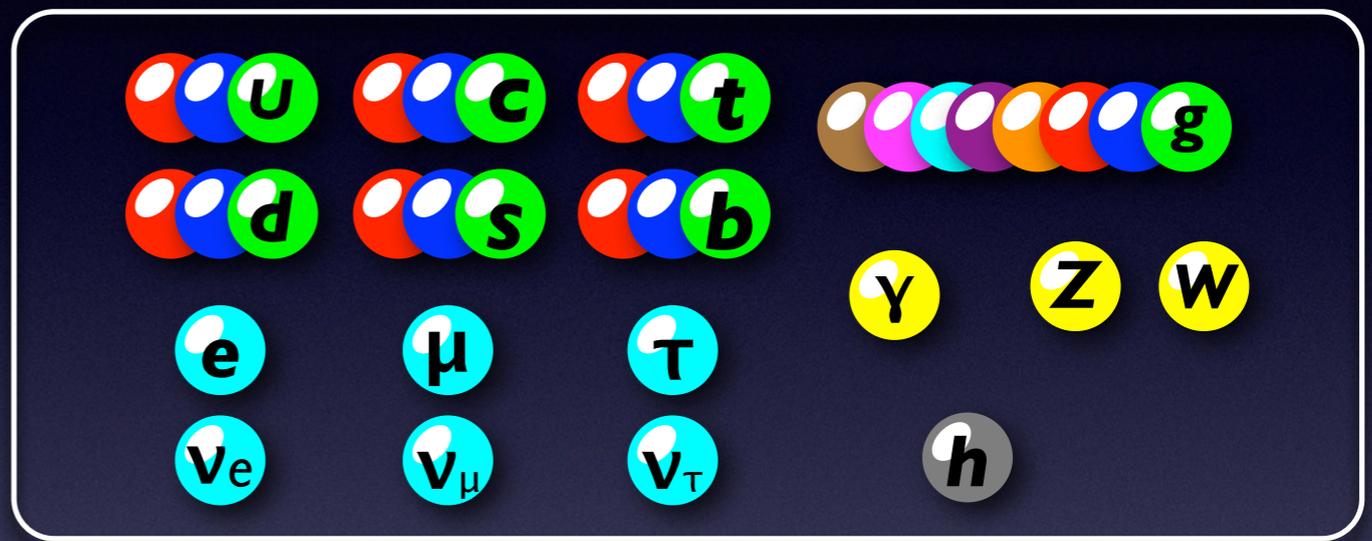
理由1 : 標準模型のCPの破れでは**足りない**。

理由2 : 物質 > 反物質に必要な**非平衡**が出来ない。



最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

実は・・・ **標準模型**



では **物質 > 反物質の起源は説明出来ず**
と考えられている

標準模型を超える素粒子理論が必要！

理由1 物質 > 反物質の破れでは足りない。

理由2 物質 > 反物質に必要な**非平衡**が出来ない。

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

バリオン生成

(重い) 右巻き

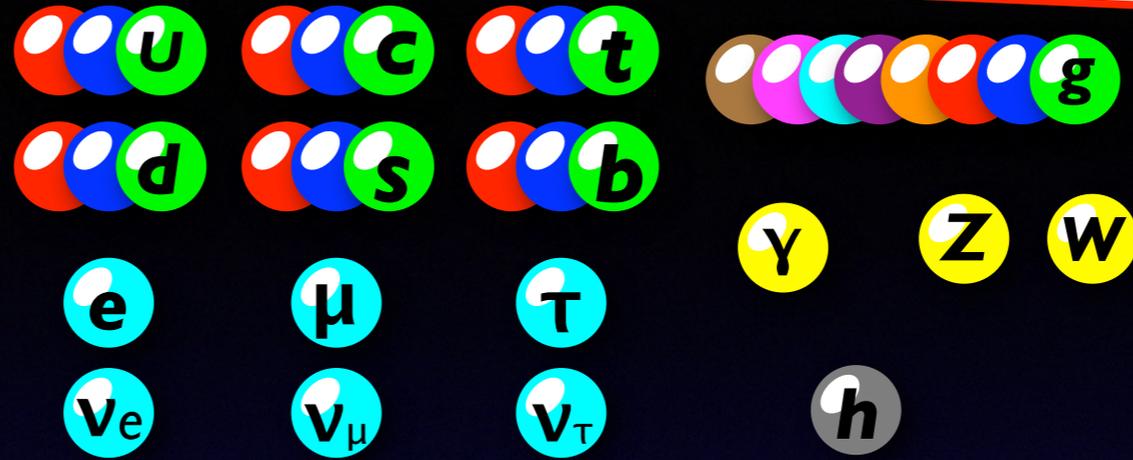
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

物質 > 反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

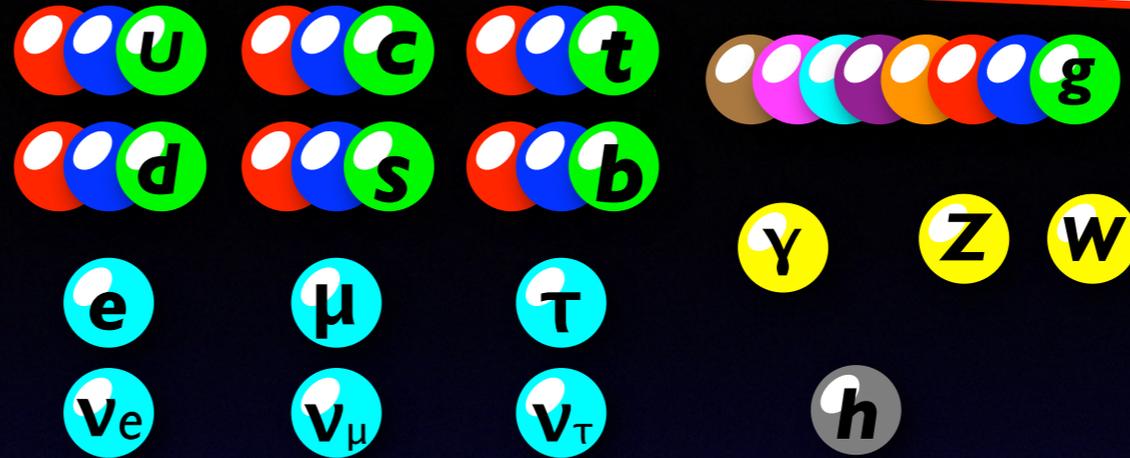
標準模型



物質 > 反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型

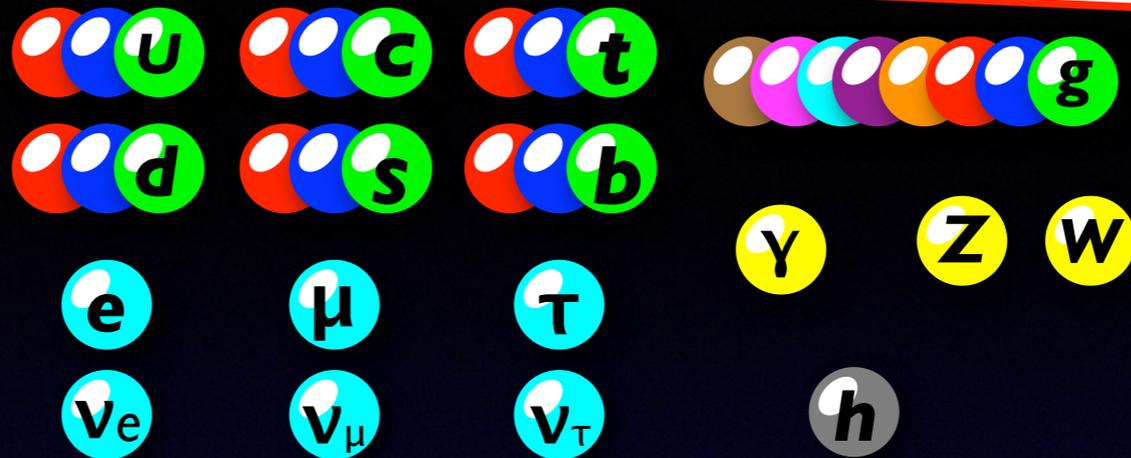


- 最有力候補の1つ：右巻きニュートリノ (←また！)

物質 > 反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型



+



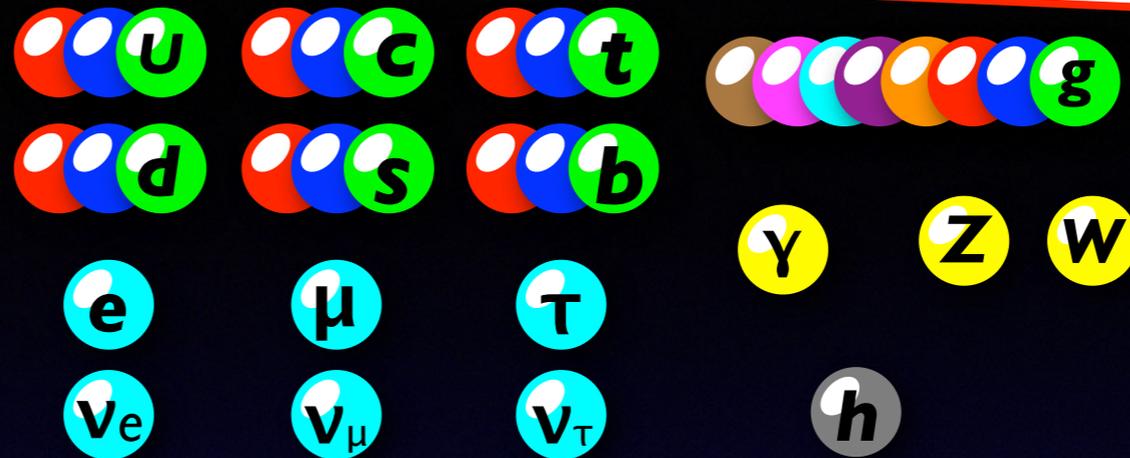
右巻きニュートリノ

- 最有力候補の1つ：右巻きニュートリノ (←また！)

物質 > 反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型



右巻きニュートリノ

- 最有力候補の1つ：右巻きニュートリノ (←また！)

N_1 の崩壊 (CPを破っている) で

物質 > 反物質を説明. [レプトジェネシス] 福来・柳田 1986

物質 > 反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

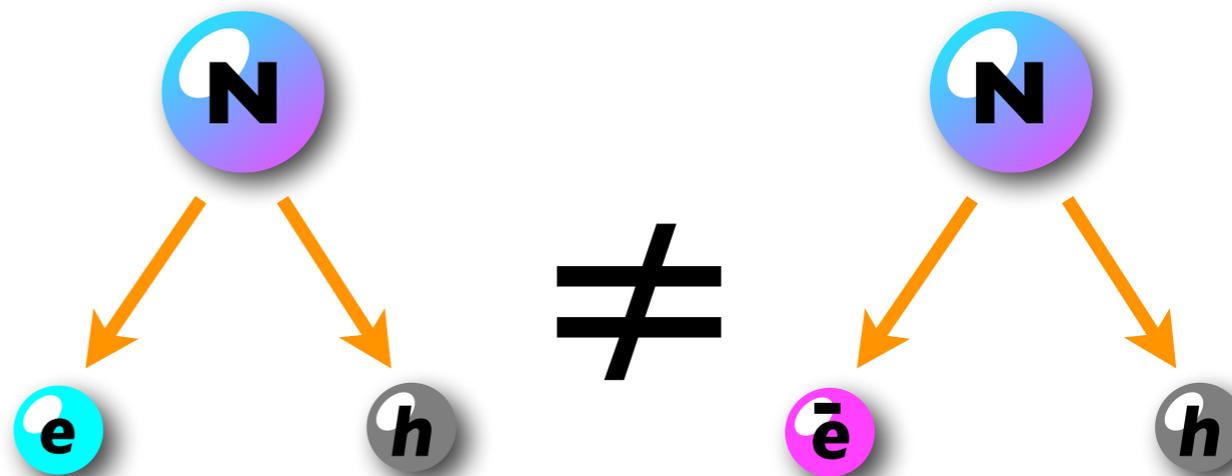
標準模型



+



レプトジェネシス



- 最有力候補の1つ：右巻

N_i の崩壊 (CPを破る)

物質 > 反物質を説明. [レプトジェネシス]

今も盛んに研究されている。

(私もたくさん論文書きました・・・。)

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

バリオン生成

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

陽子崩壊 ?!

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

小さなニュートリノ質量

大統一理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

陽子崩壊 ?!

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

大統一理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには N_1 の質量 > 10^9 GeV が必要。

(KH, Murayama, Yanagida,'01 + Davidson, Ibarra,'02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

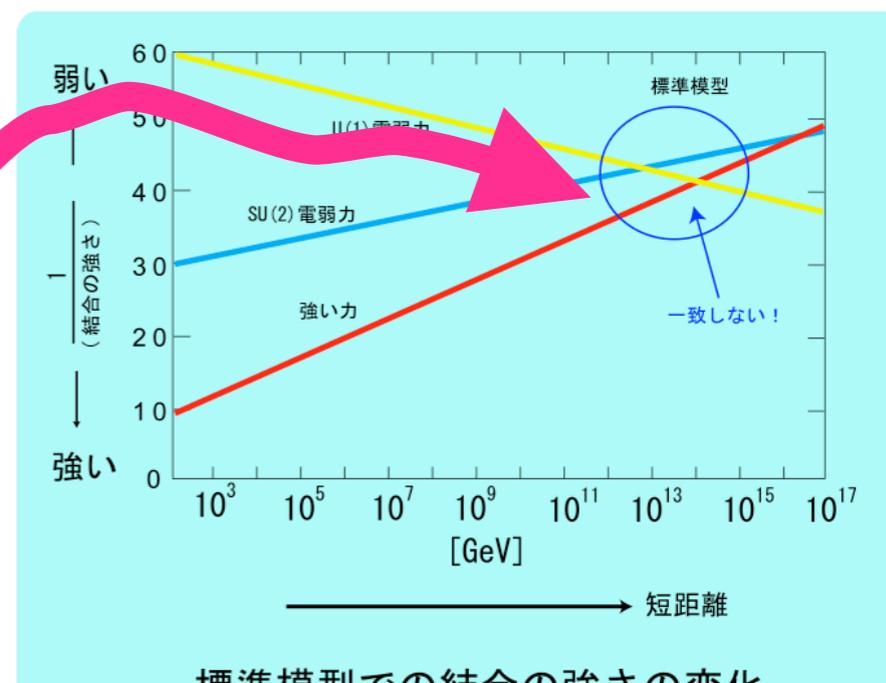
①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには **N_1 の質量 > 10^9 GeV** が必要。

(KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

②：大統一理論

大統一スケール = $10^{14} \sim 10^{16}$ GeV



ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

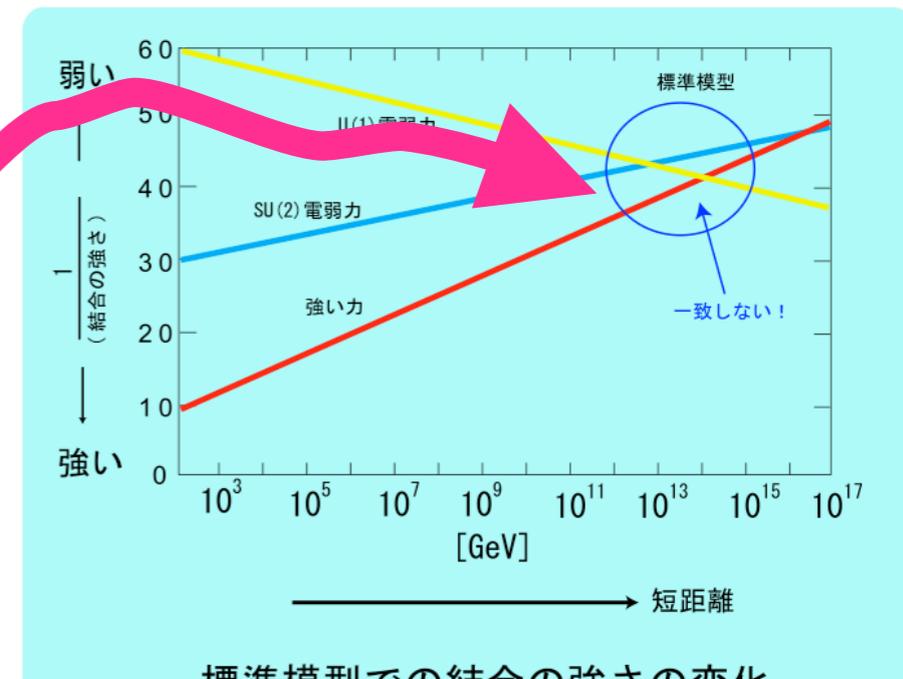
①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには **N_1 の質量 > 10^9 GeV** が必要。

(KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

②：大統一理論

大統一スケール = $10^{14} \sim 10^{16}$ GeV



③：インフレーション

・・・やはり高いスケールを要求。

例えば最もシンプルな“chaotic inflation”では

$$\text{インフラトン質量} \sim \text{プランクスケール} \times \frac{\delta T}{T} \sim 10^{13} \text{ GeV}$$

($\sim 10^{18}$ GeV) (温度ゆらぎ $\sim 10^{-5}$)

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには N_1 の質量 > 10^9 GeV が必要。

(KH, Murayama, Yanagida,'01 + Davidson, Ibarra,'02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには N_1 の質量 > 10^9 GeV が必要。

(KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

→ 少なくとも 10^9 GeV までは場の量子論で記述されているだろう。

すると・・・

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには **N_1 の質量 > 10^9 GeV** が必要。

(KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

→ 少なくとも 10^9 GeV までは**場の量子論**で記述されているだろう。

すると・・・

謎 ヒッグス場に対する量子効果

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$



(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質 > 反物質を説明するには N_1 の質量 > 10^9 GeV が必要。

(KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02 : ただし最もシンプルなシナリオの場合)

→ 少なくとも 10^9 GeV までは場の量子論で記述されているだろう。

すると・・・

謎 ヒッグス場に対する量子効果

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$



(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

この謎の解の最有力候補が・・・

超対称性 ボゾンとフェルミオンを入れ替える対称性

Supersymmetry (SUSY)

		spin		
quarks q	$\frac{1}{2}$	\longleftrightarrow	0	squarks \tilde{q}
leptons ℓ	$\frac{1}{2}$	\longleftrightarrow	0	sleptons $\tilde{\ell}$
gauge bosons A_μ	1	\longleftrightarrow	$\frac{1}{2}$	gauginos λ
Higgs bosons H	0	\longleftrightarrow	$\frac{1}{2}$	higgsinos \tilde{h}

超対称性理論では

謎 ヒッグス場に対する量子効果

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$

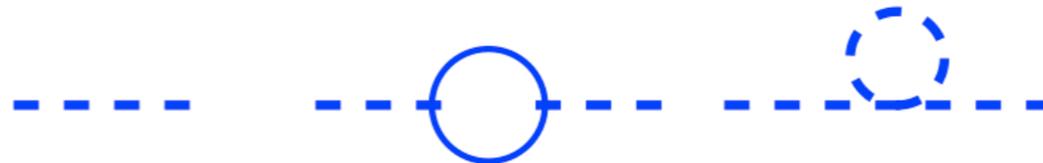


(fine tuning like 1.00000000000000000001 - 1)

超対称性なし

→ solved by the supersymmetry !

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + (\Lambda^2 - \Lambda^2)$$



フェルミオン

ボゾン

超対称性あり
問題解決！

謎 ヒッグス場に対する量子効果

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$

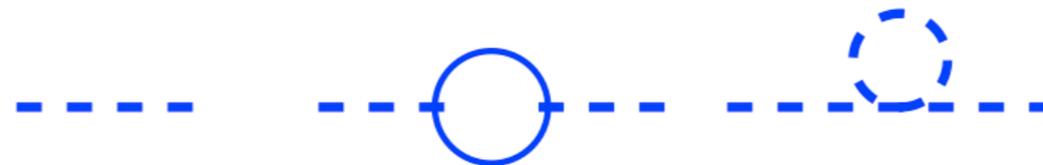


(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

超対称性なし

→ solved by the supersymmetry !

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + (\Lambda^2 - \Lambda^2)$$



フェルミオン

ボゾン

超対称性あり
問題解決!

fine tuning をほとんどなくするためには . . .

SUSY 粒子 < 0(TeV)

→ LHC での発見に期待していたが、 . . .

(SUSYは幻想だったのか? 重くて見えないのか? 巧妙に隠れているのか? . . . ???)

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ 暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

陽子崩壊 ?!

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

大統一理論

超対称性理論

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

collider実験
のターゲット

超対称性理論

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ 暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

collider実験
のターゲット

超対称性理論

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

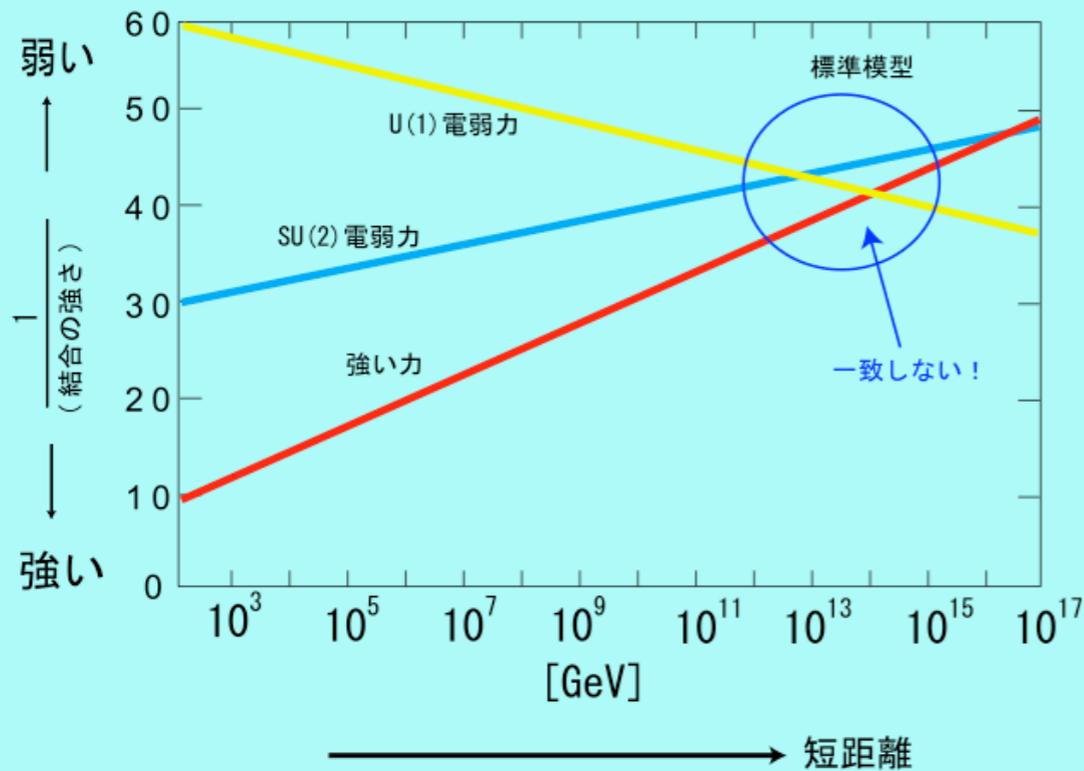
さらに . . .

大統一理論の予言：

もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致するはず。

標準模型



標準模型での結合の強さの変化

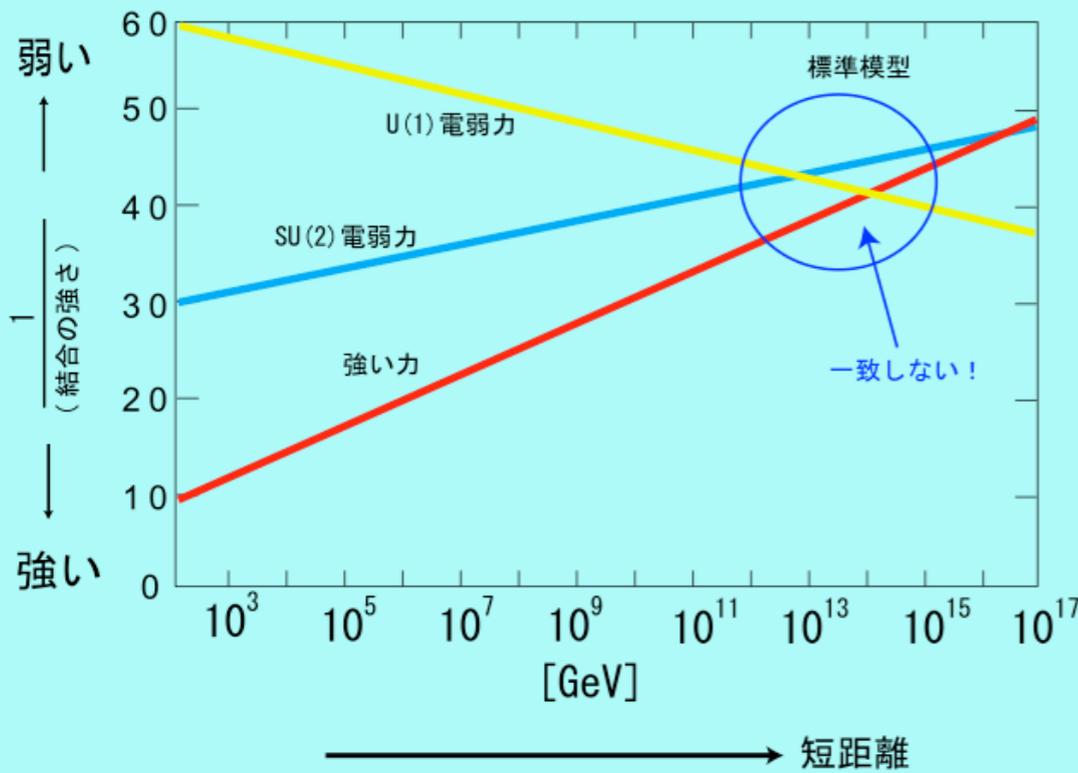
標準模型では短距離にいったときに、結合の強さが一致しません。
このままでは、大統一ができない！

大統一理論の予言：

もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致するはず。

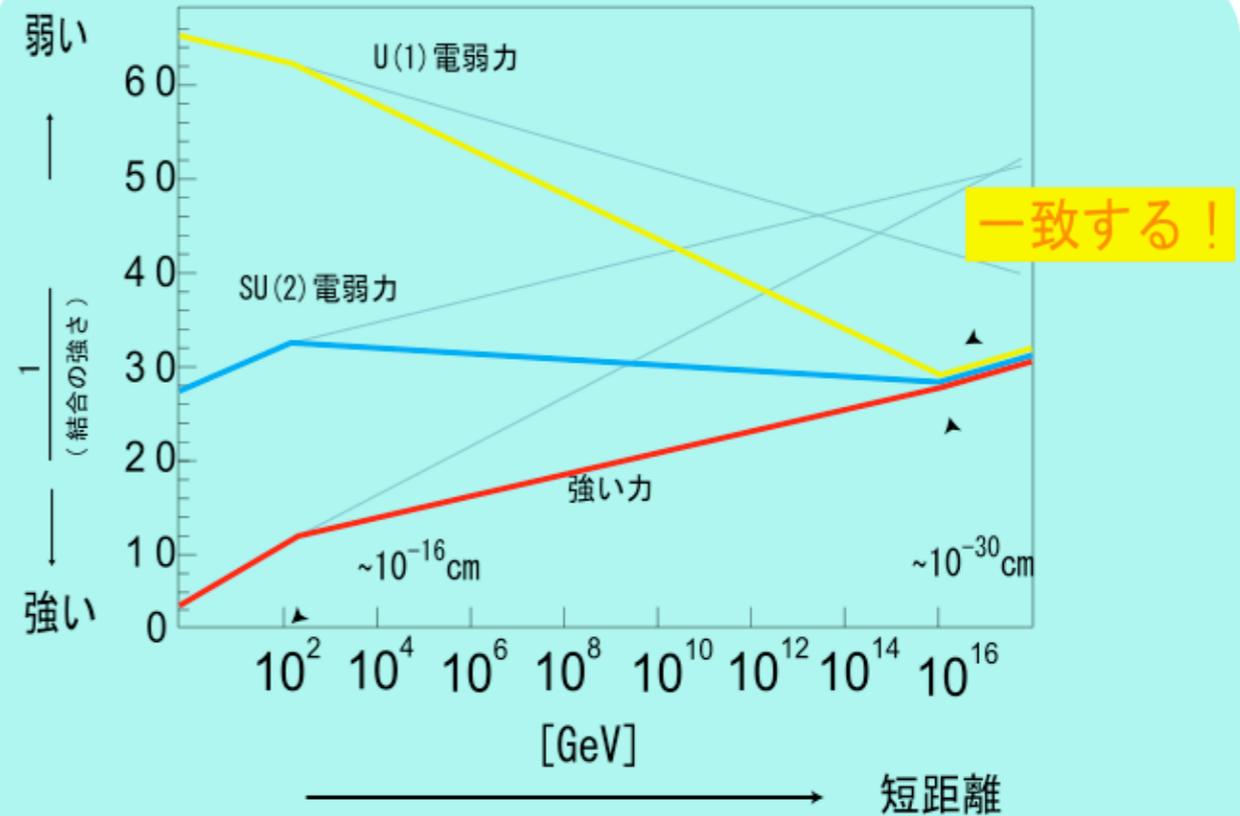
標準模型



標準模型での結合の強さの変化

標準模型では短距離にいったときに、結合の強さが一致しません。
このままでは、大統一ができません！

標準模型 + SUSY



超対称標準模型での結合の強さの大きさの変化

超対称標準模型では、スーパーパートナーが加わることで結合の強さが一致するようになります

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

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

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

大統一理論

collider実験
のターゲット

超対称性理論

インフレーション

バリオン生成

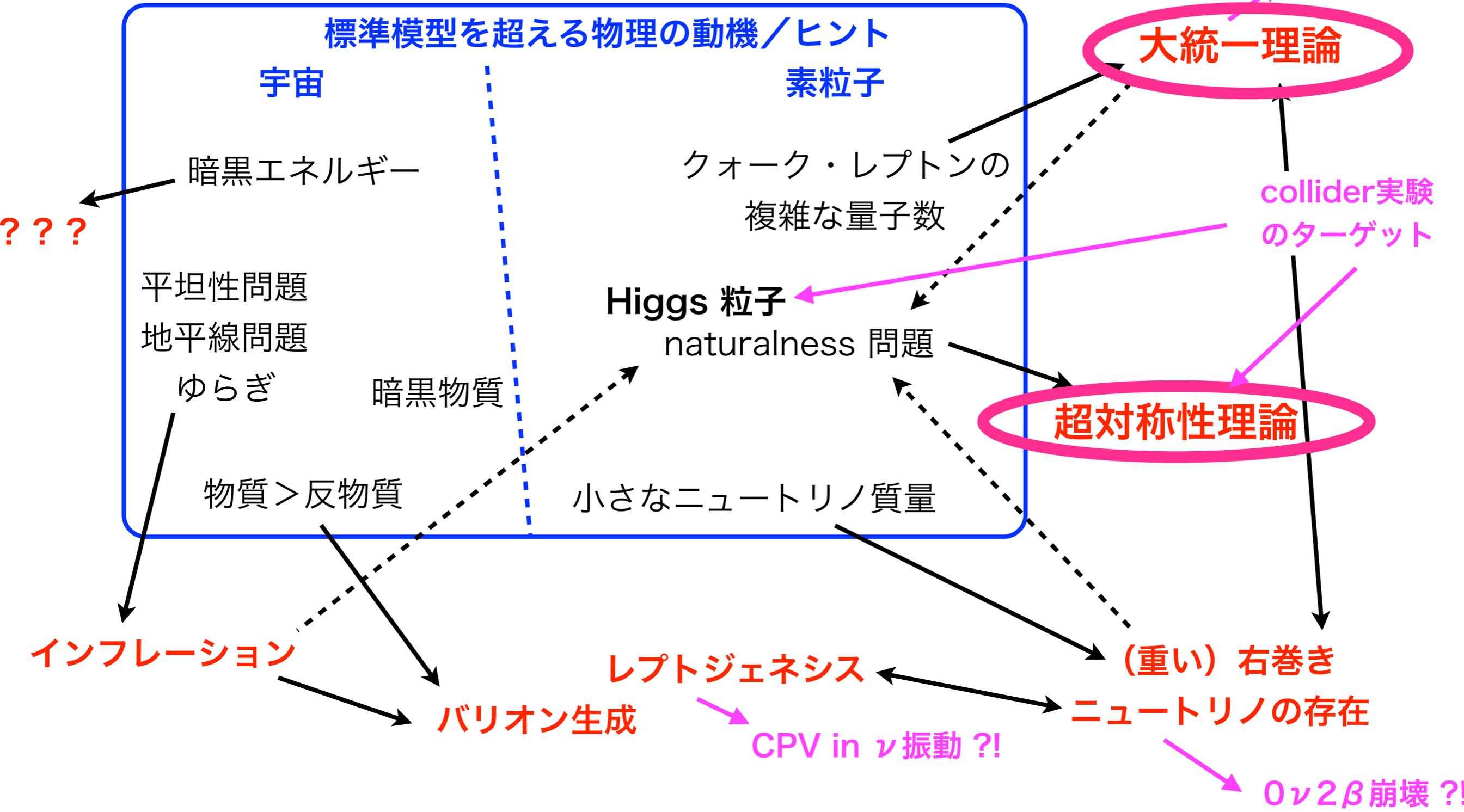
レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

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

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

大統一理論

超対称性理論

collider実験
のターゲット

インフレーション

バリオン生成

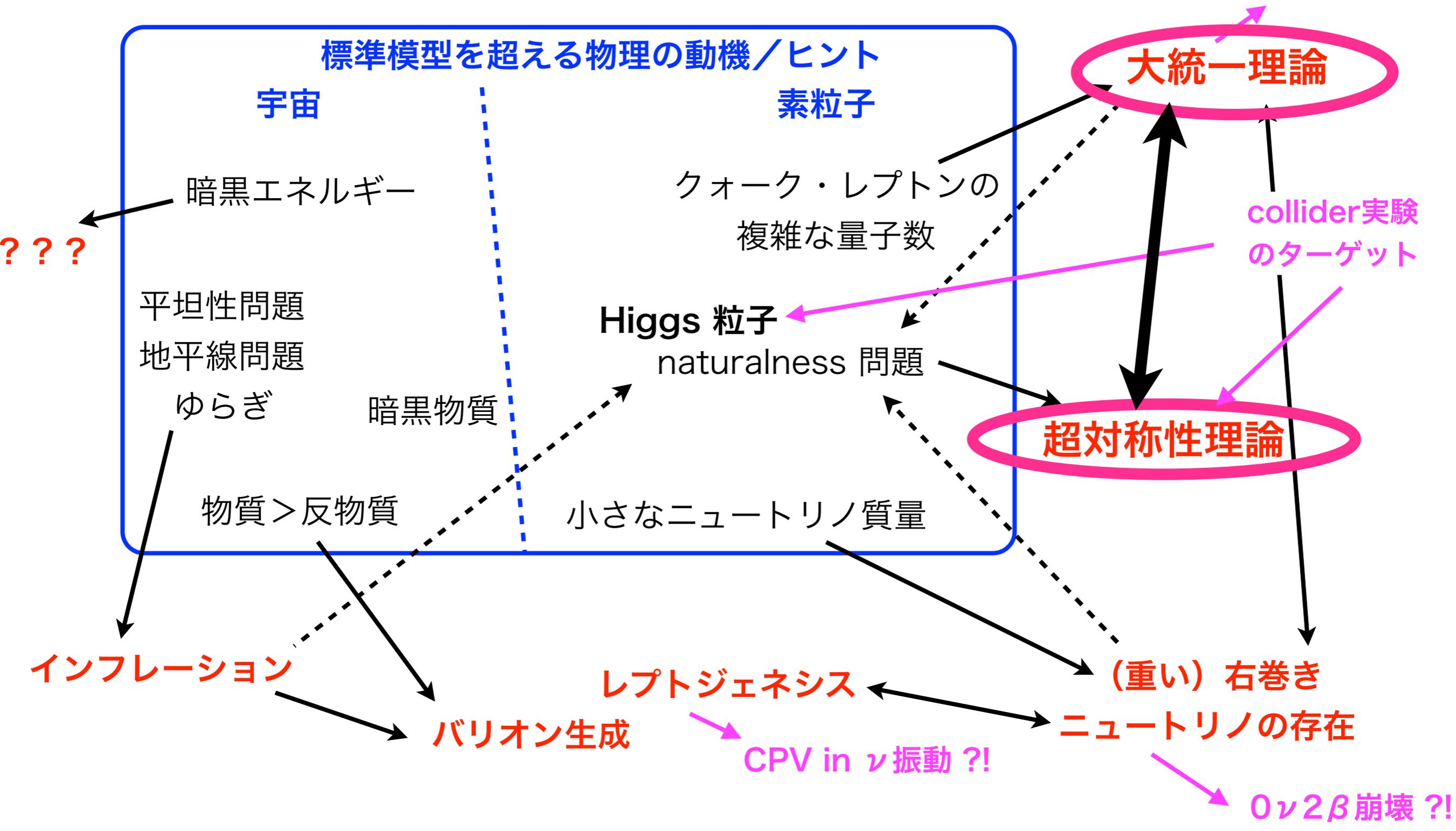
レプトジェネシス

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

CPV in ν 振動 ?!

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

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

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

大統一理論

超対称性理論

collider実験
のターゲット

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

CPV in ν 振動 ?!

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

さらにさらに . . .

???

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

大統一理論

collider実験
のターゲット

超対称性理論

陽子崩壊 ?!

インフレーション

バリオン生成

レプトジェネシス

CPV in ν 振動 ?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題

地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

Higgs 粒子

naturalness 問題

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

collider実験
のターゲット

陽子崩壊 ?!

超対称性理論

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

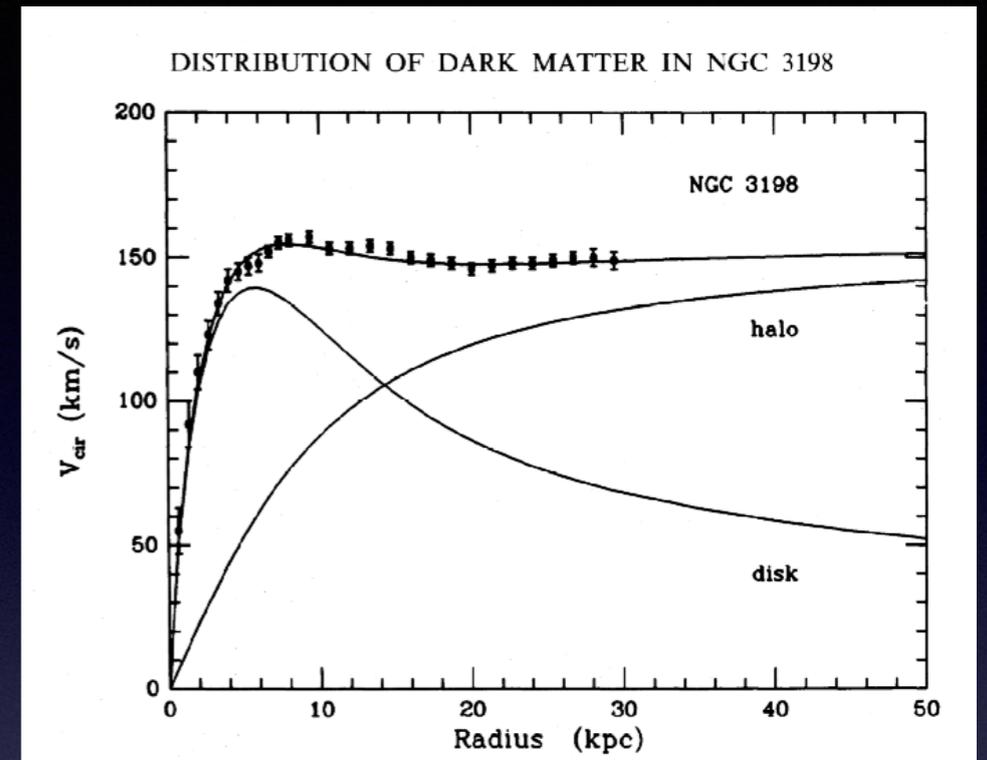
ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

暗黒物質：重力でしか見えない物質

正体は分からないけど、
存在するという証拠は
沢山ある・・・。

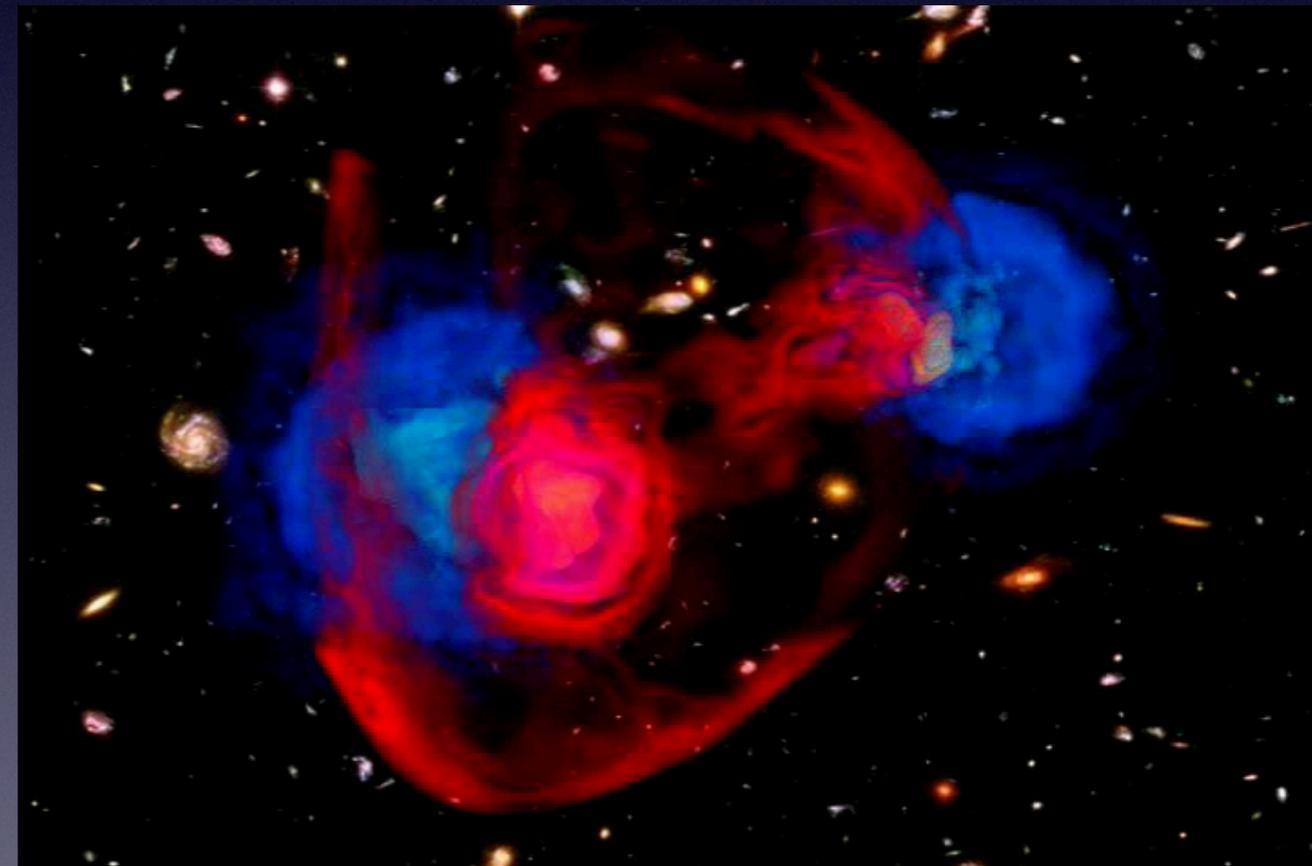
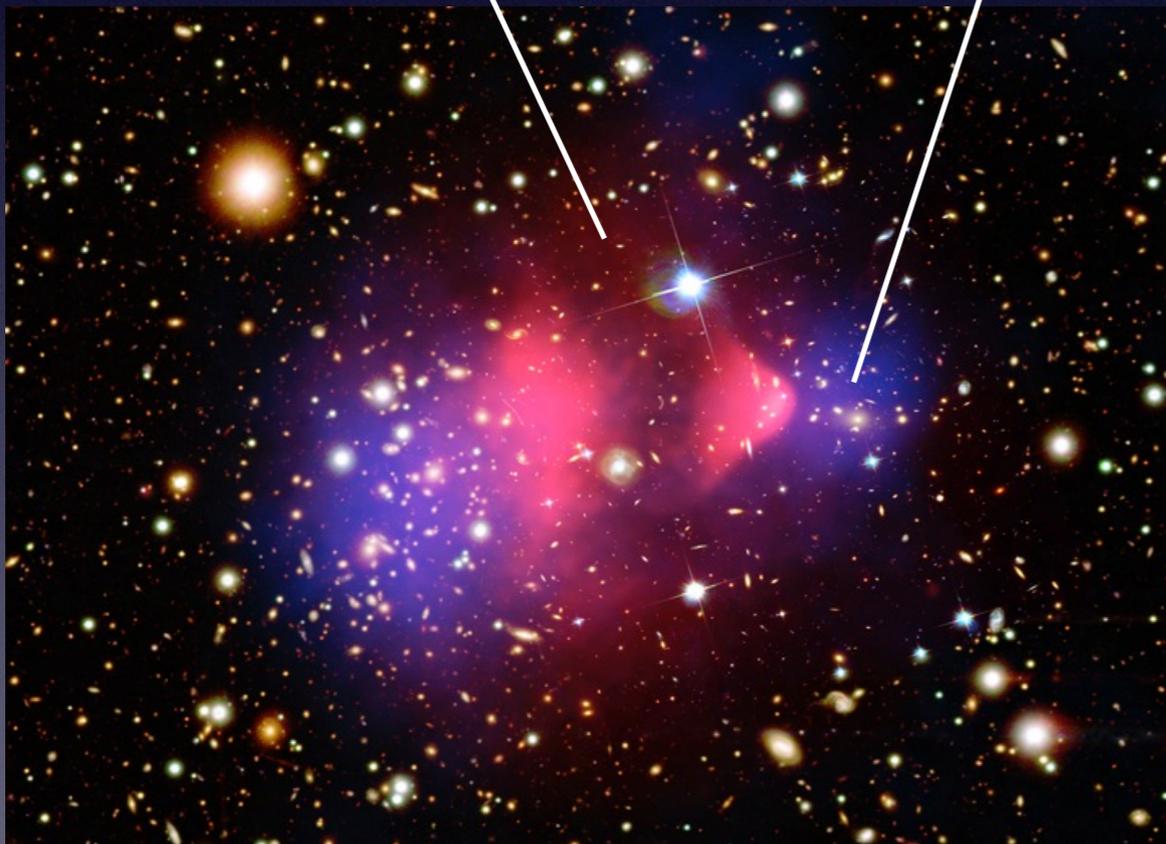
- 銀河の回転速度
- 宇宙背景放射の非等方性の精密測定
- 宇宙の構造形成
- . . .



暗黒物質：重力でしか見えない物質

X線で見た像
(ふつうの物質)

重力レンズで見た像
(暗黒物質)



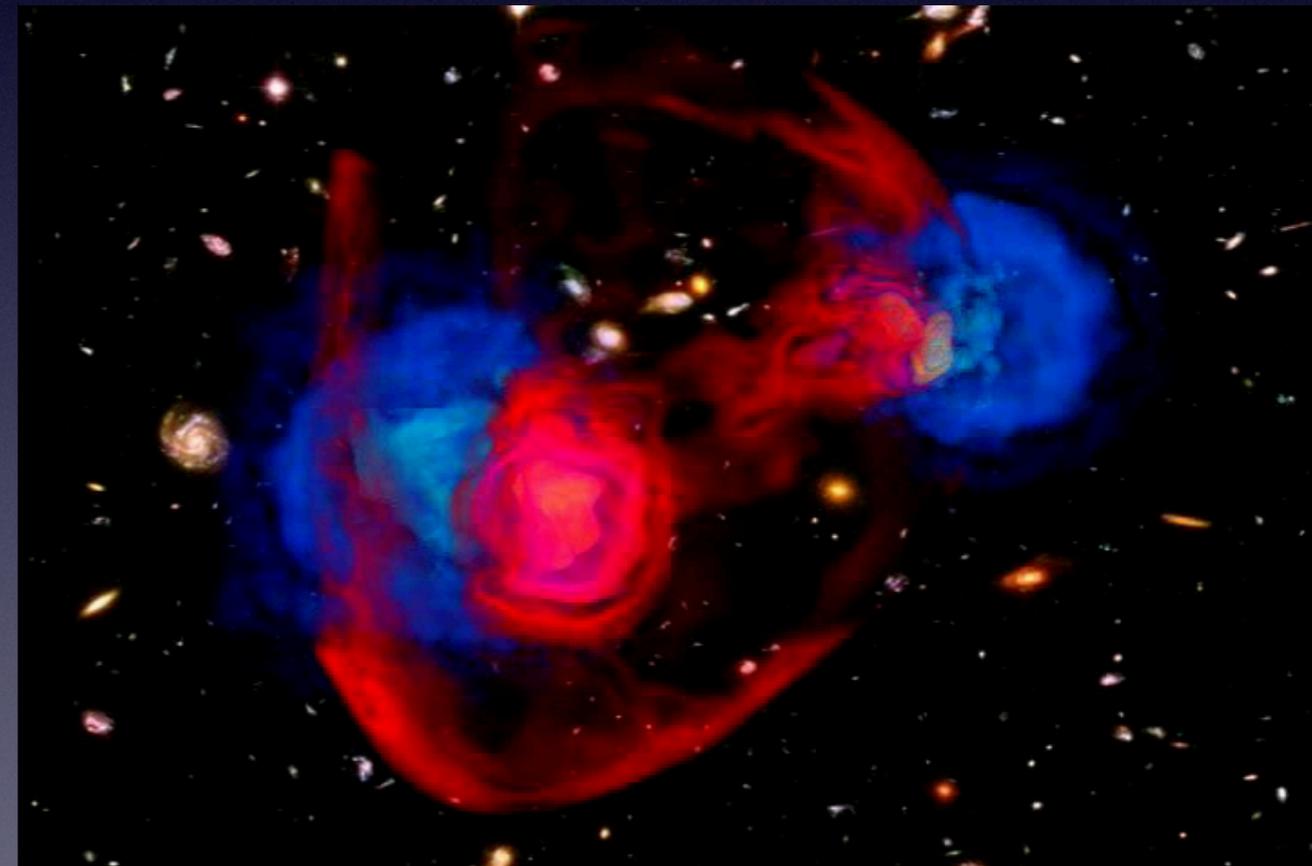
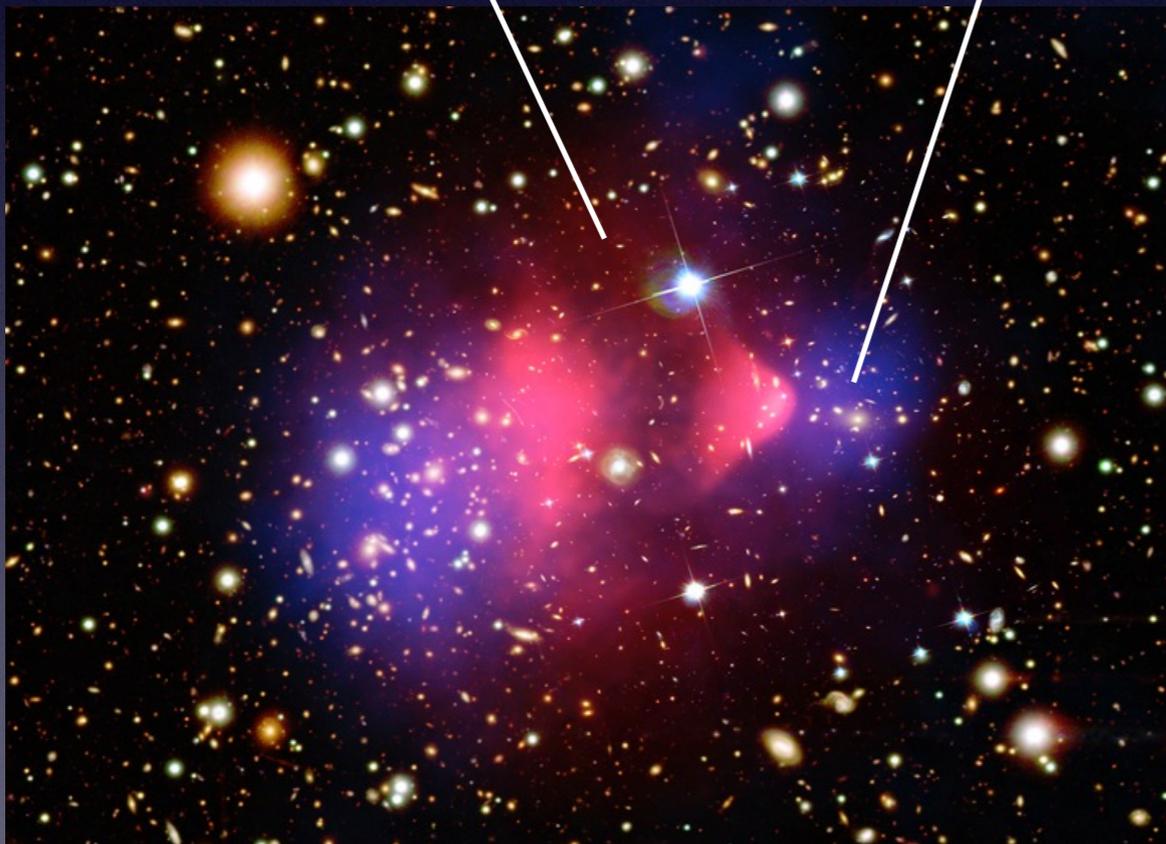
Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical:
NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map:
NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

Credit: J.Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)
[http://www.slac.stanford.edu/~jwise/research/
movies/HiResBullet.mov](http://www.slac.stanford.edu/~jwise/research/movies/HiResBullet.mov)

暗黒物質：重力でしか見えない物質

X線で見た像
(ふつうの物質)

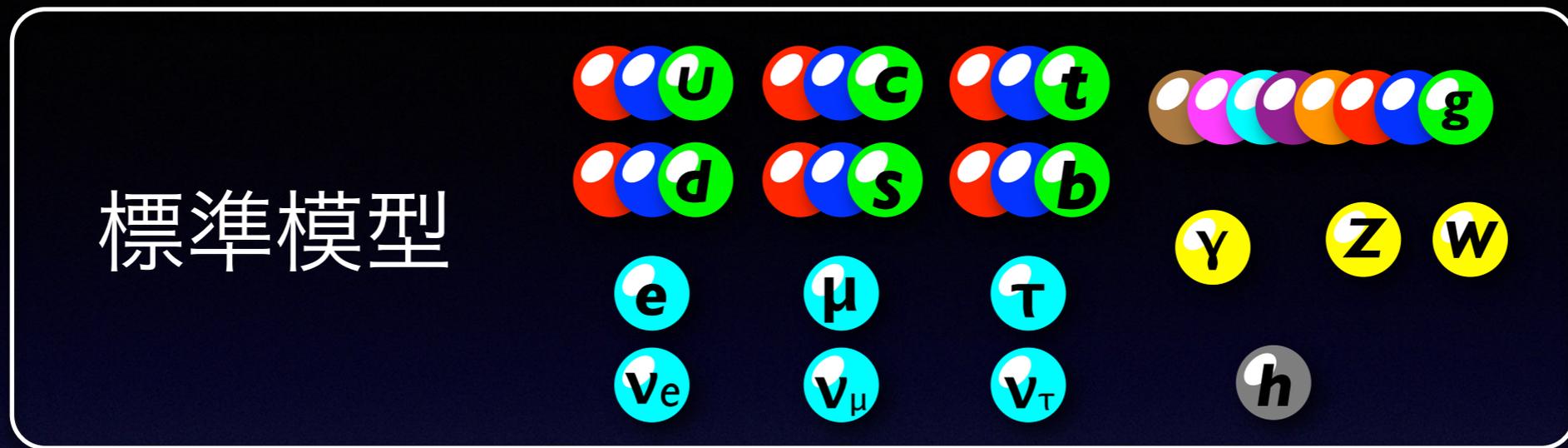
重力レンズで見た像
(暗黒物質)



Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical:
NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map:
NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

Credit: J.Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)
[http://www.slac.stanford.edu/~jwise/research/
movies/HiResBullet.mov](http://www.slac.stanford.edu/~jwise/research/movies/HiResBullet.mov)

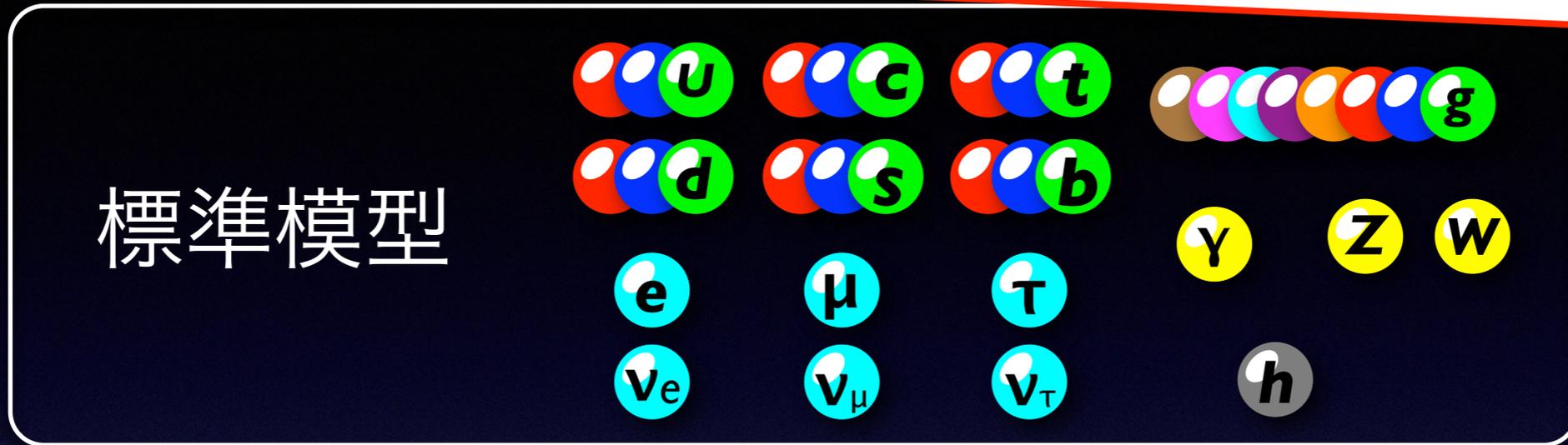
暗黒物質の正体



標準模型の中には暗黒物質になれる
粒子はない！！

暗黒物質の正体

標準模型を超える素粒子理論が必要！

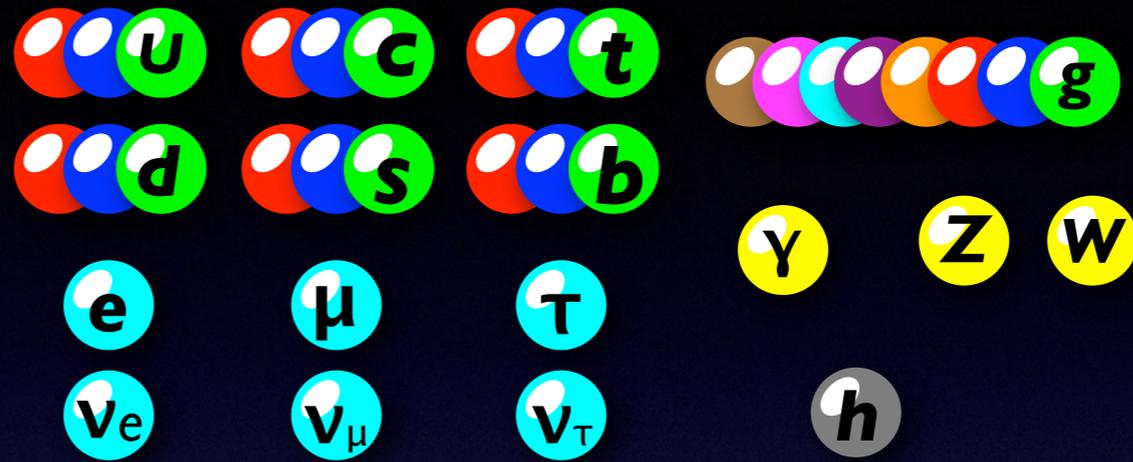


標準模型の中には暗黒物質になれる
粒子はない！！

暗黒物質の正体

標準模型を超える素粒子理論が必要！

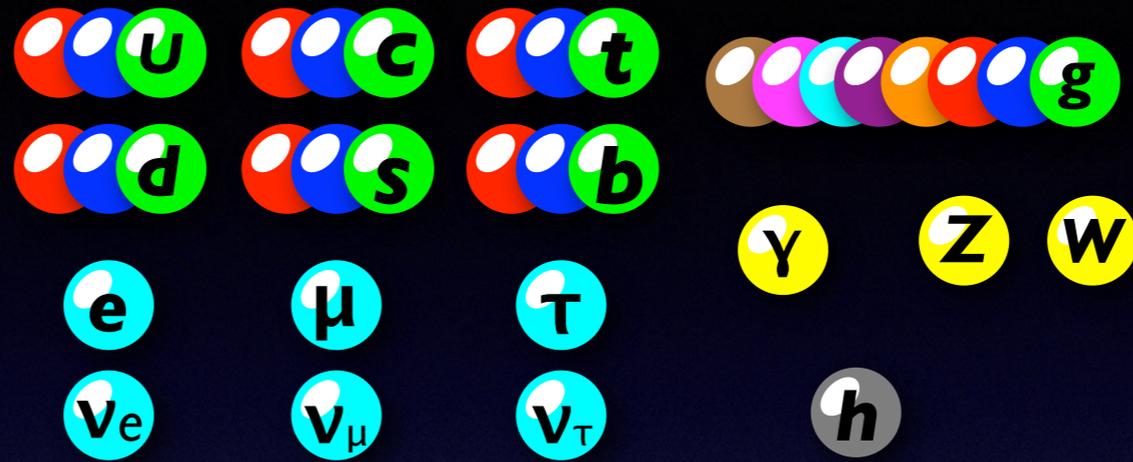
標準模型



暗黒物質の正体

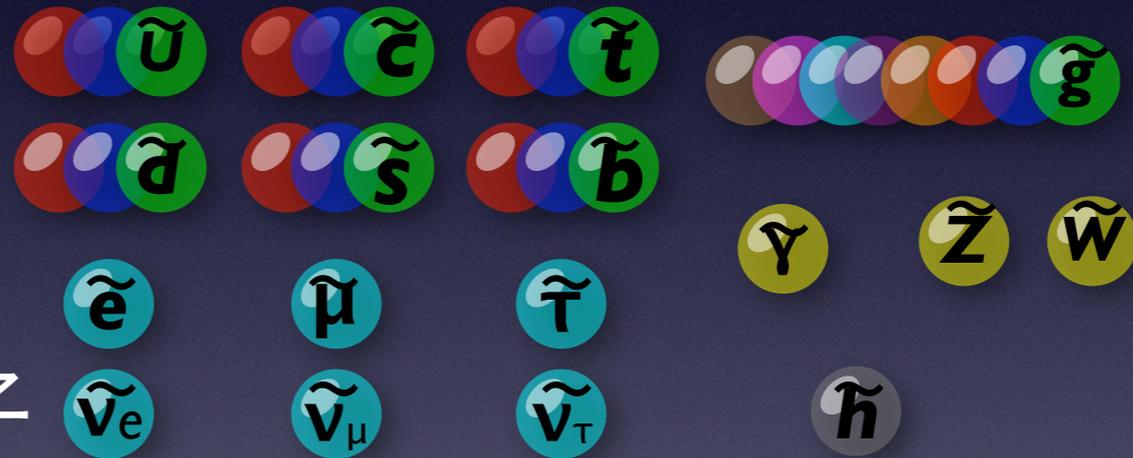
標準模型を超える素粒子理論が必要！

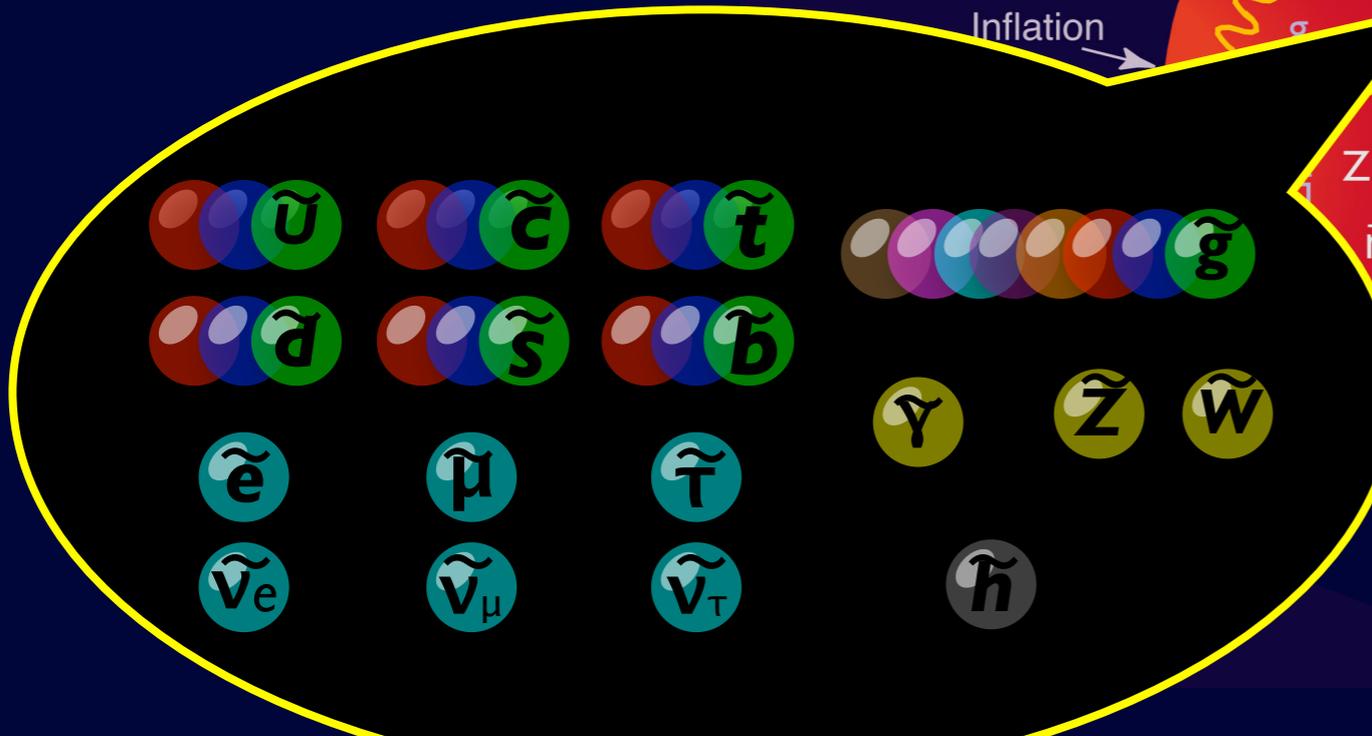
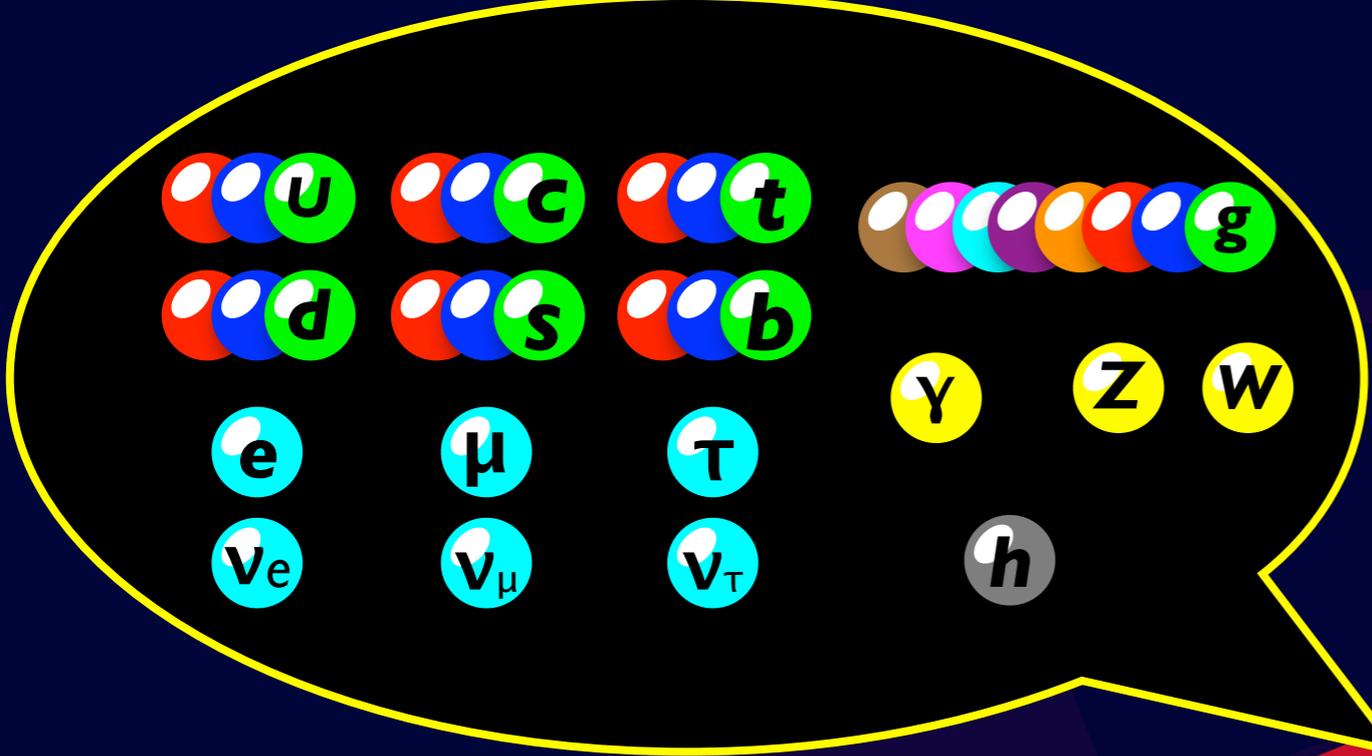
標準模型



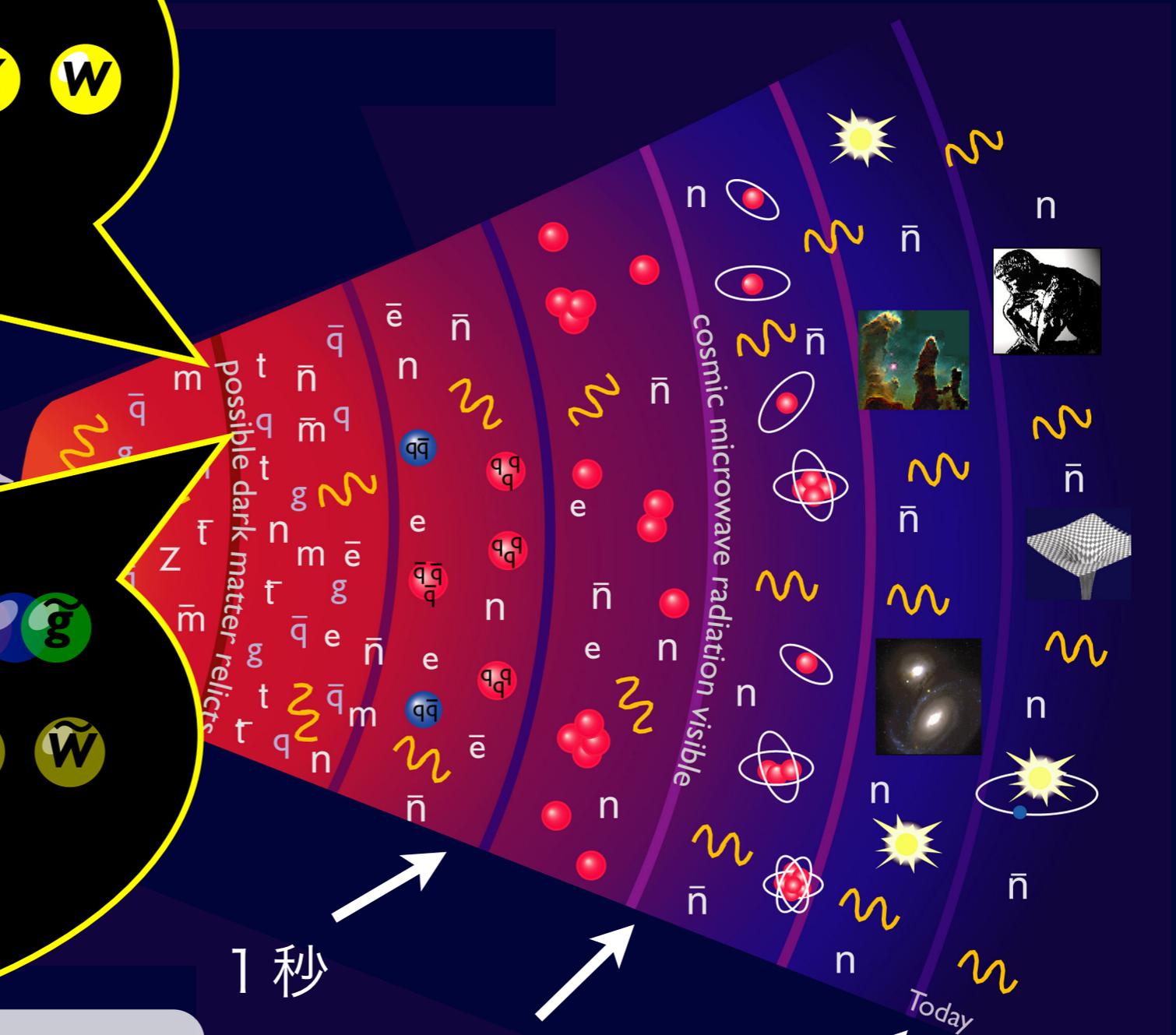
超対称性

SUSY粒子



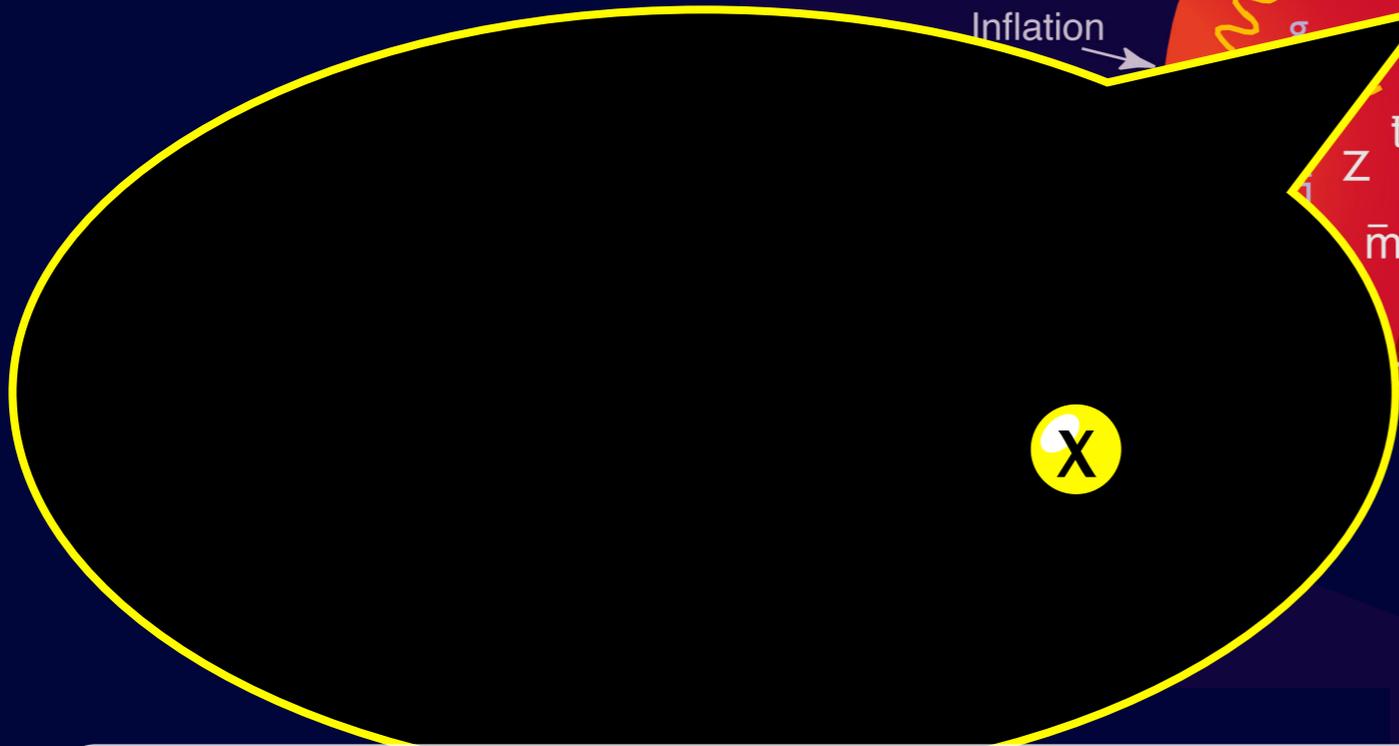
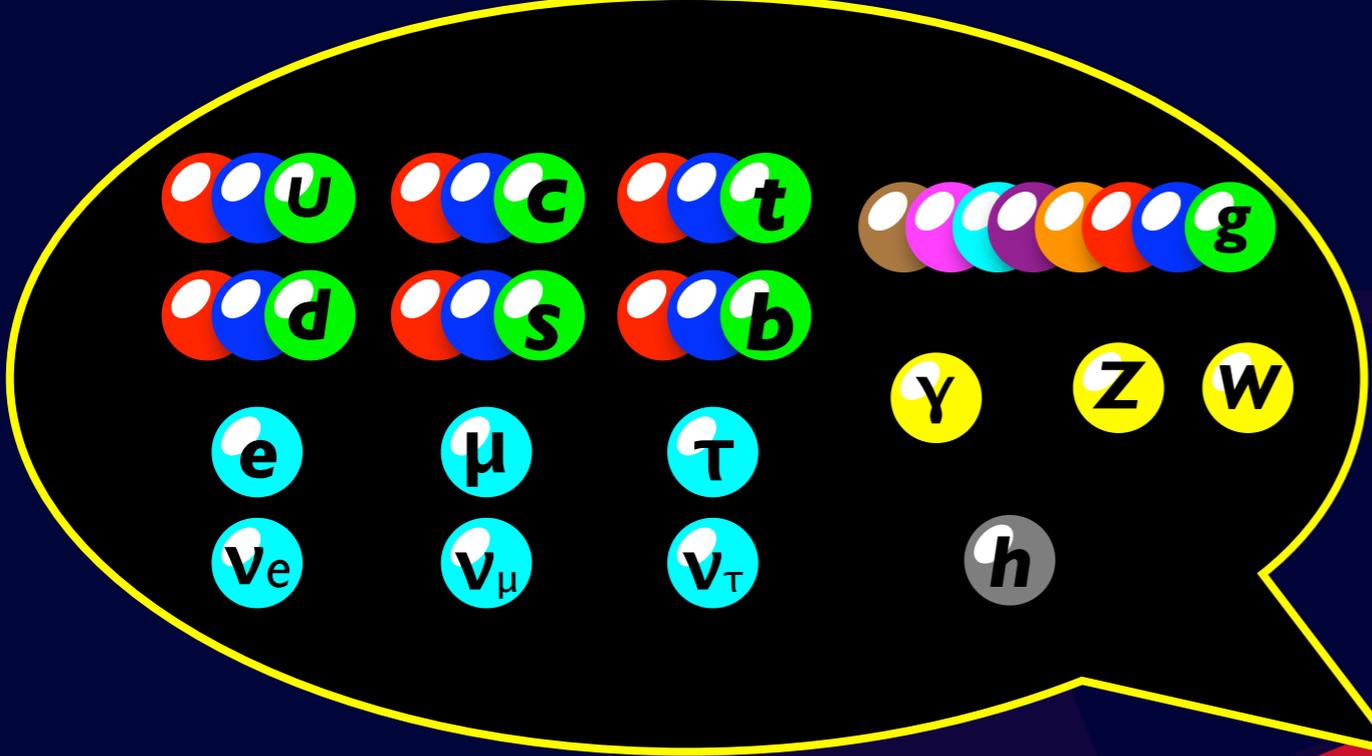


宇宙初期にSUSY粒子も
飛び回っていて・・・



1 秒
40万年
140億年
Today

Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF



やがて一番軽いSUSY粒子だけが
暗黒物質として生き残った。

http://pdg.ge.infn.it/particleadventure/frameless/chart_cutouts/universe_original.pdf

Inflation

possible dark matter relics

cosmic microwave radiation visible

1 秒

40万年

140億年

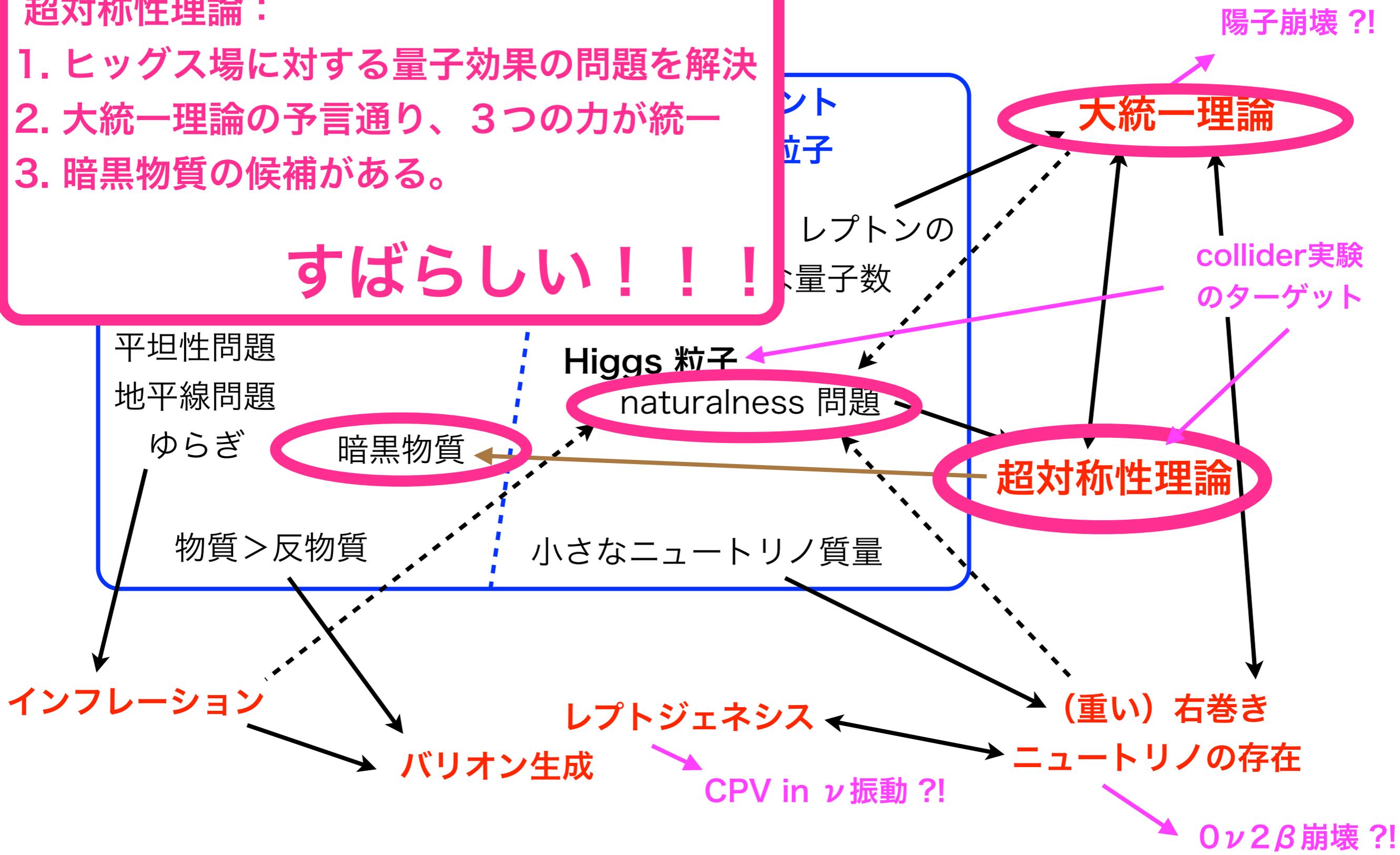
Today



超対称性理論：

1. ヒッグス場に対する量子効果の問題を解決
2. 大統一理論の予言通り、3つの力が統一
3. 暗黒物質の候補がある。

すばらしい！！！！



アクシオン

- Strong CP 問題

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

$$\underline{|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10} \text{ from neutron EDM}}$$

Why?

アクシオン

- Strong CP 問題

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

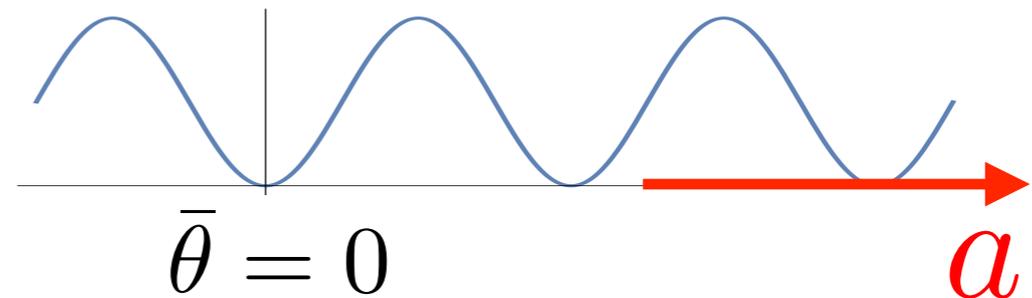
$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10} \text{ from neutron EDM}$$

Why?

- Peccei-Quinn 機構で解決出来る。 [Peccei, Quinn,'77]

軽い粒子 **アクシオン** の存在を予言 [Weinberg,'78, Wilczek,'78]

$$\mathcal{L} = \frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{a}{f_a} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}$$



アクシオン

- Strong CP 問題

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

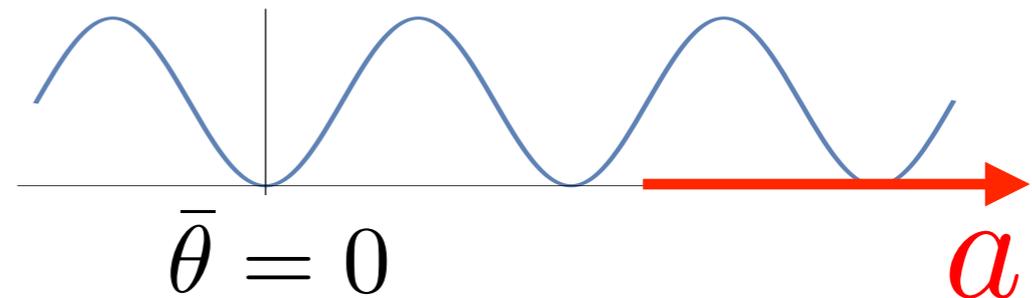
$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10} \text{ from neutron EDM}$$

Why?

- Peccei-Quinn 機構で解決出来る。 [Peccei, Quinn,'77]

軽い粒子 **アクシオン** の存在を予言 [Weinberg,'78, Wilczek,'78]

$$\mathcal{L} = \frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{a}{f_a} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}$$



アクシオン

- Strong CP 問題

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

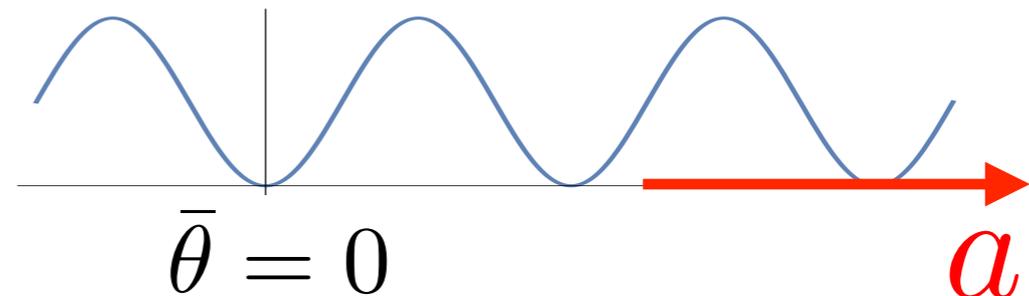
$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10} \text{ from neutron EDM}$$

Why?

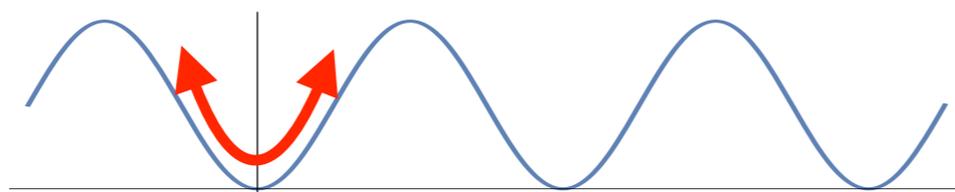
- Peccei-Quinn 機構で解決出来る。 [Peccei, Quinn,'77]

軽い粒子 **アクシオン** の存在を予言 [Weinberg,'78, Wilczek,'78]

$$\mathcal{L} = \frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{a}{f_a} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}$$



- アクシオン** も **暗黒物質** の候補！



$$\Omega_a h^2 = 0.18 \theta_i^2 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.19}$$

[Turner,'86]

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

暗黒エネルギー

平坦性問題
地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

Higgs 粒子
naturalness 問題

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

大統一理論

collider実験
のターゲット

超対称性理論

インフレーション

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

バリオン生成

ニュートリノの存在

CPV in ν 振動 ?!

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!

陽子崩壊 ?!

???

アクシオン

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

**strong CP
問題**

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

陽子崩壊 ?!

大統一理論

collider実験
のターゲット

Higgs 粒子

naturalness 問題

超対称性理論

???

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

小さなニュートリノ質量

インフレーション

レプトジェネシス

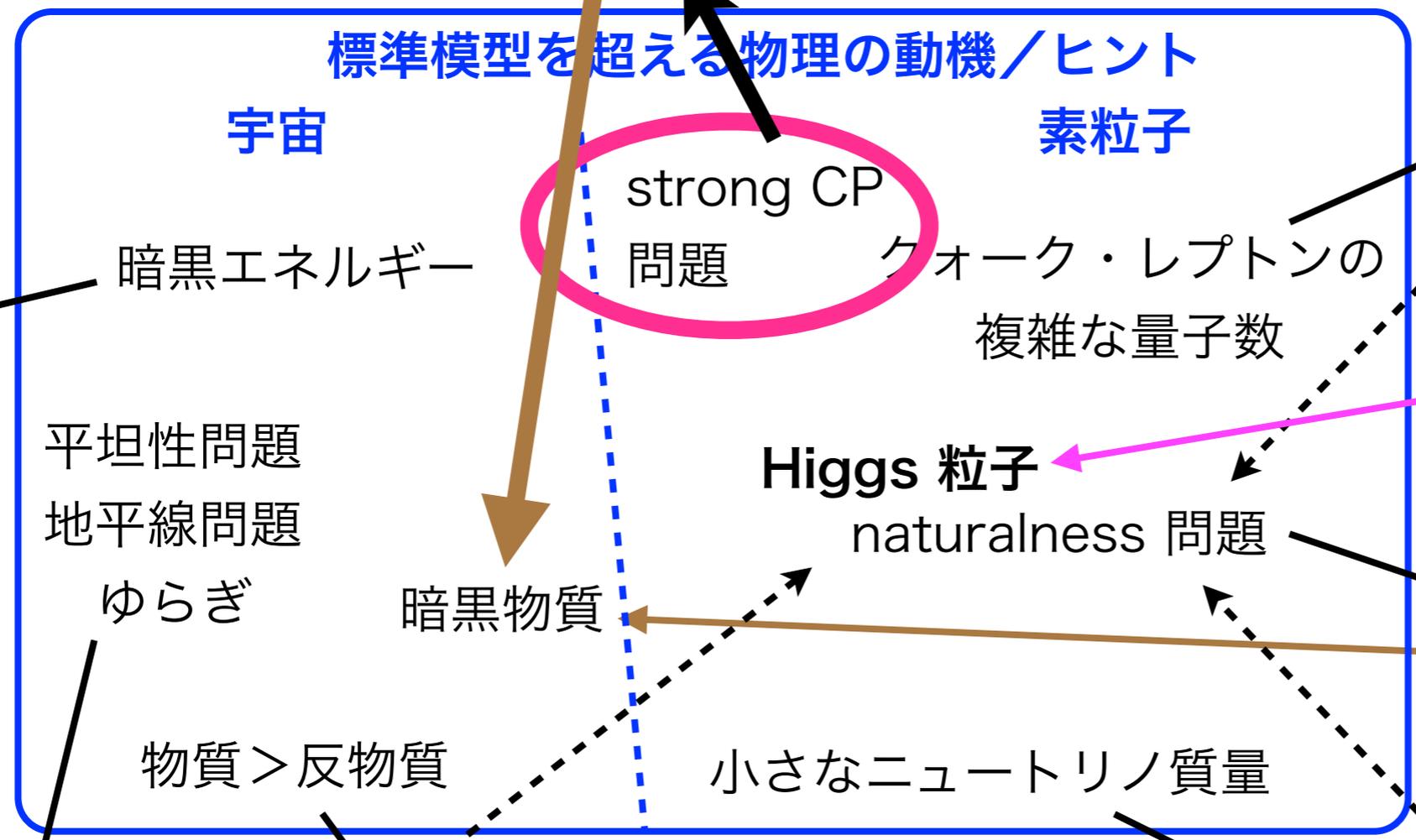
(重い) 右巻き

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



各種探索実験

アクシオン

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

大統一理論

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

collider実験
のターゲット

暗黒エネルギー

???

Higgs 粒子

naturalness 問題

超対称性理論

平坦性問題
地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

インフレーション

レプトジェネシス

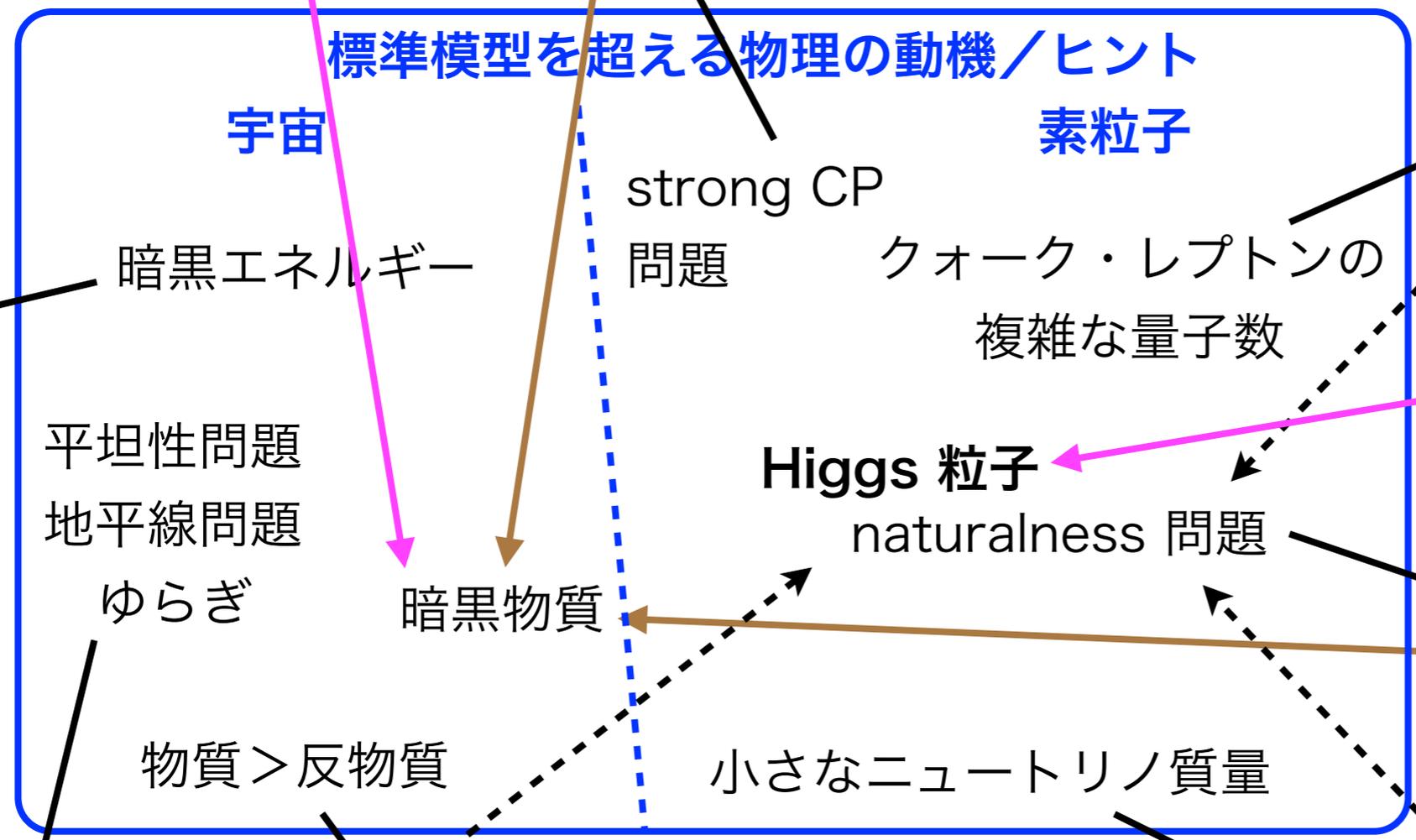
(重い) 右巻き

バリオン生成

CPV in ν 振動 ?!

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



各種探索実験

アクシオン

陽子崩壊 ?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

ここでは一言だけ...

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

大統一理論

collider実験
のターゲット

???

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子

naturalness 問題

超対称性理論

ゆらぎ

暗黒物質

小さなニュートリノ質量

物質 > 反物質

インフレーション

レプトジェネシス

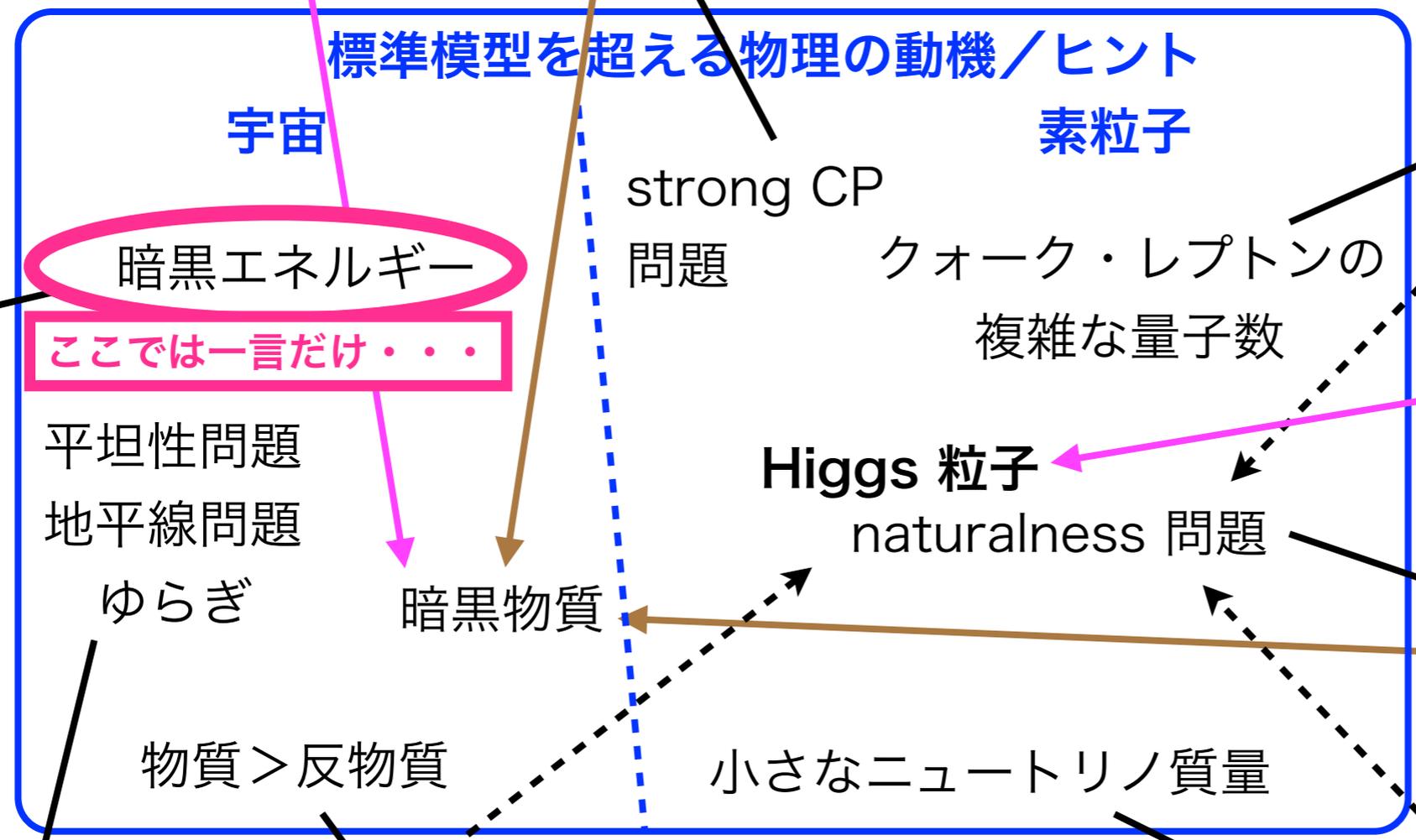
(重い) 右巻き

バリオン生成

ニュートリノの存在

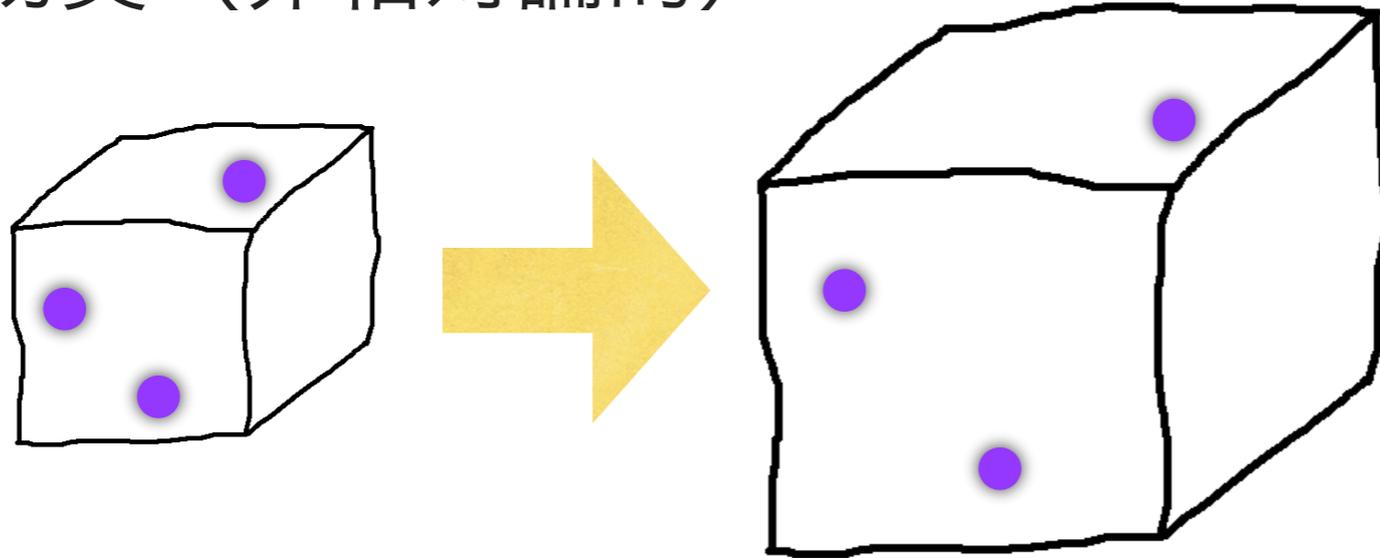
CPV in ν 振動 ?!

$0\nu 2\beta$ 崩壊 ?!



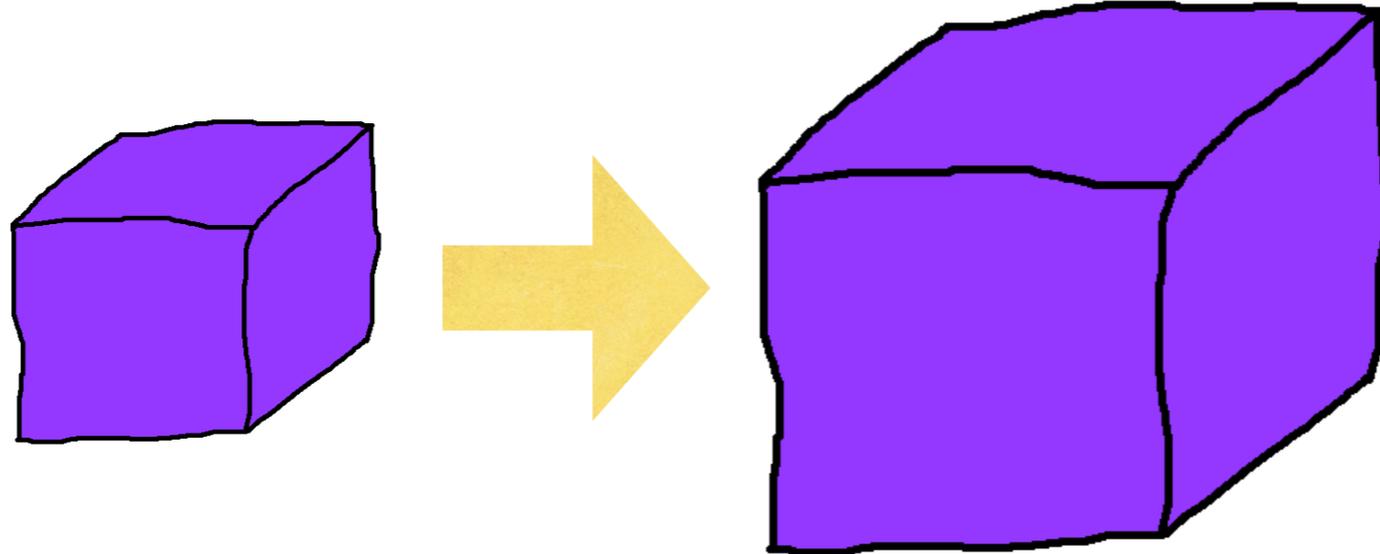
暗黒エネルギーの謎

普通の物質（非相対論的）



宇宙が膨張して体積が倍になったら密度は半分

暗黒エネルギー（ \approx 宇宙定数）



宇宙が膨張しても密度が一定

暗黒エネルギーの謎（一言だけ）

場の量子論で単純に計算して推測される値よりも、
観測値が 0.0000000000 0000000000

暗黒エネルギーの謎（一言だけ）

場の量子論で単純に計算して推測される値よりも、

観測値が 0.0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

暗黒エネルギーの謎（一言だけ）

場の量子論で単純に計算して推測される値よりも、

観測値が 0.0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

0000000000

暗黒エネルギーの謎（一言だけ）

場の量子論で単純に計算して推測される値よりも、

観測値が 0.0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

0000000000 0000000000 0000000000

0000000000 1倍、小さい！

暗黒エネルギーの謎（一言だけ）

場の量子論で単純に計算して推測される値よりも、

観測値が 0.0000000000 0000000000

0000000000 000000000000000000000000000000

0000000000 000000

0000000000 000000

0000000000 1倍、小さい！

標準模型を超える・・・どころか、
全く新しい枠組みが必要！

暗黒エネルギーの謎（一言だけ）

場の量子論で単純に計算して推測される値よりも、

観測値が 0.0000000000 0000000000

0000000000 000000000000000000000000000000

0000000000 0000000000

0000000000 0000000000

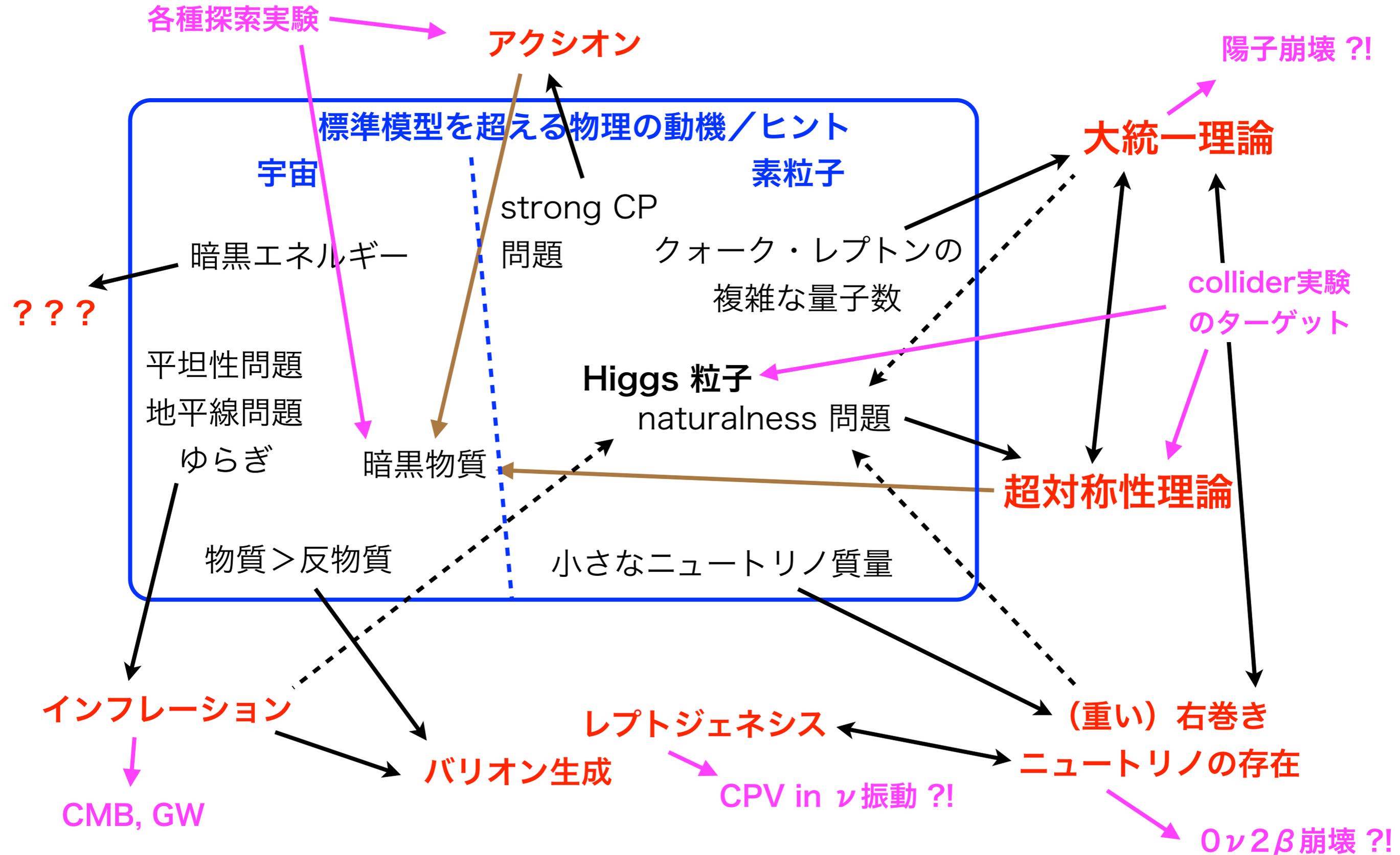
0000000000 1倍、小さい！

標準模型を超える・・・どこるか、
全く新しい枠組みが必要！

多くの素粒子物理学者がお手上げ（人間原理??）

21世紀最大の謎になるかも。

第1部まとめ



第1部まとめ

各種探索実験

アクション

陽子崩壊?!

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP
問題

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

ゆらぎ

暗黒物質

小さなニュートリノ質量

物質 > 反物質

大統一理論

collider実験
のターゲット

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もありません!

CMB, GW

CPV in ν 振動?!

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

$0\nu 2\beta$ 崩壊?

- ◆ 第1部おしまい。
- ◆ 以下では黒板を使って各論をやります

第2部予定

第2部予定

(質問や要望に応じて、適宜順番を入れ替えようと思います。)

2-A 大統一理論

2-B ニュートリノ質量とシーソー機構

2-C 標準宇宙論入門

2-D インフレーション

2-E 宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス/レプトジェネシス

2-F 暗黒物質

2-G strong CP問題とアクシオン

2-H 超対称性模型