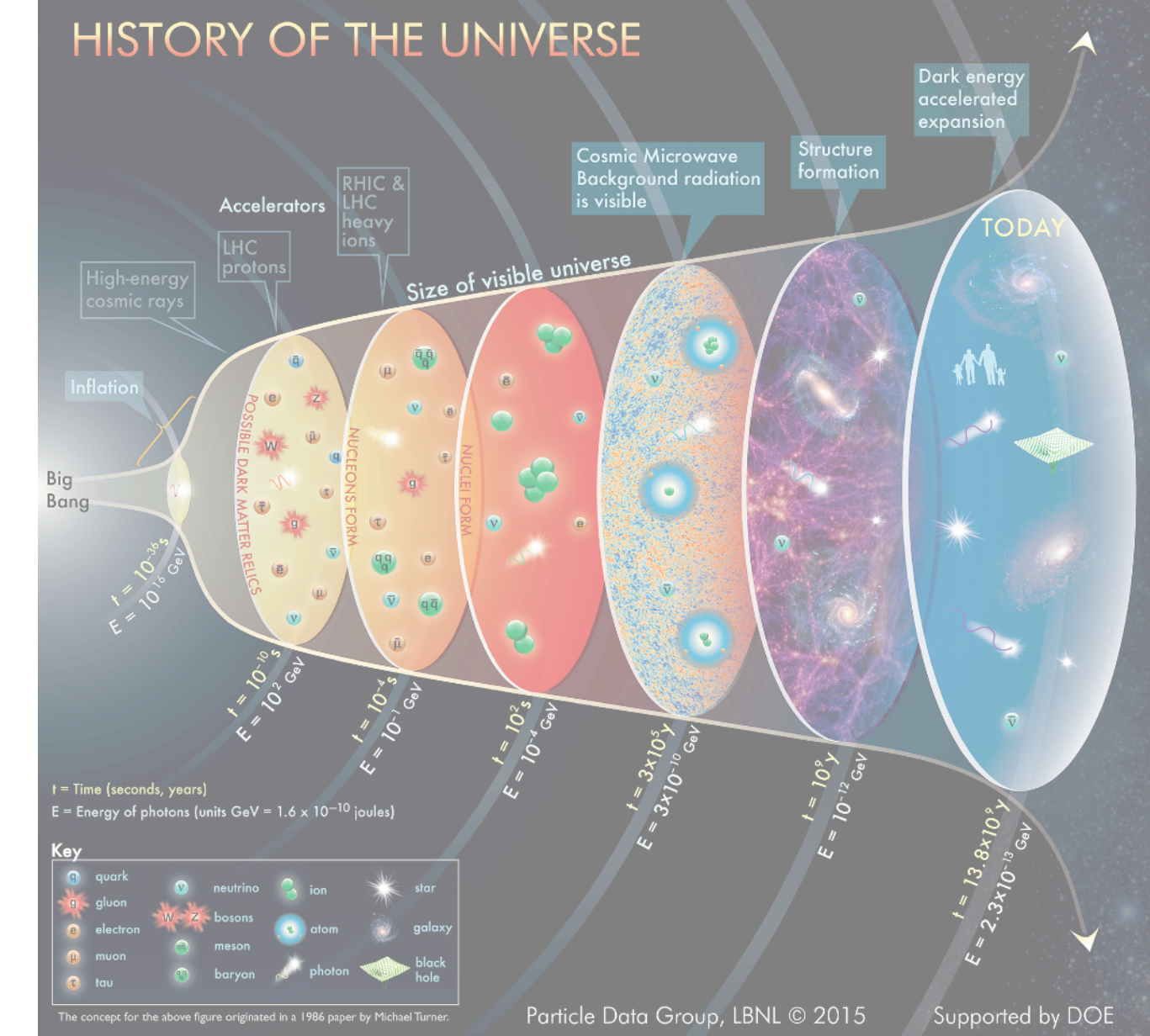


Figure credit;
Particle Data Group
at Lawrence Berkeley National Lab.



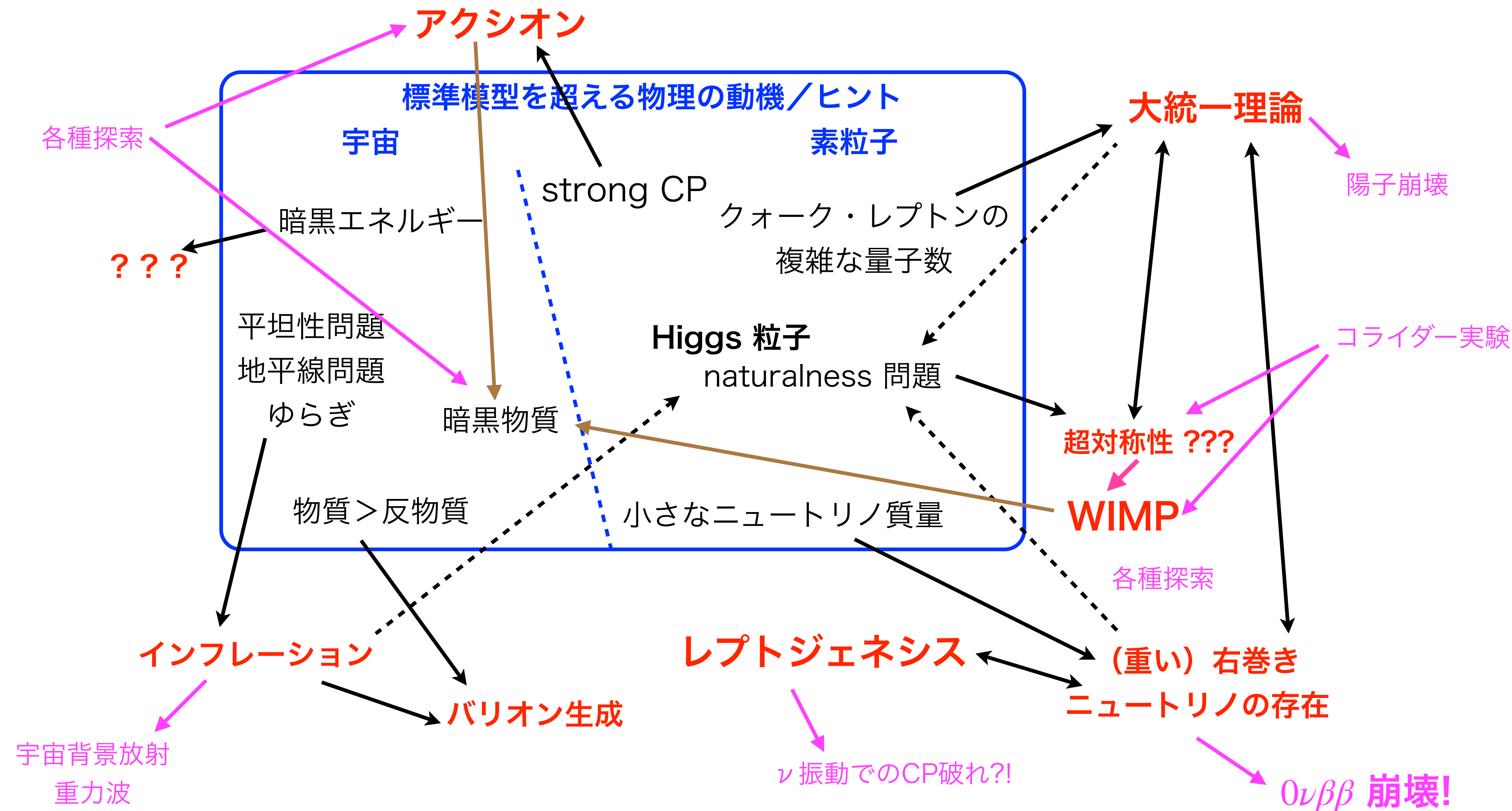
素粒子特論

濱口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

@お茶の水女子大学, 2025年夏学期

第2週

先週と今週で、こんな↓イメージ図を埋めながら概要を話そうとしています。

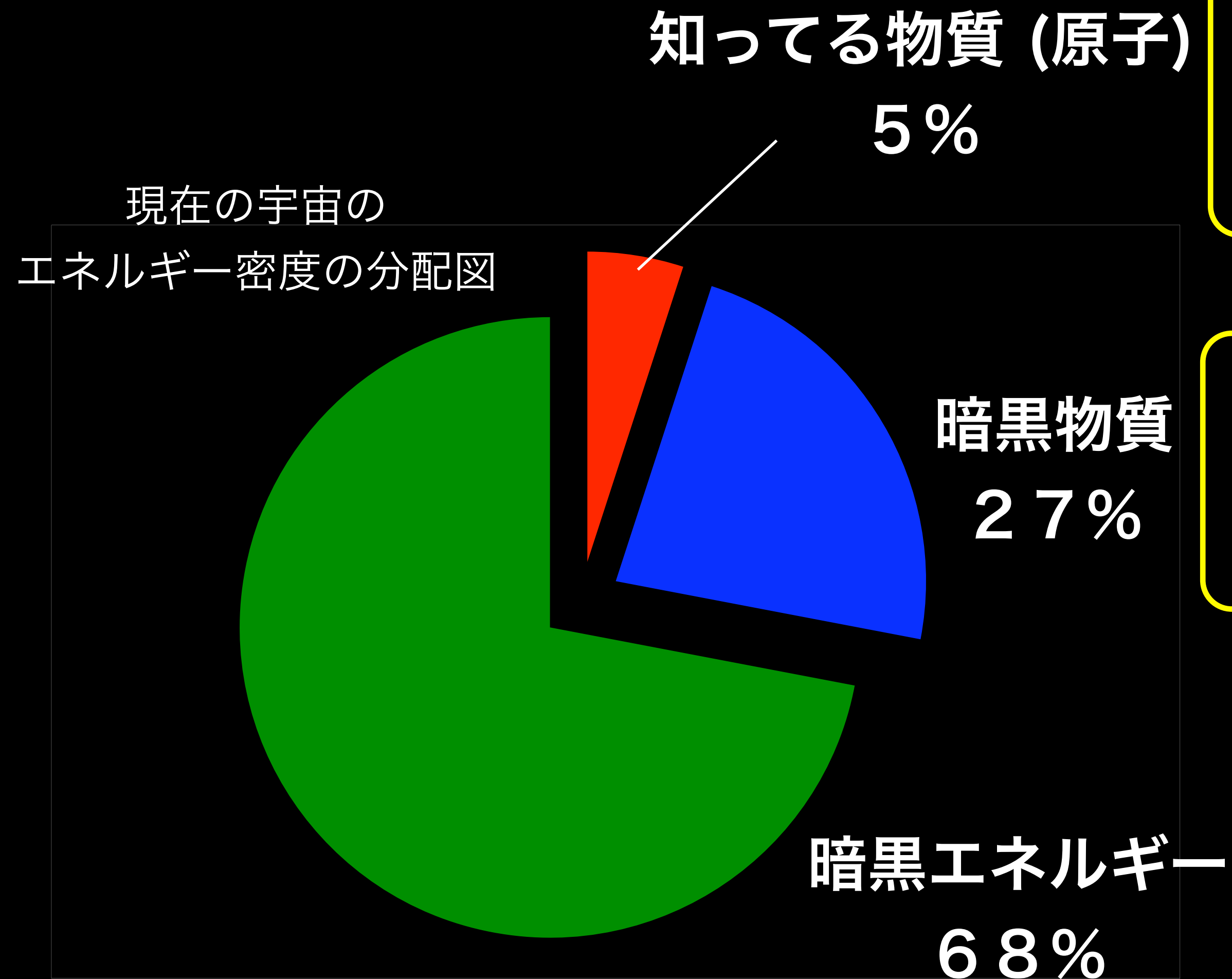


先週と今週で、こんな↓イメージ図を埋めながら概要を話そうとしています。



まず宇宙の話から

宇宙に残された謎



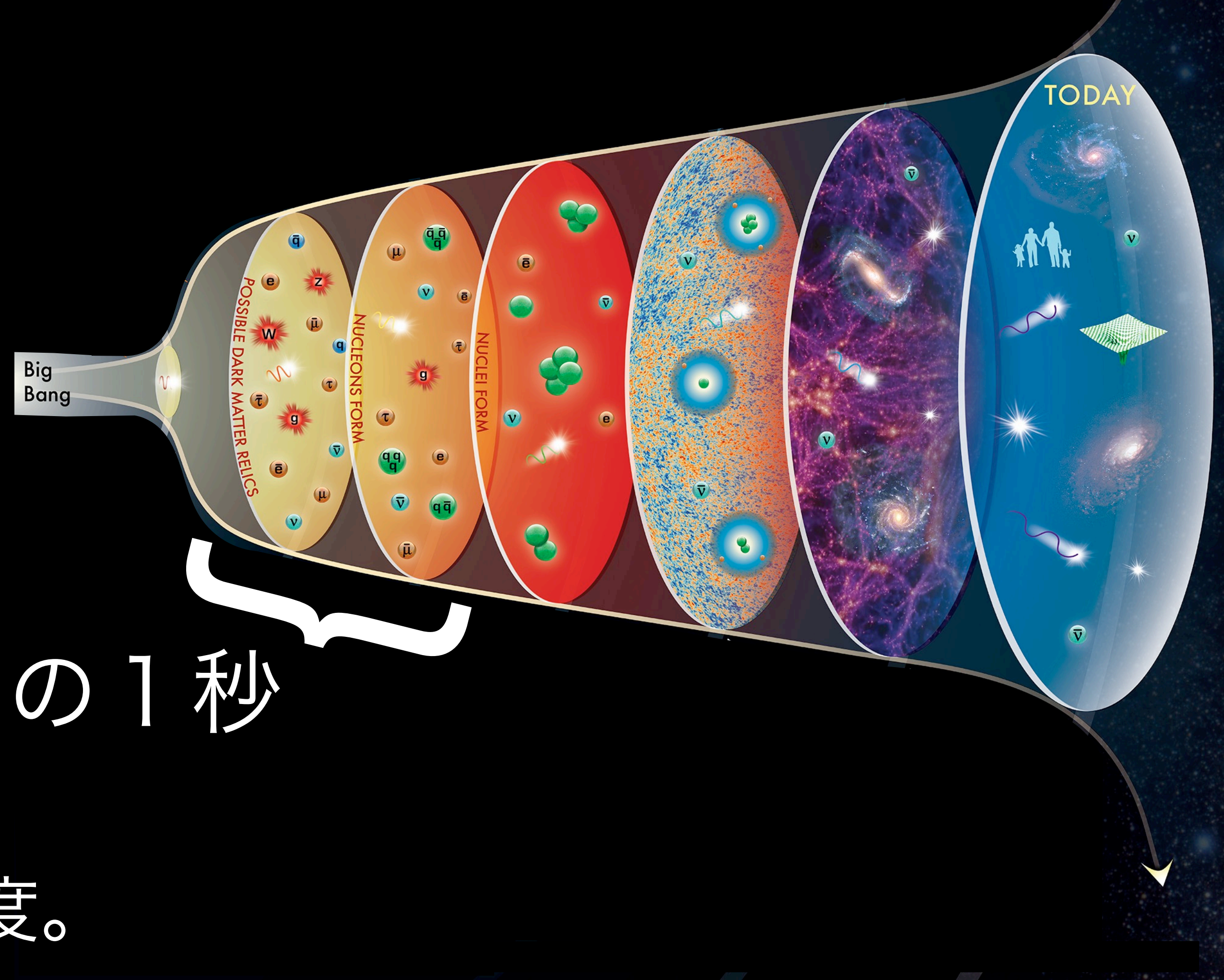
消えた
反物質の謎

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



鍵は最初の1秒

超高温・超高密度。

全ての物質がバラバラの**素粒子**になって
激しくぶつかりあっている世界。

．．．．．理解するには**素粒子物理**が必要。

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

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

現在の宇宙はとっても平坦！

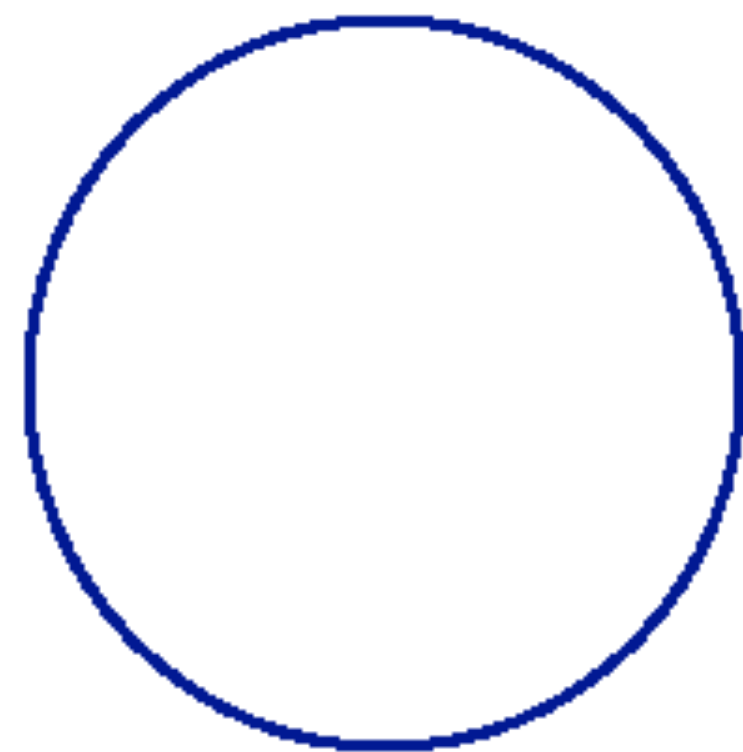
「宇宙の平坦さ」
を表す量：

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

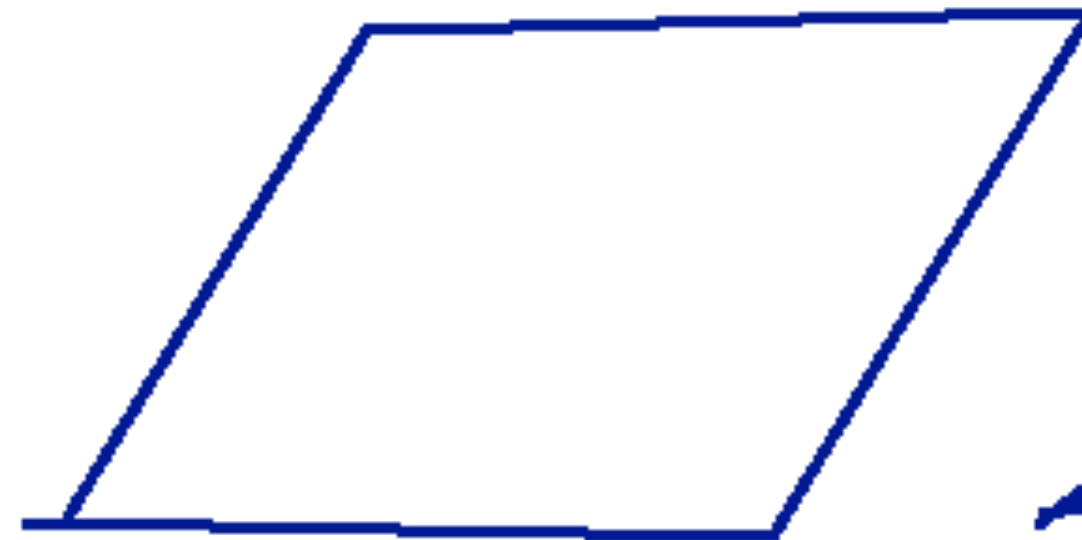
Newton定数

宇宙のエネルギー密度

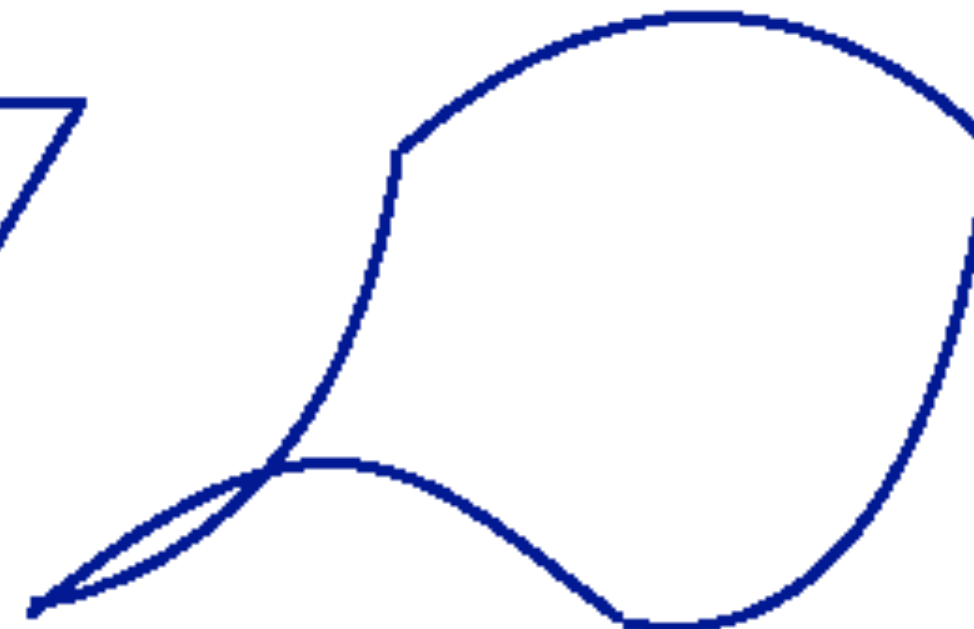
Hubbleパラメータ
(宇宙の膨張速度)



$\Omega > 1$
閉じた宇宙



$\Omega = 1$
平坦な宇宙



$\Omega < 1$
開いた宇宙

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)

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

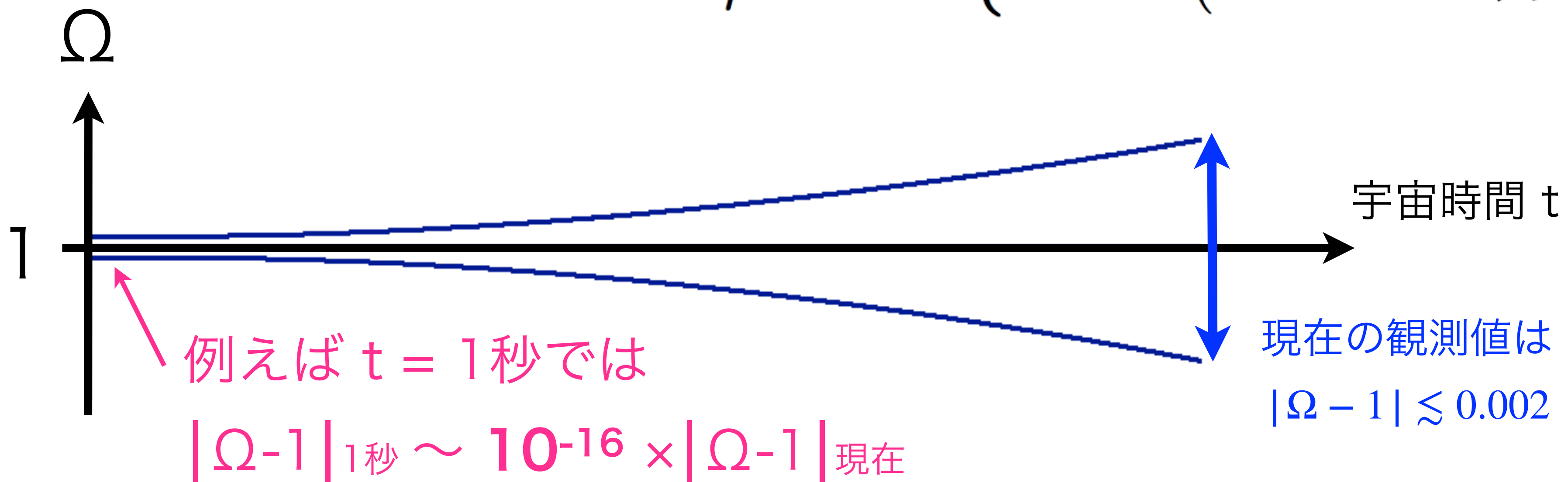
Einstein 方程
式 によると：

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

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

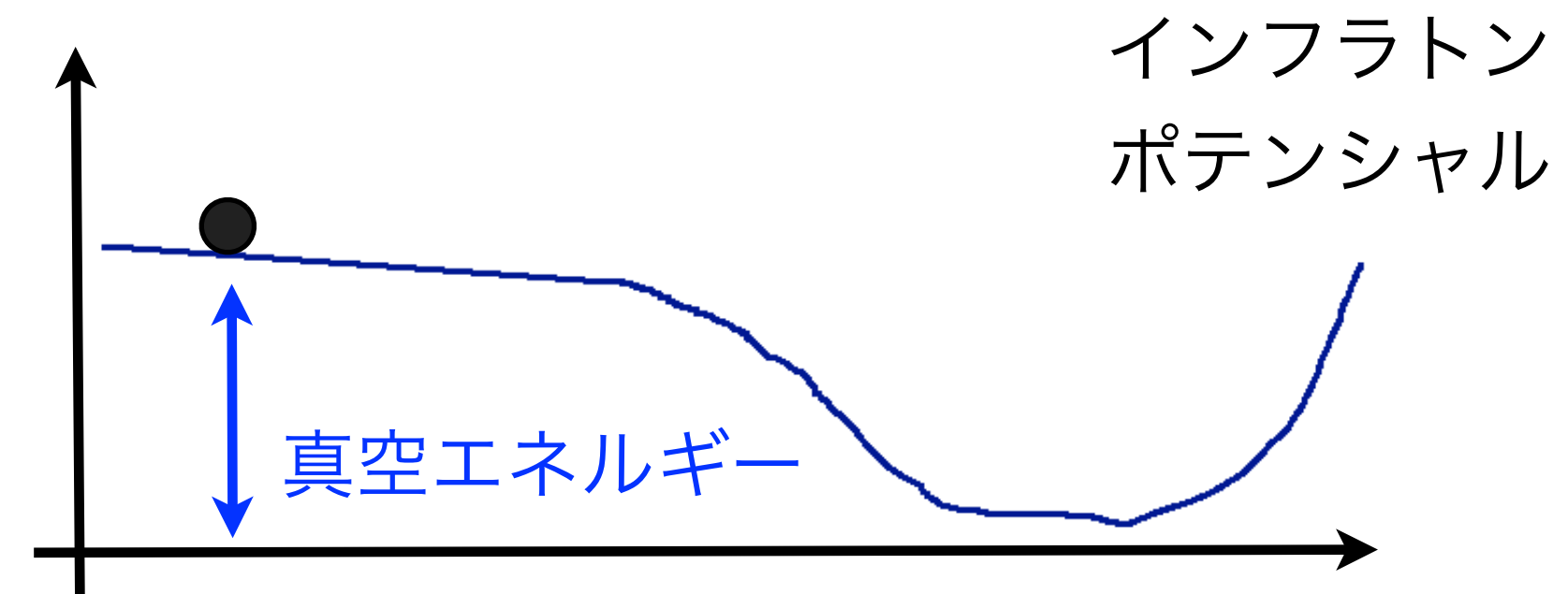
インフレーション：

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)

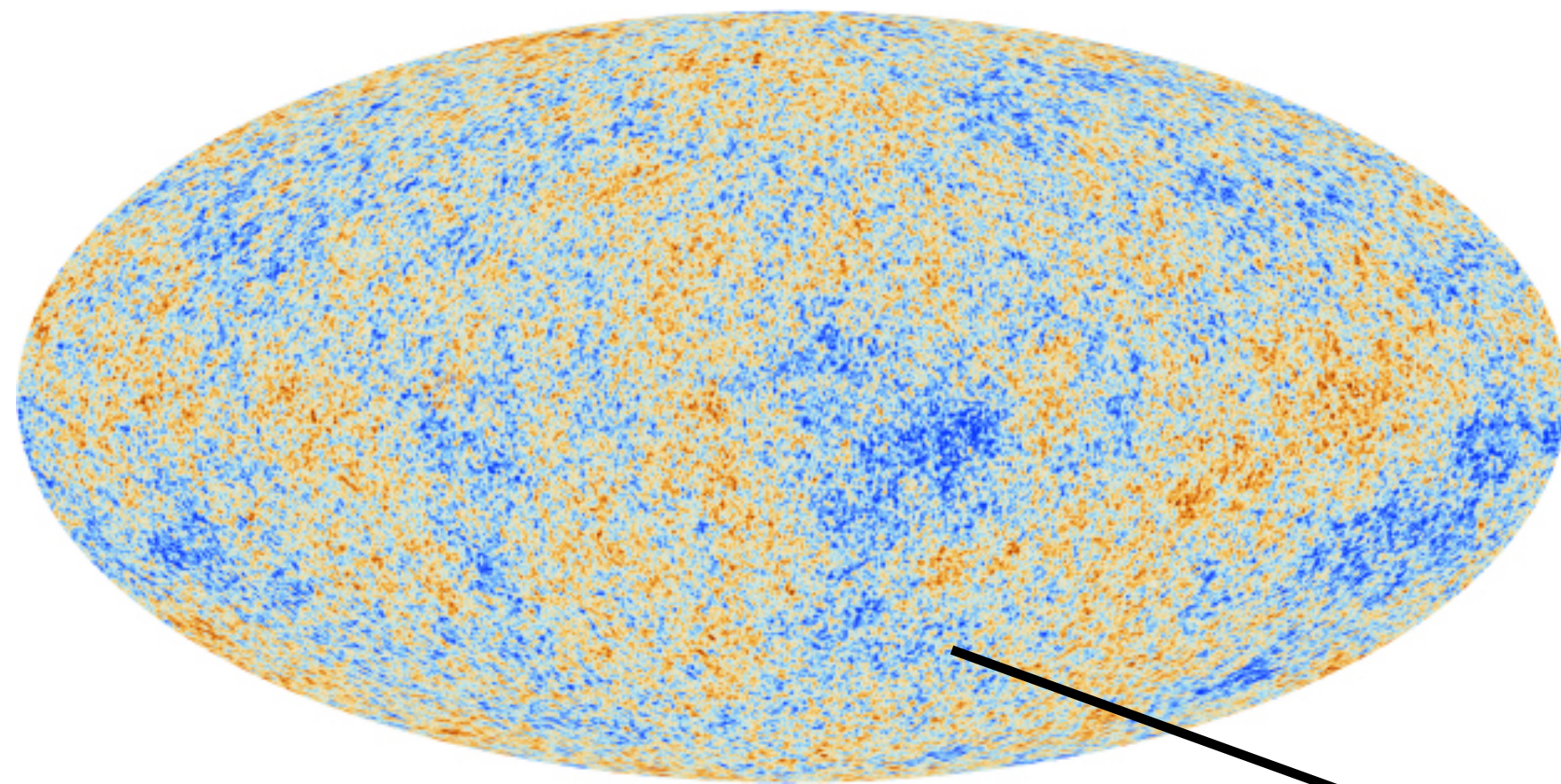


$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto e^{-2H_i t}$$

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

しかも・・・

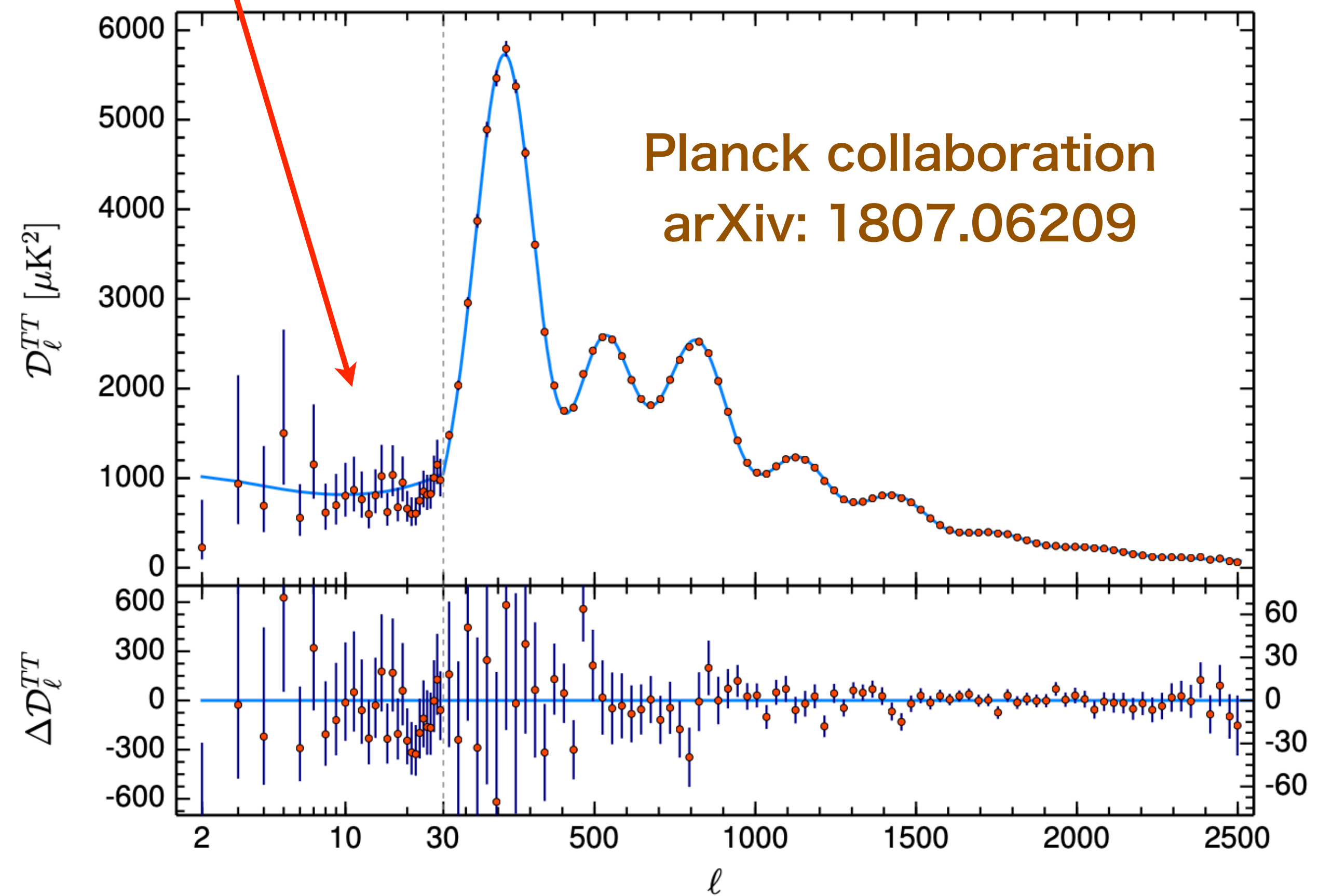
温度ゆらぎ



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)



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

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

インフレーション

宇宙背景放射
重力波

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

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

インフレーション

宇宙背景放射
重力波

ちょっと休憩…
ここまでで
何か質問あれば是非！



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

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

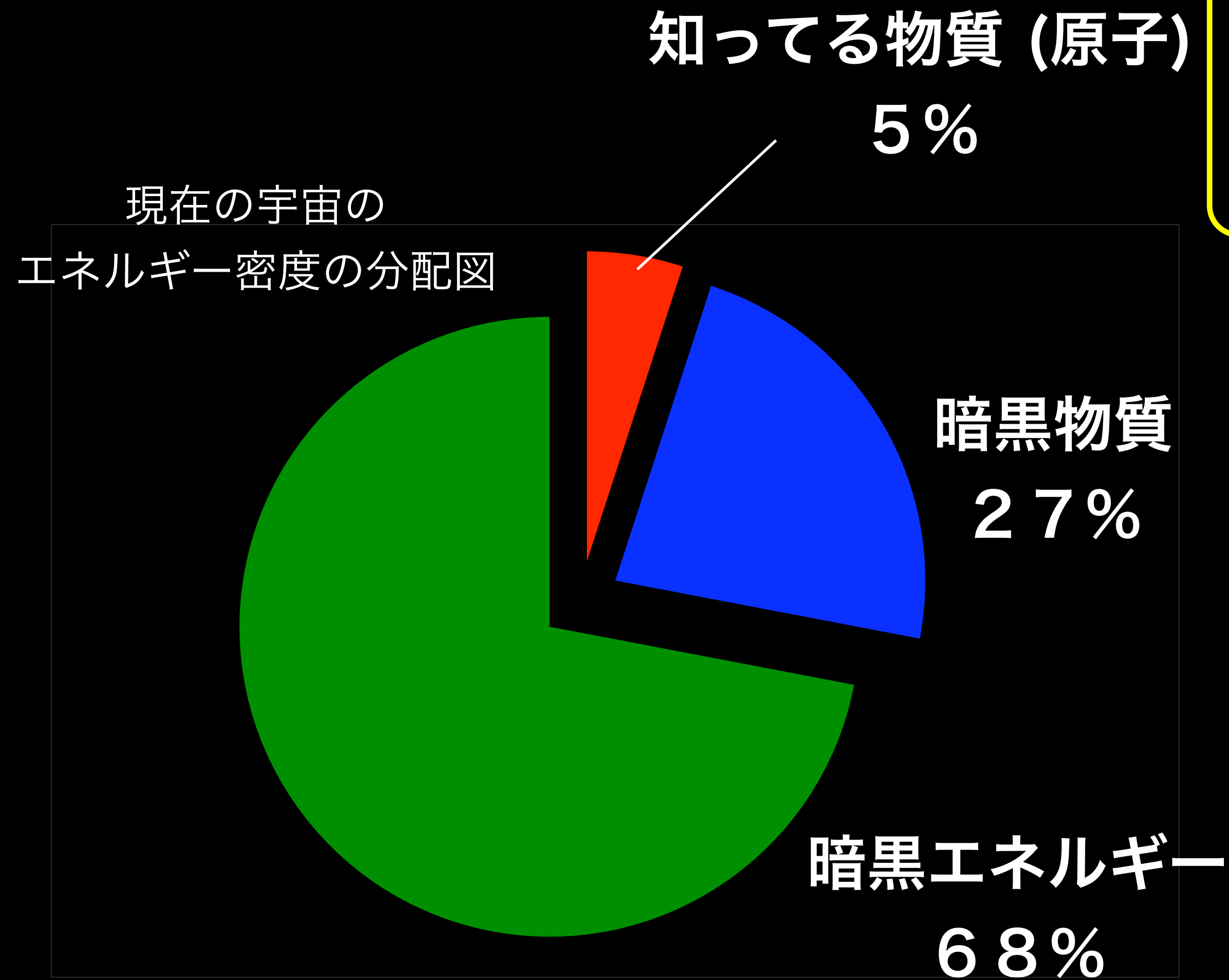
インフレーション

宇宙背景放射
重力波

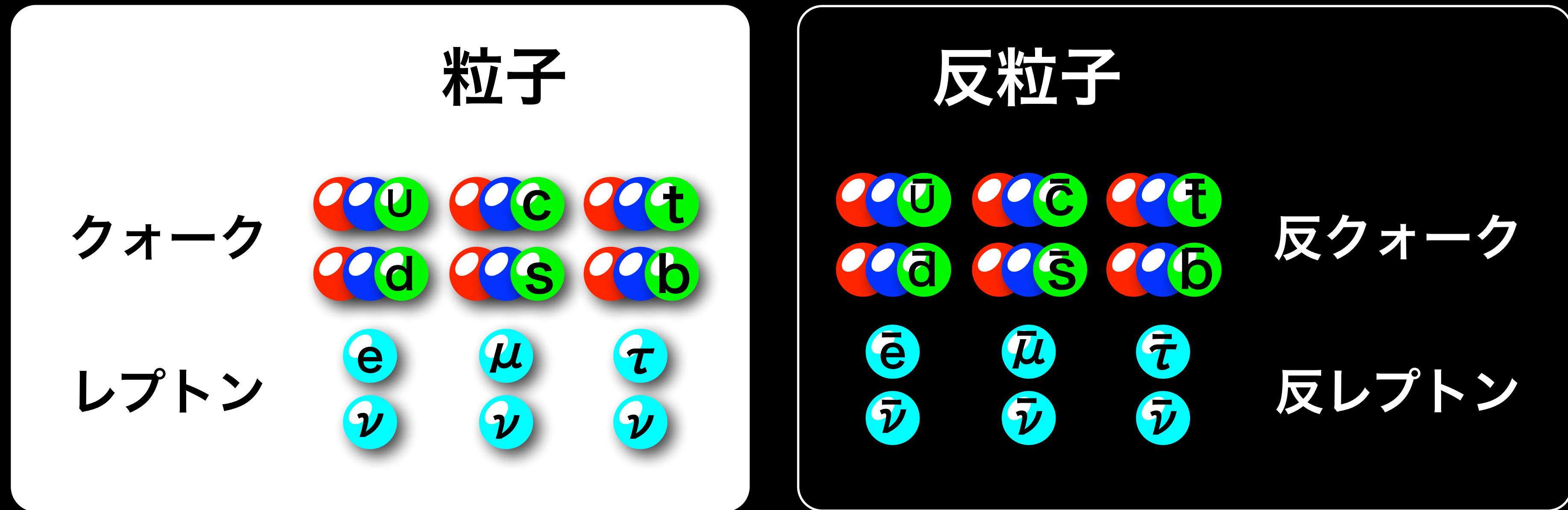
次は、物質反物質非対称性の謎

宇宙に残された謎

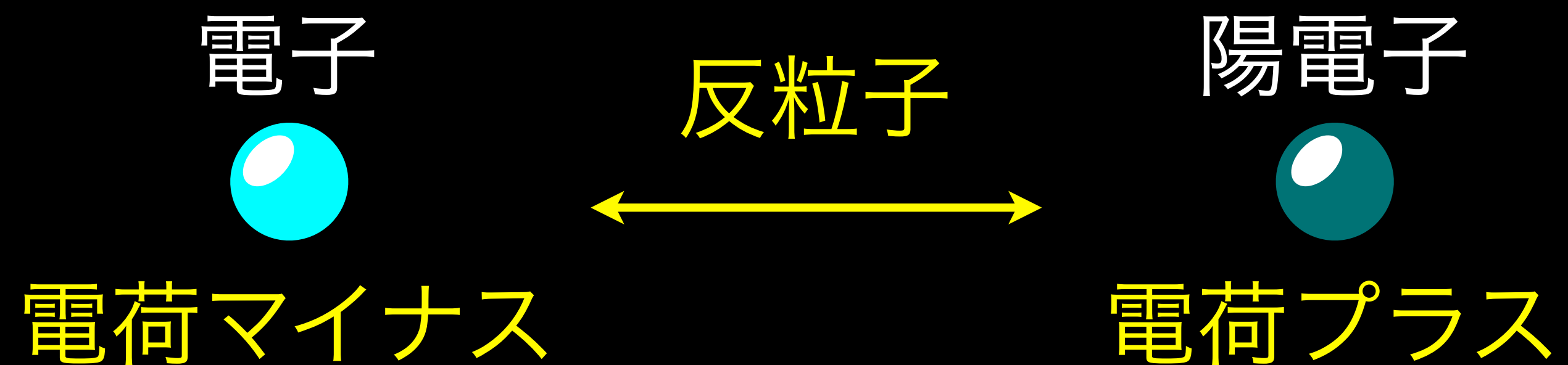
消えた
反物質の謎



全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

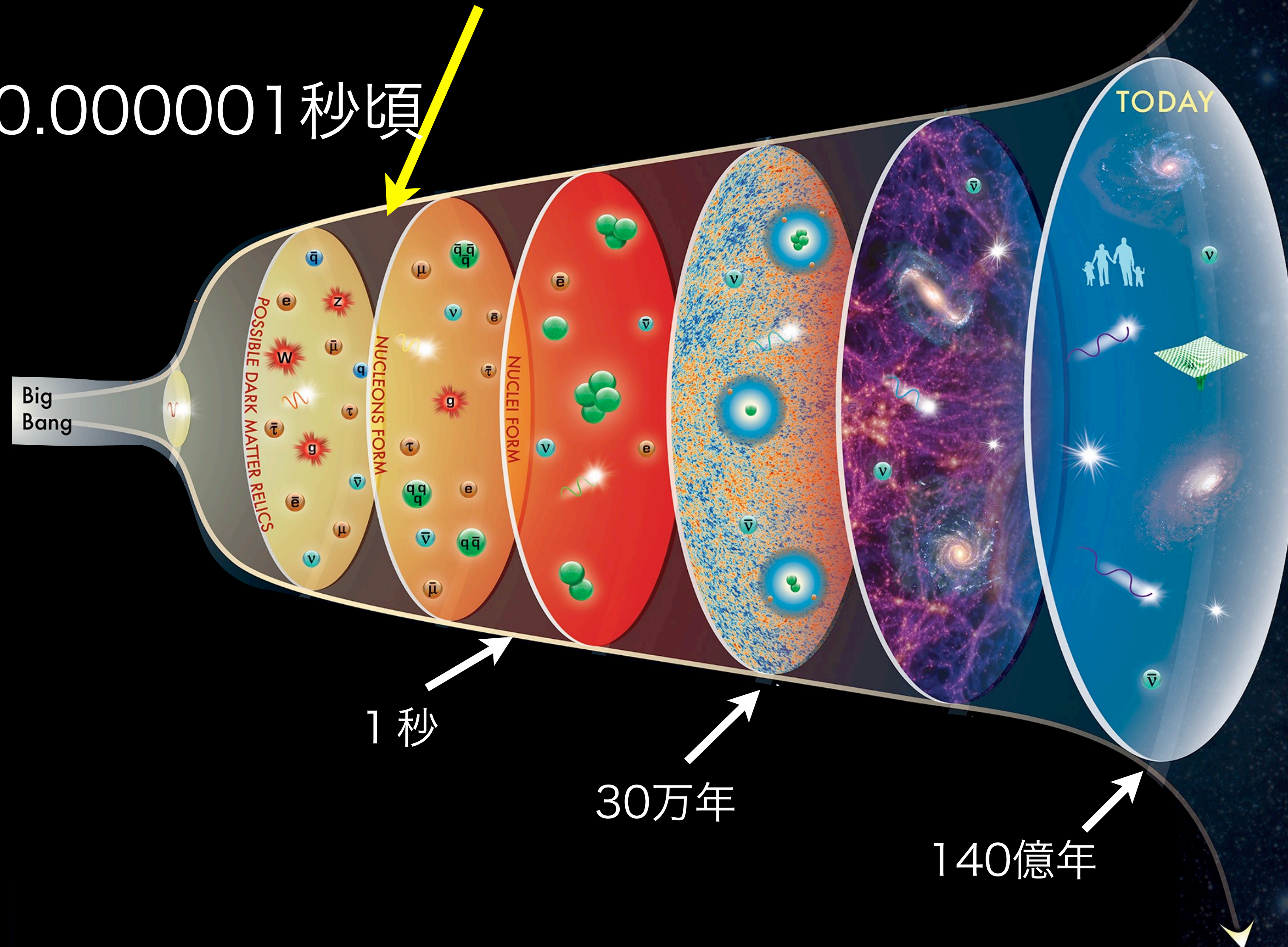


粒子と反粒子は、重さが全く同じで反対の電荷を持つ。



宇宙のずっと始めの頃は . . .

0.000001 秒頃

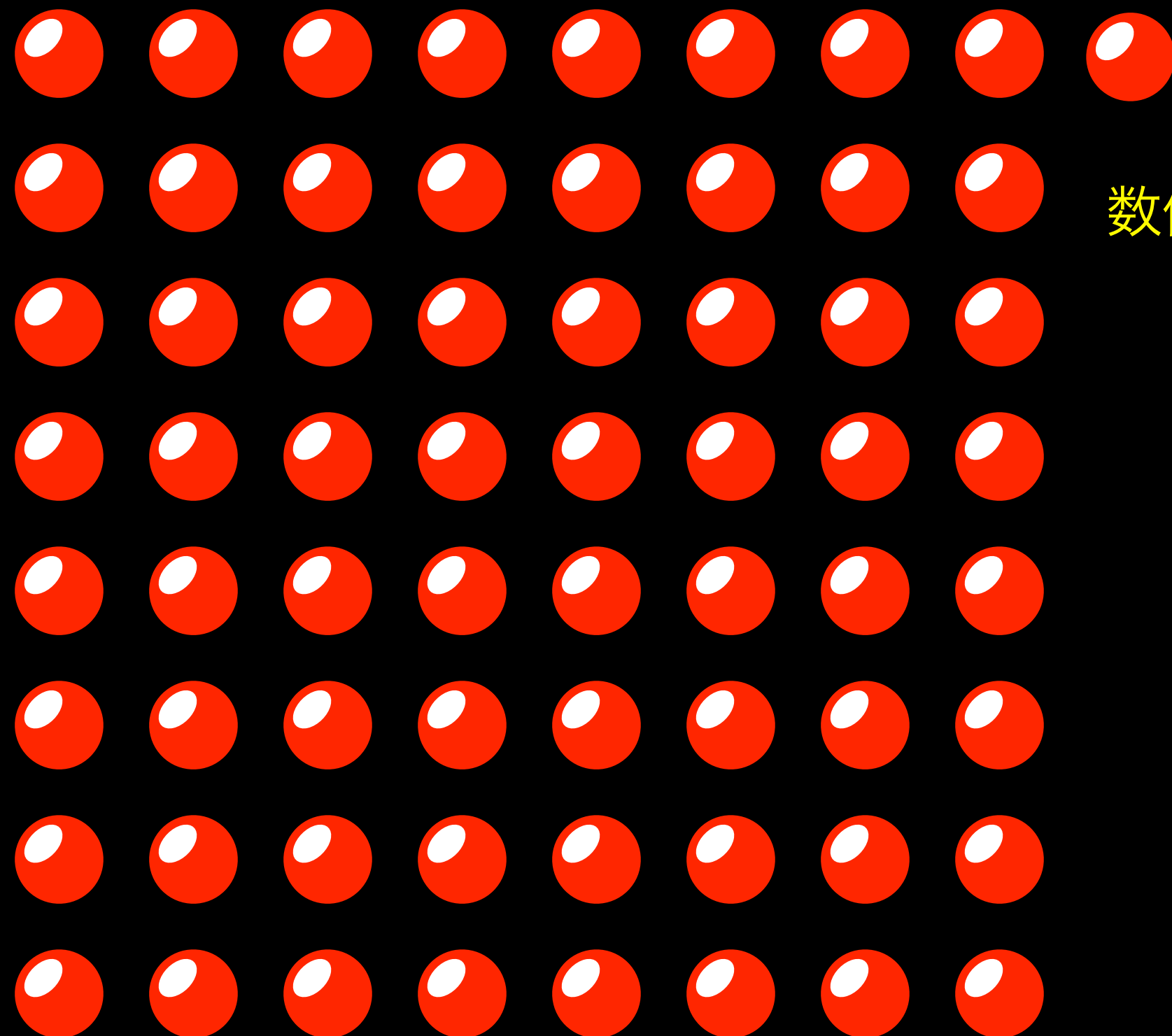


宇宙のずっと始めの頃は・・・

物質と反物質がほぼ同数あった。

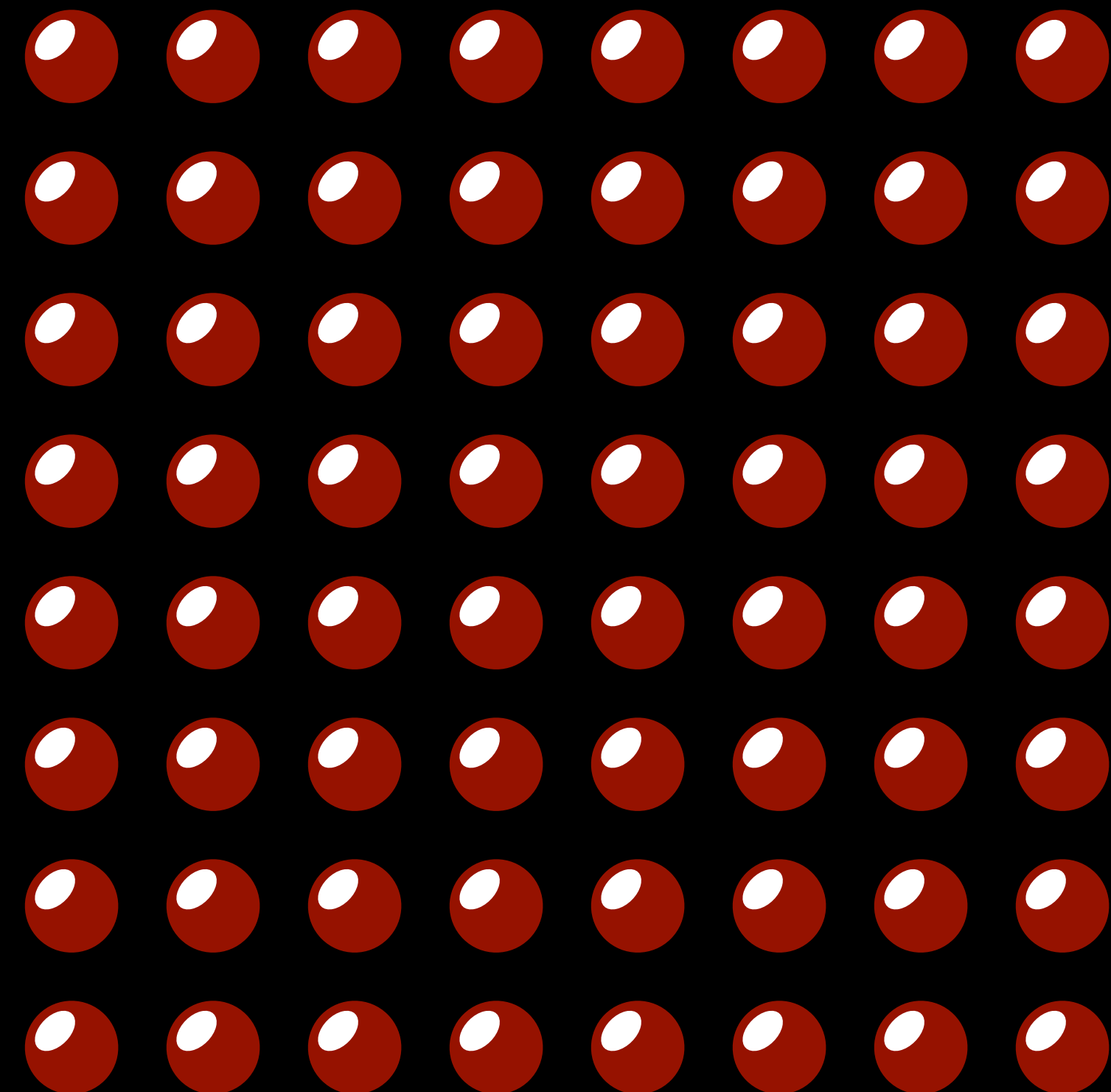
ただし物質の方がほんの少しだけ多かった。

物質



数億分の1の
差

反物質



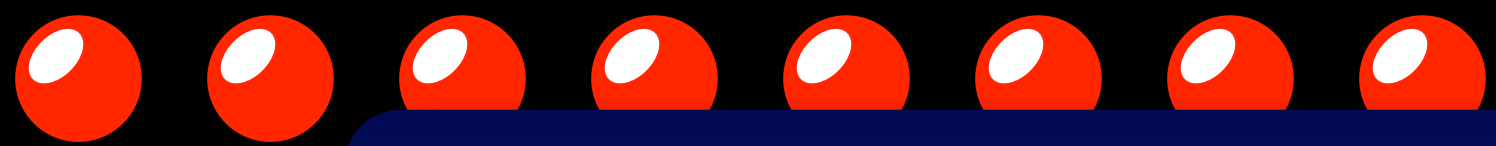
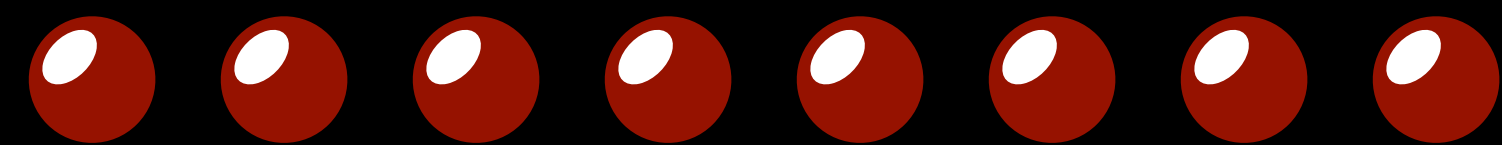
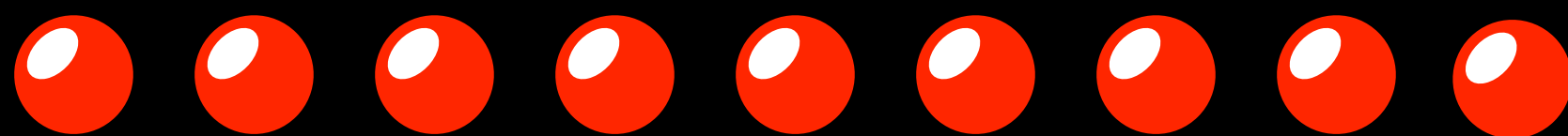
宇宙のずっと始めの頃は・・・

物質と反物質がほぼ同数あった。

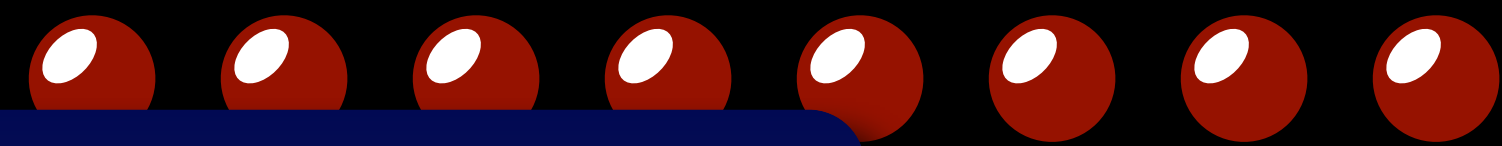
やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

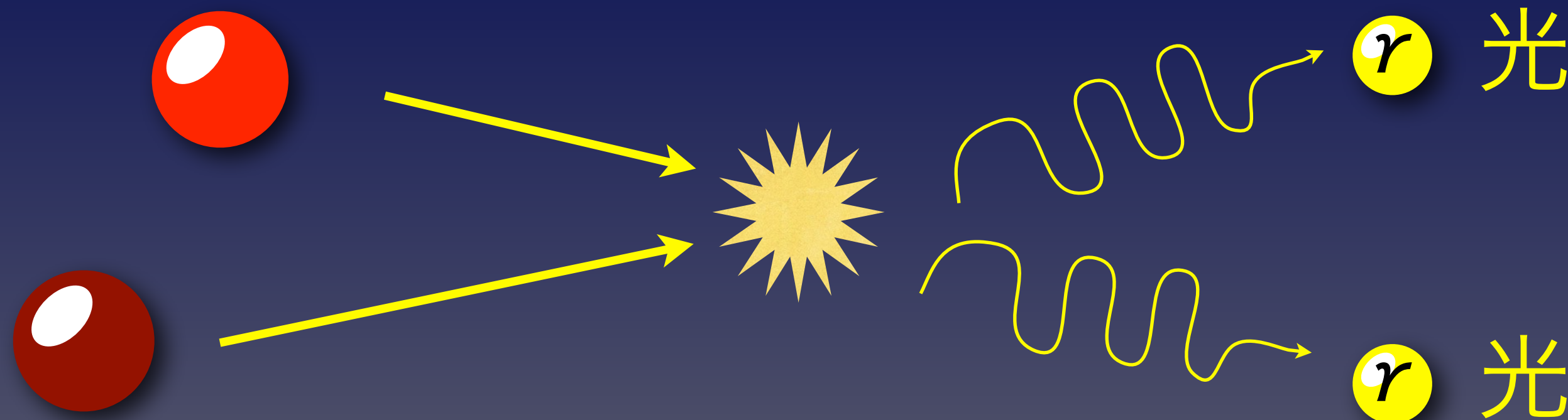
反物質



粒子の1の倍



粒子と反粒子の**対消滅**



宇宙のずっと始めの頃は・・・

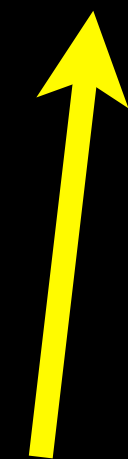
物質と反物質がほぼ同数あった。

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)



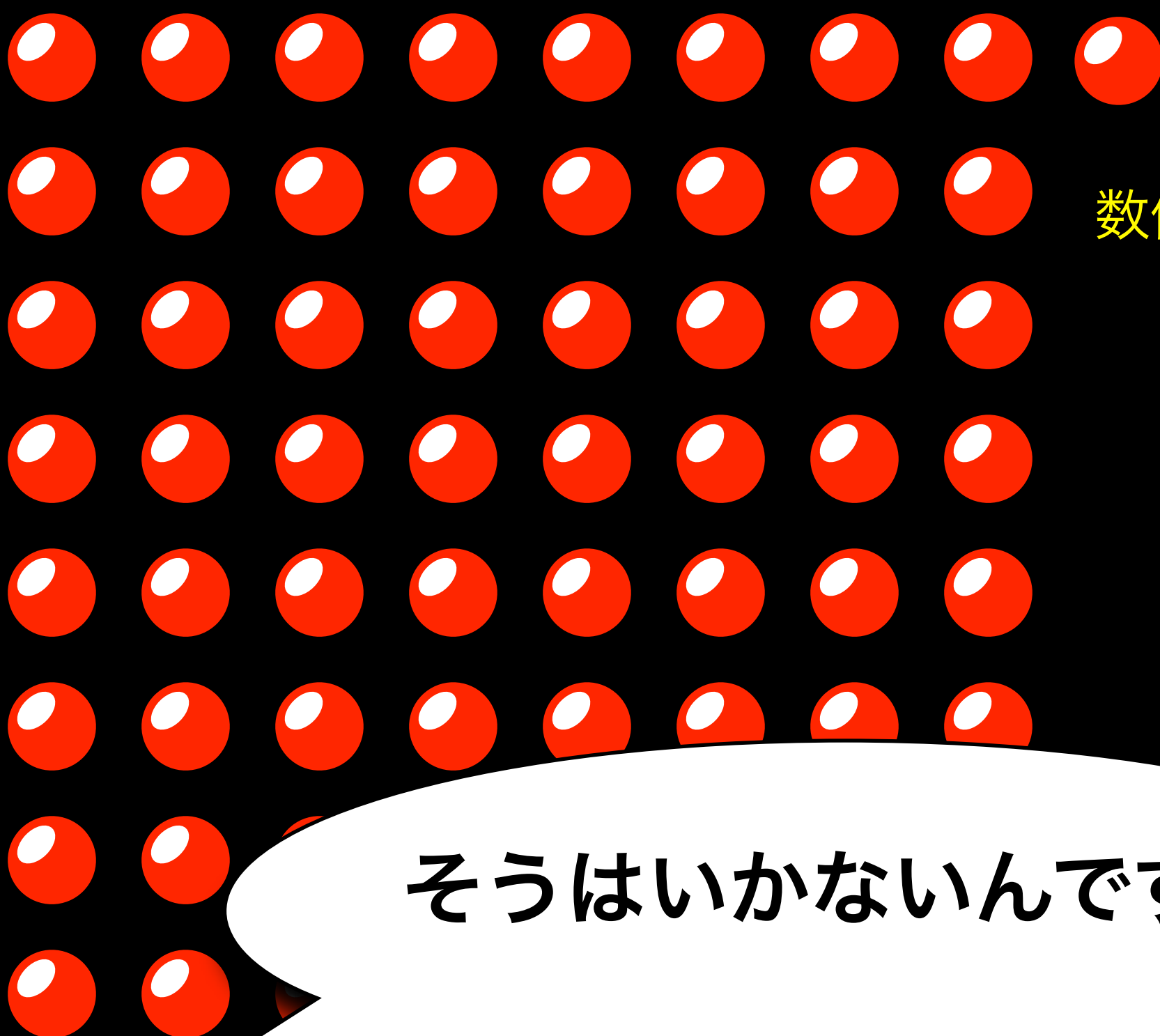
我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）

この残った物質で出来ている！

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



数億分の1の
差

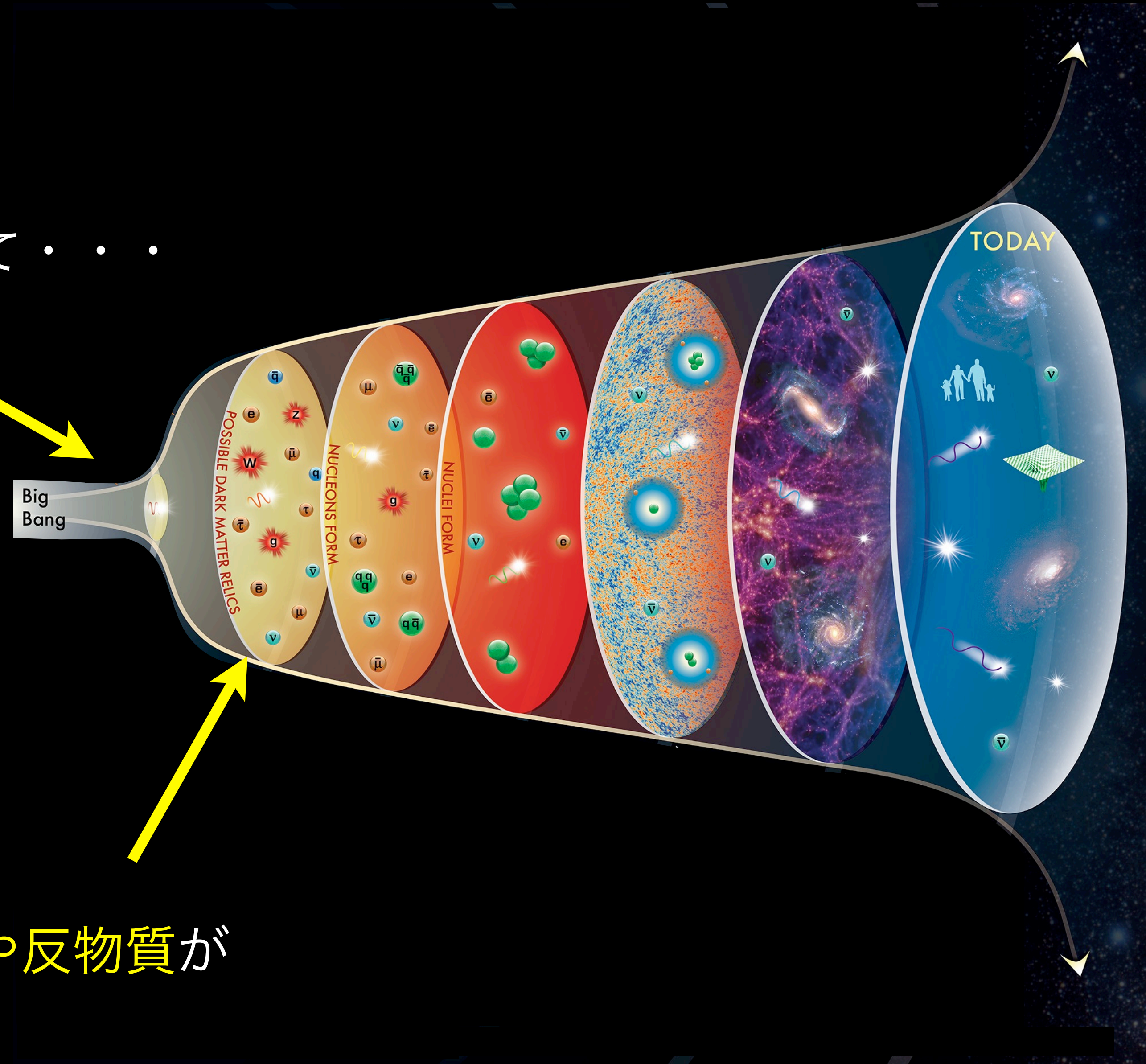
反物質



そうはいかないんです。

最初っから
あったんじゃない？

インフレーションによると、
最初は物質も反物質もなく、
真空のエネルギーだけがあって・・・

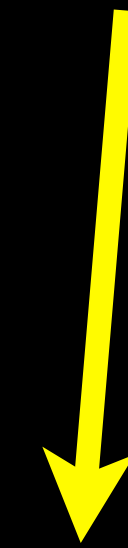
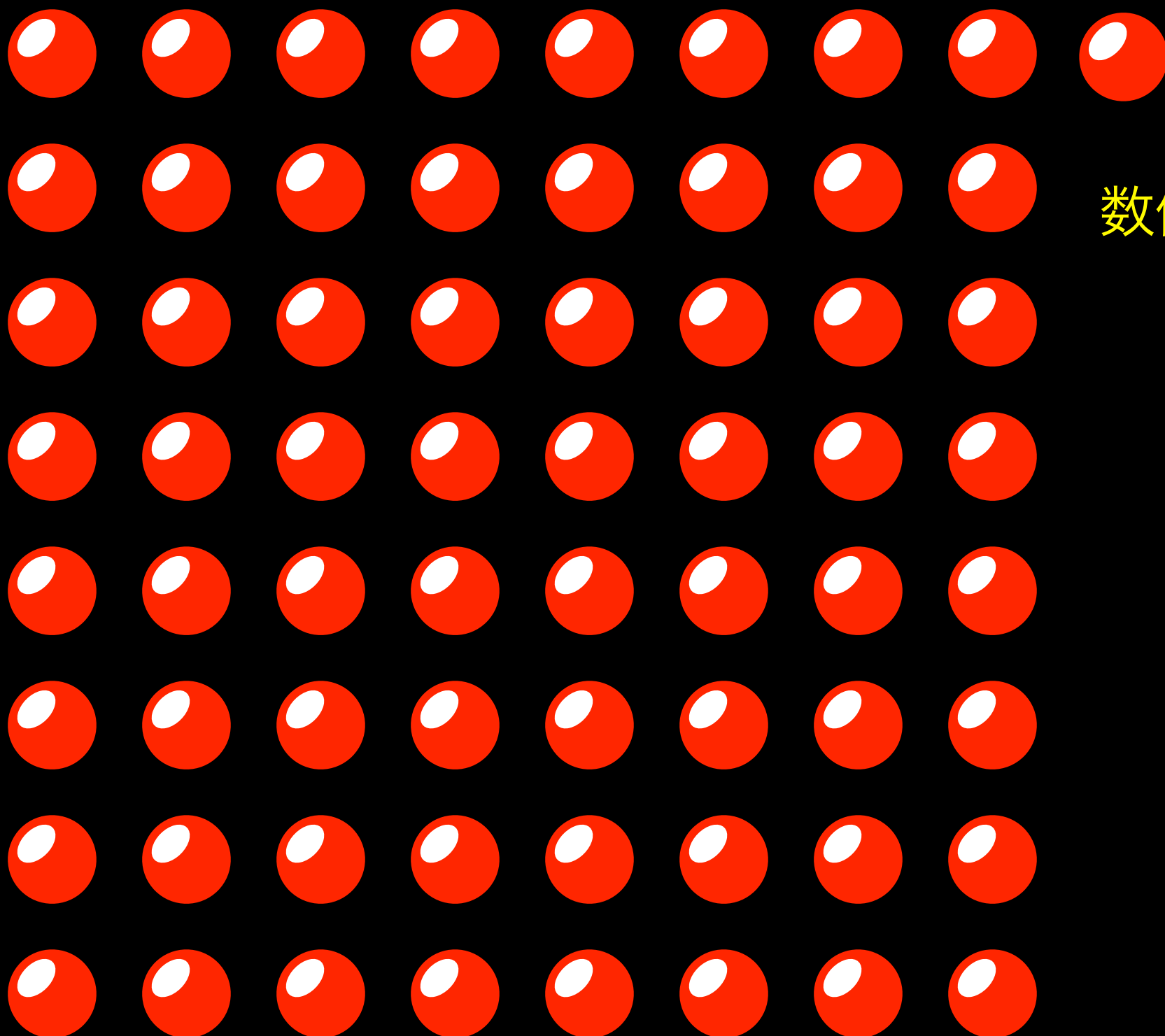


そこから物質や反物質が
作られた。

謎

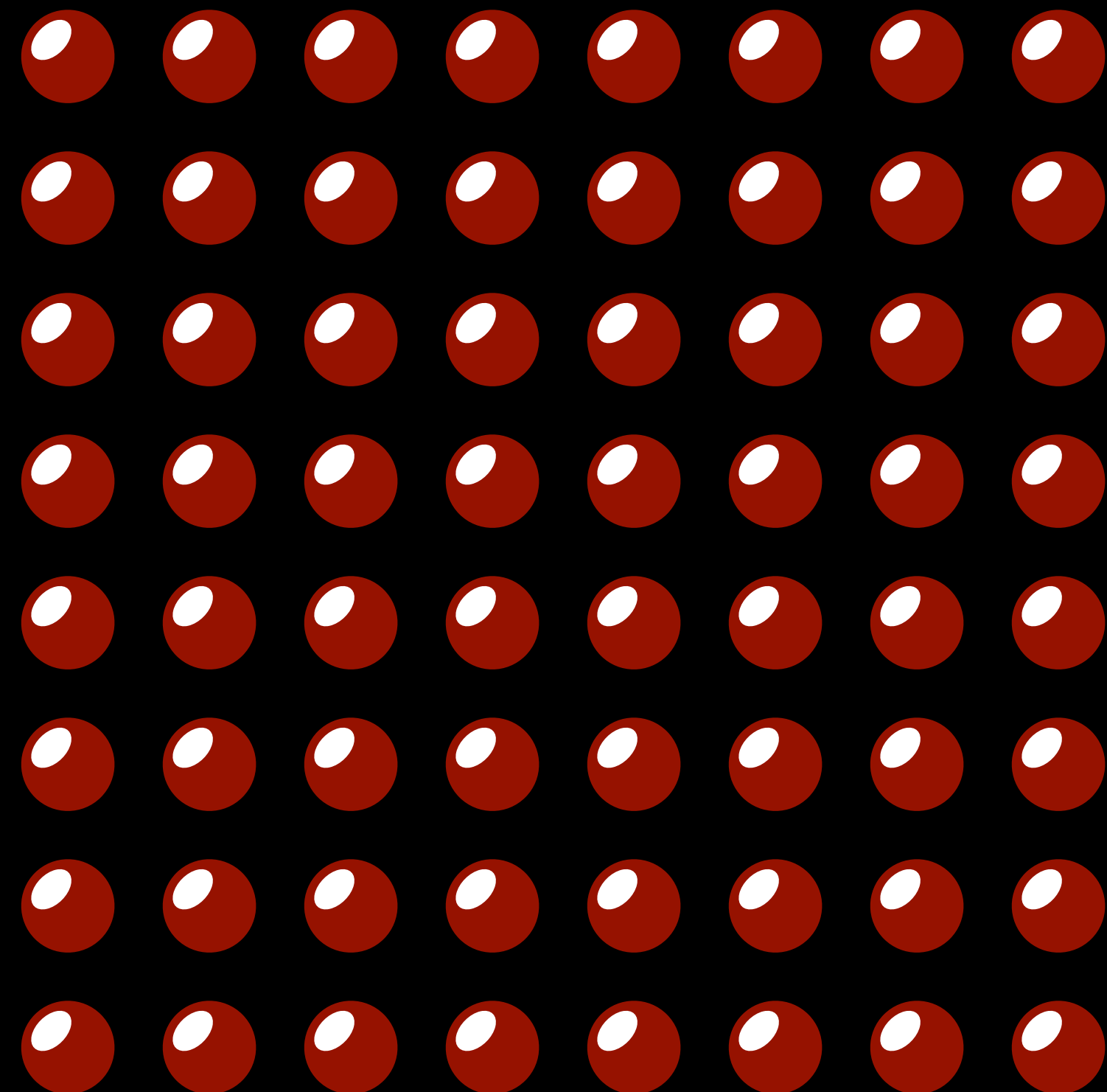
最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

物質



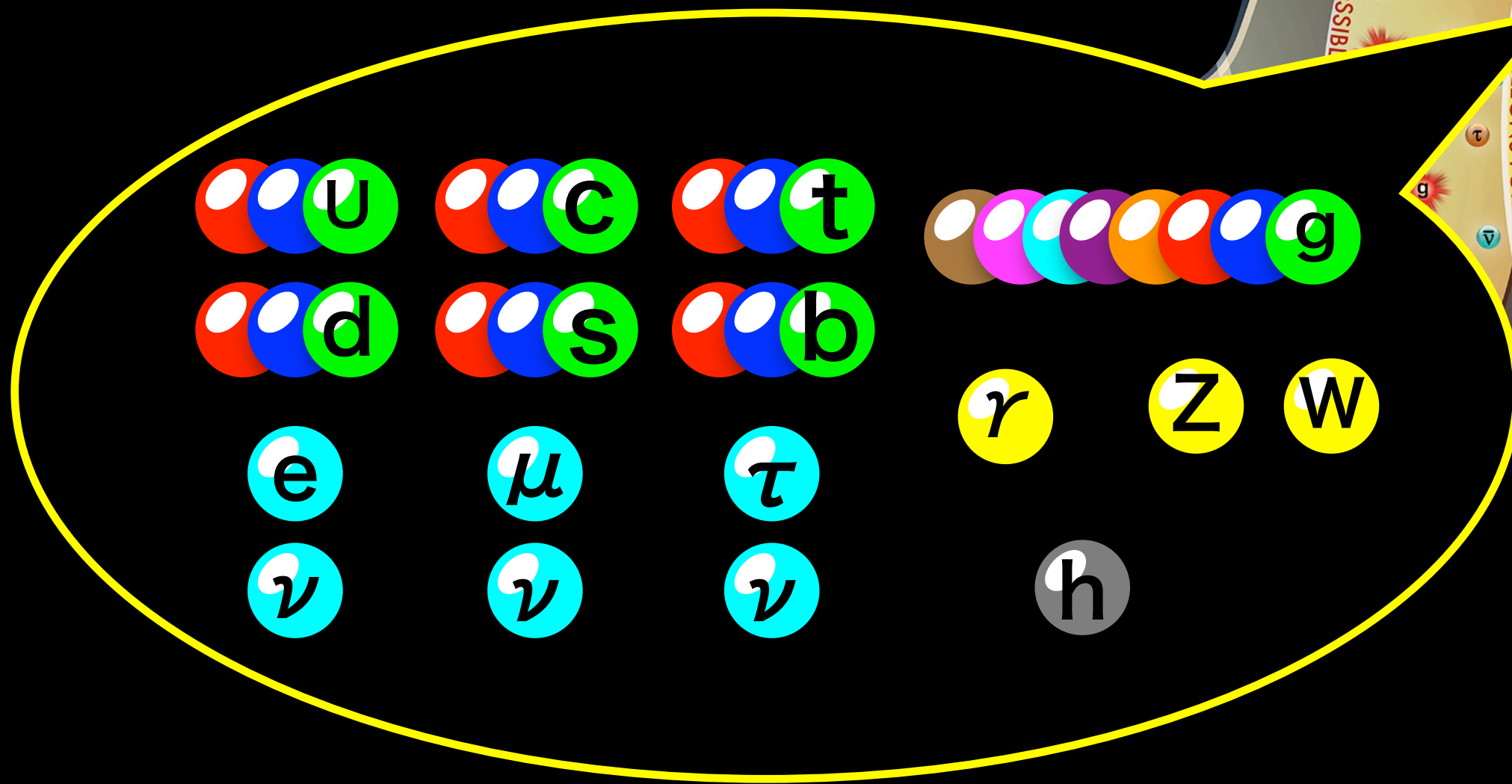
数億分の1の
差

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？



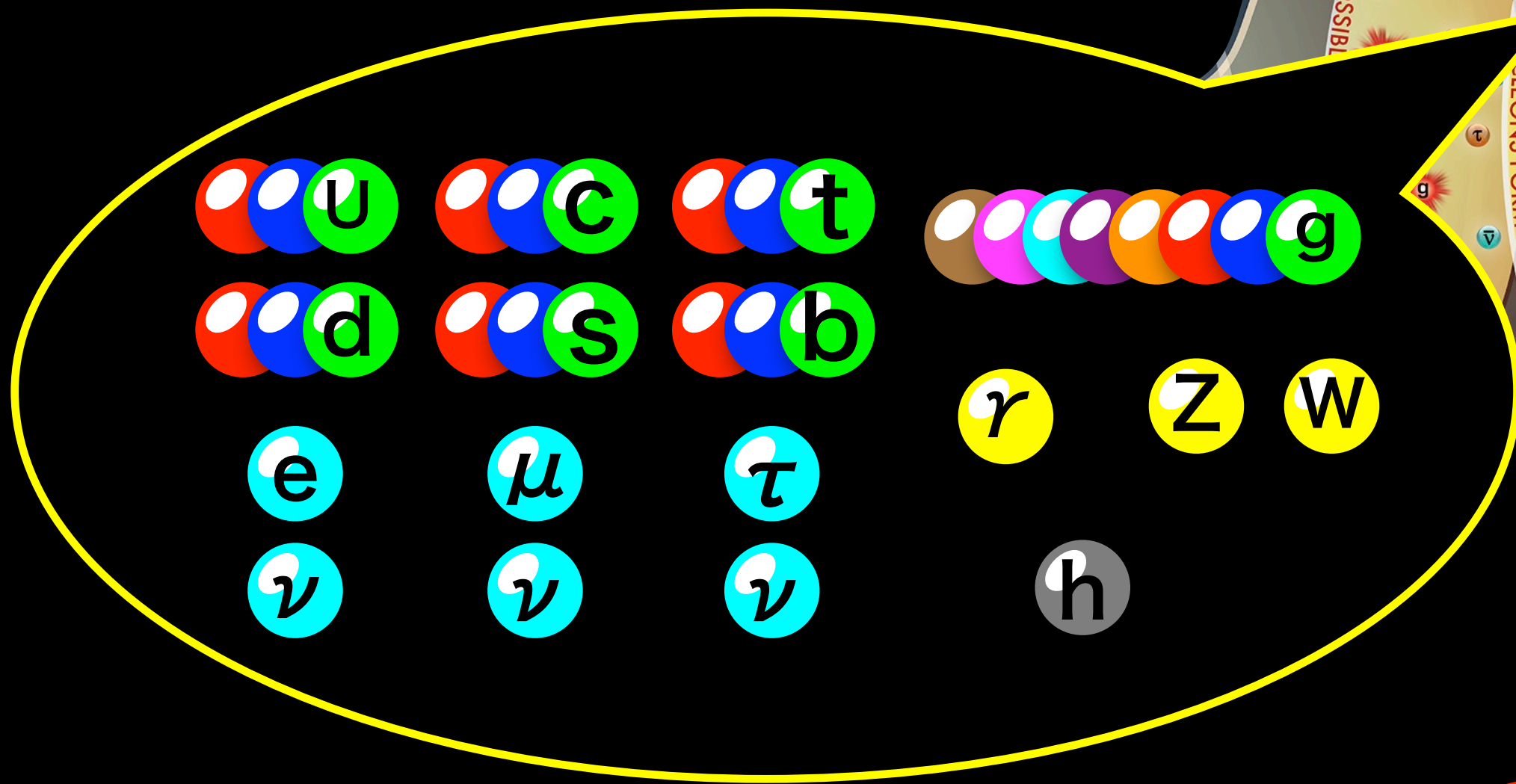
実は、**標準模型**では **物質＞反物質の起源は説明出来ない**
ことが知られている。

理由1：標準模型のC P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**。

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、標準模型では物質と反物質の
ことが知られている。

標準模型を超える素粒子理論が必要！

理由1：標準模型のC P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

素粒子

暗黒エネルギー

strong CP

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

インフレーション

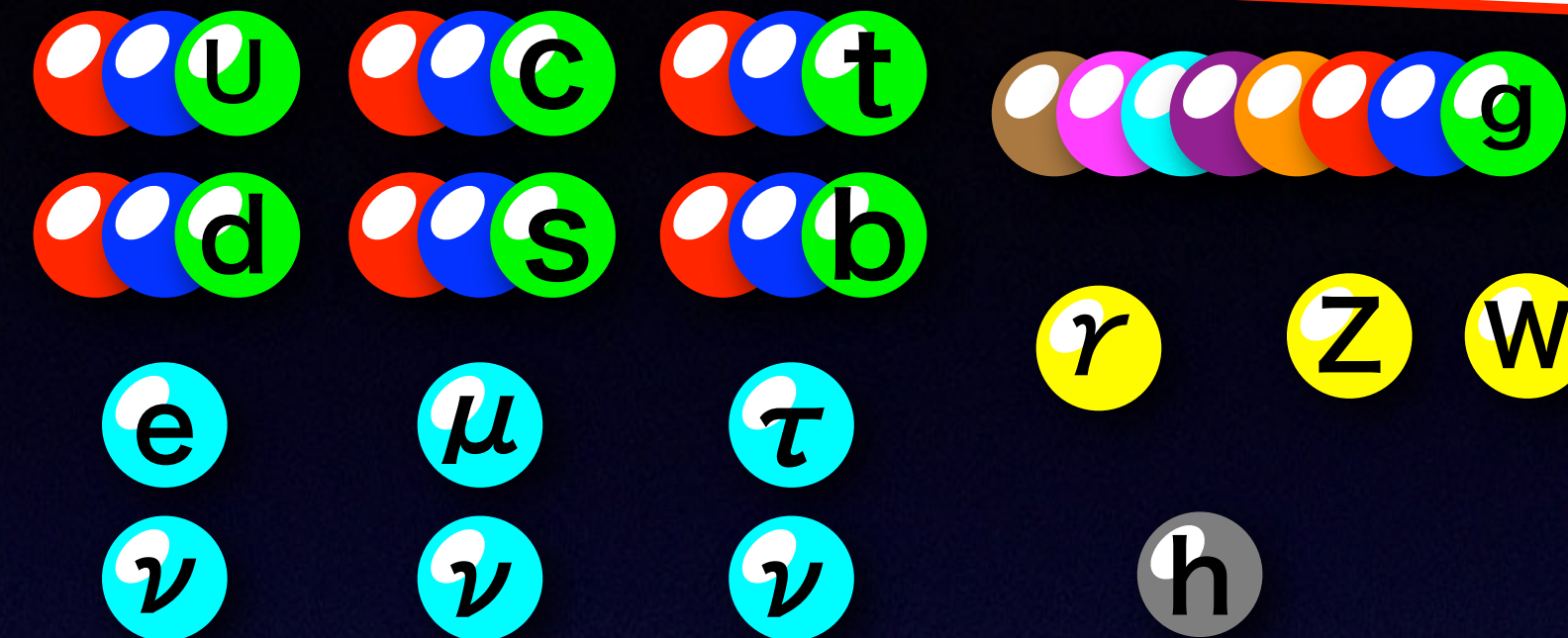
バリオン生成

宇宙背景放射
重力波

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

- 有力候補の1つ：右巻きニュートリノ

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

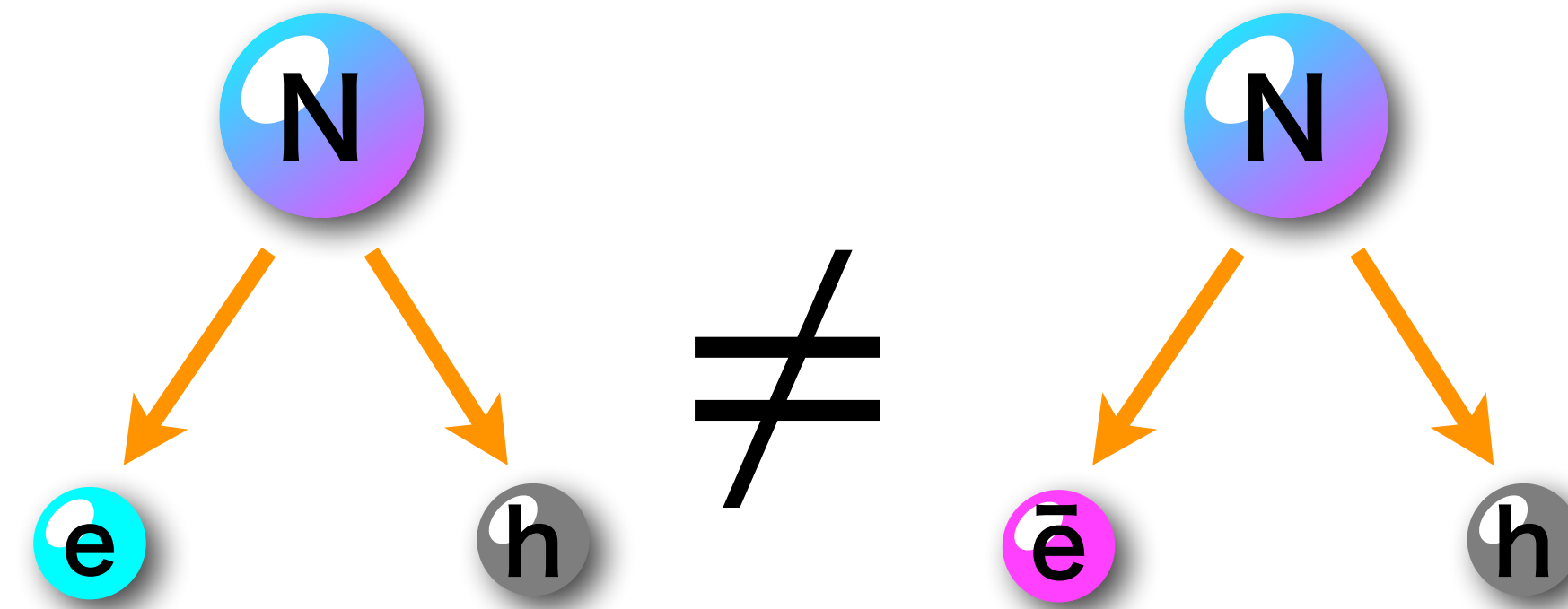


+

N_1
右巻

- 有力候補の1つ：右巻

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・・・。)

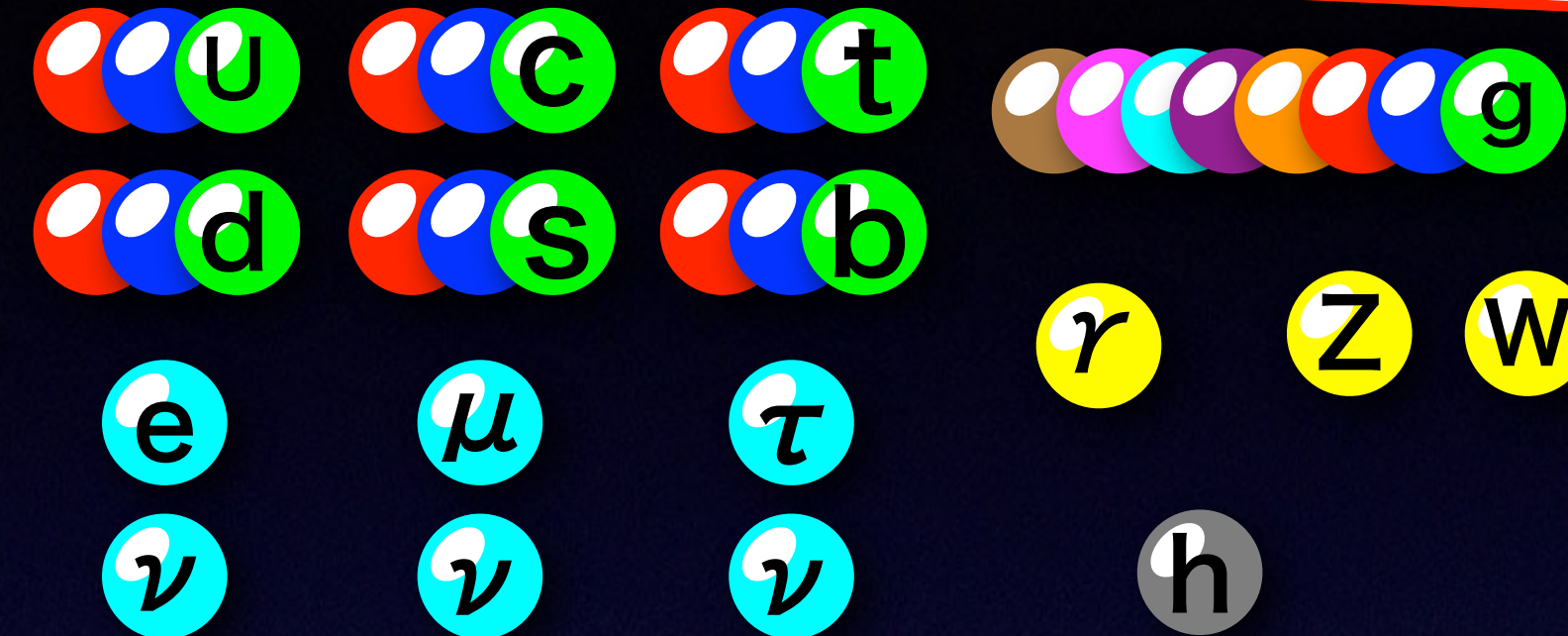
N_1 の崩壊 (CPを破っている) で

物質＞反物質を説明 [レプトジェネシス] 福来・柳田 1986

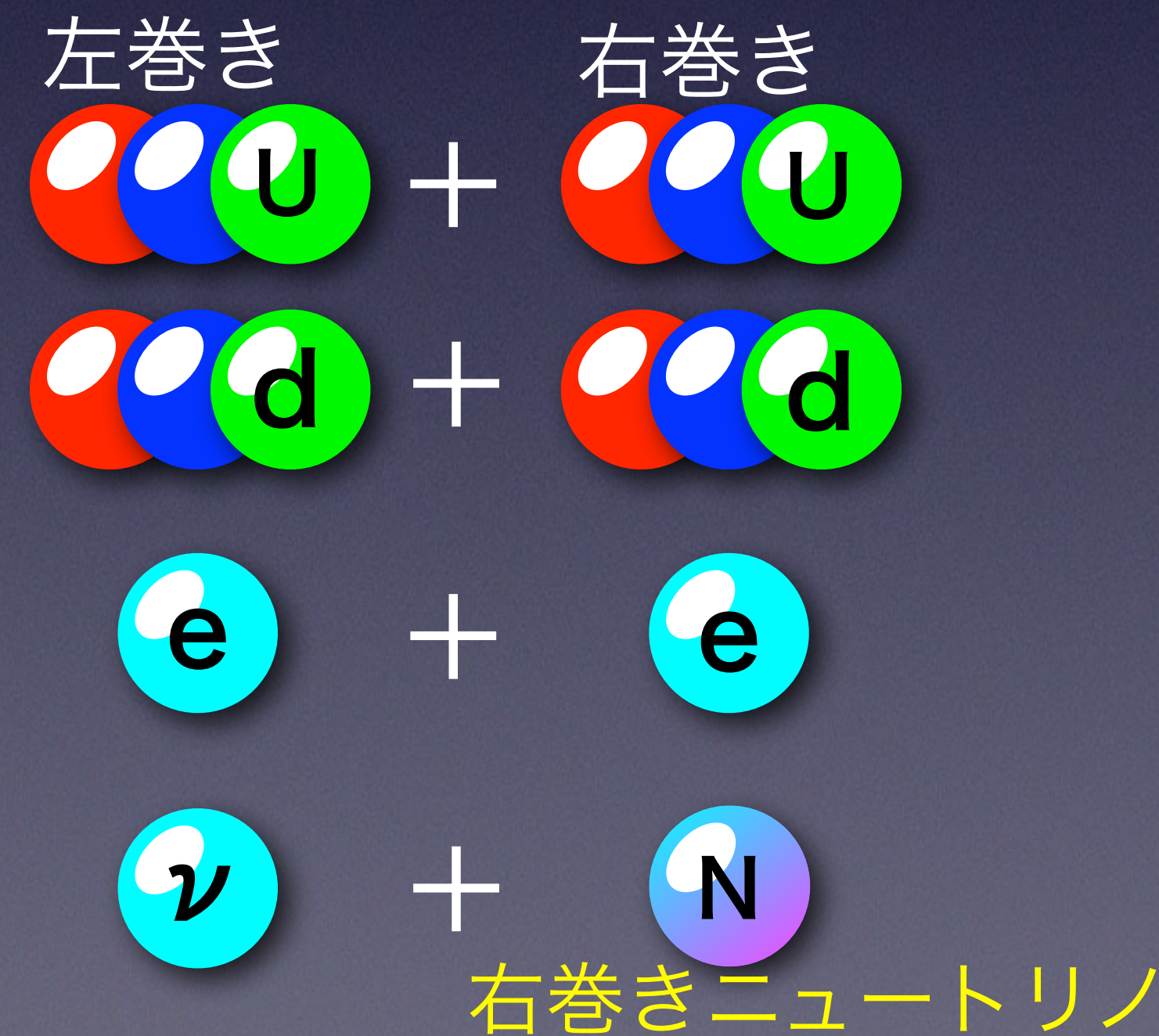
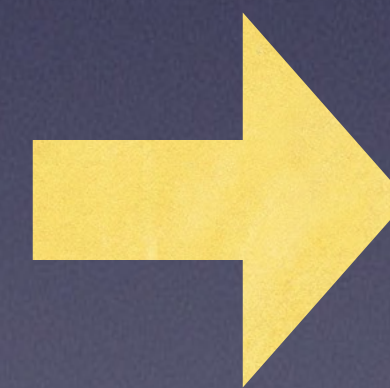
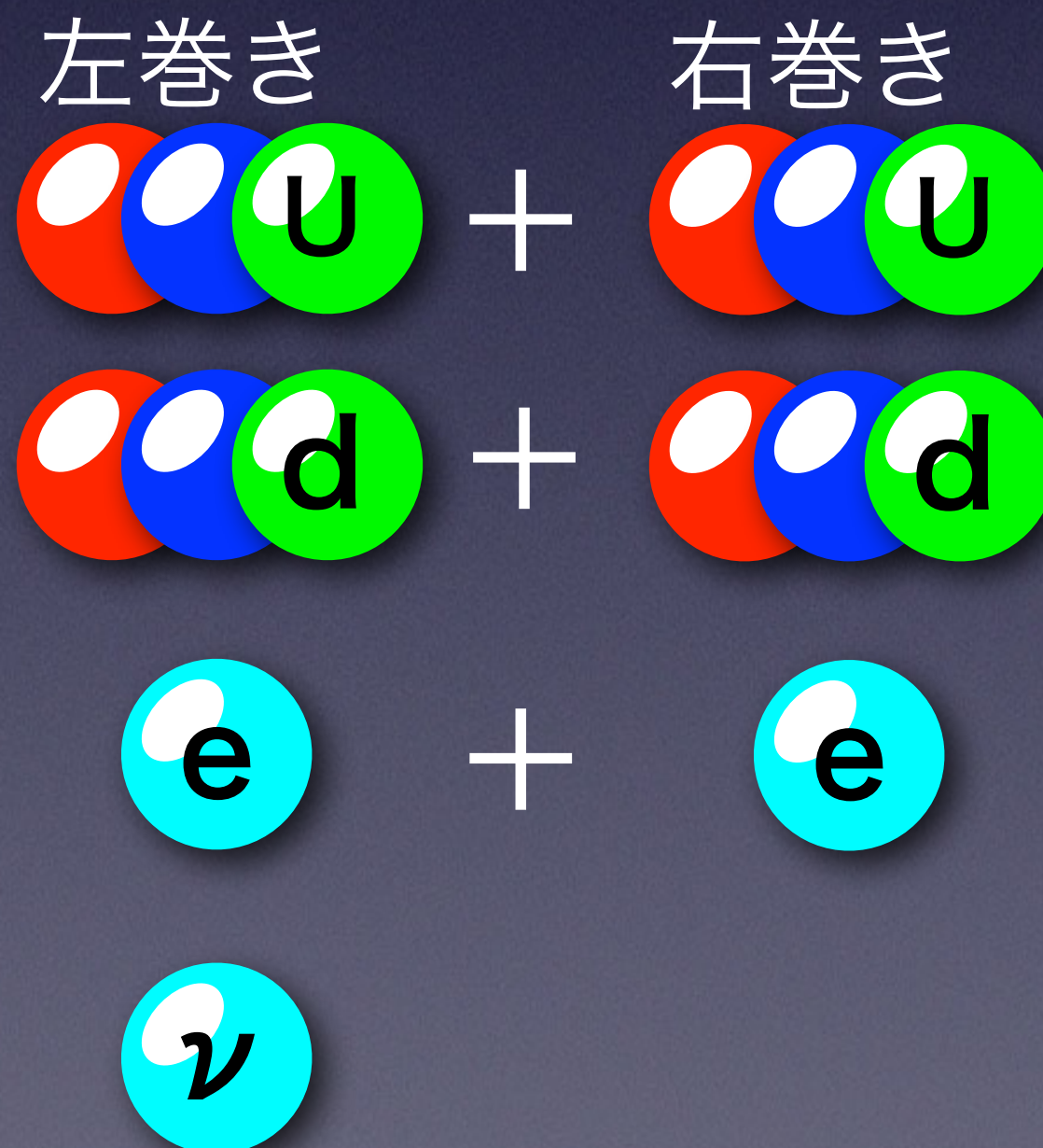
物質＞反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型



右巻きニュートリノ



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

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

インフレーション

宇宙背景放射
重力波

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

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

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

インフレーション

宇宙背景放射
重力波

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

またちょっと休憩
質問などあれば
お願いします



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

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

次は、暗黒物質の謎

インフレーション

宇宙背景放射
重力波

バリオン生成

レプトジェネシス

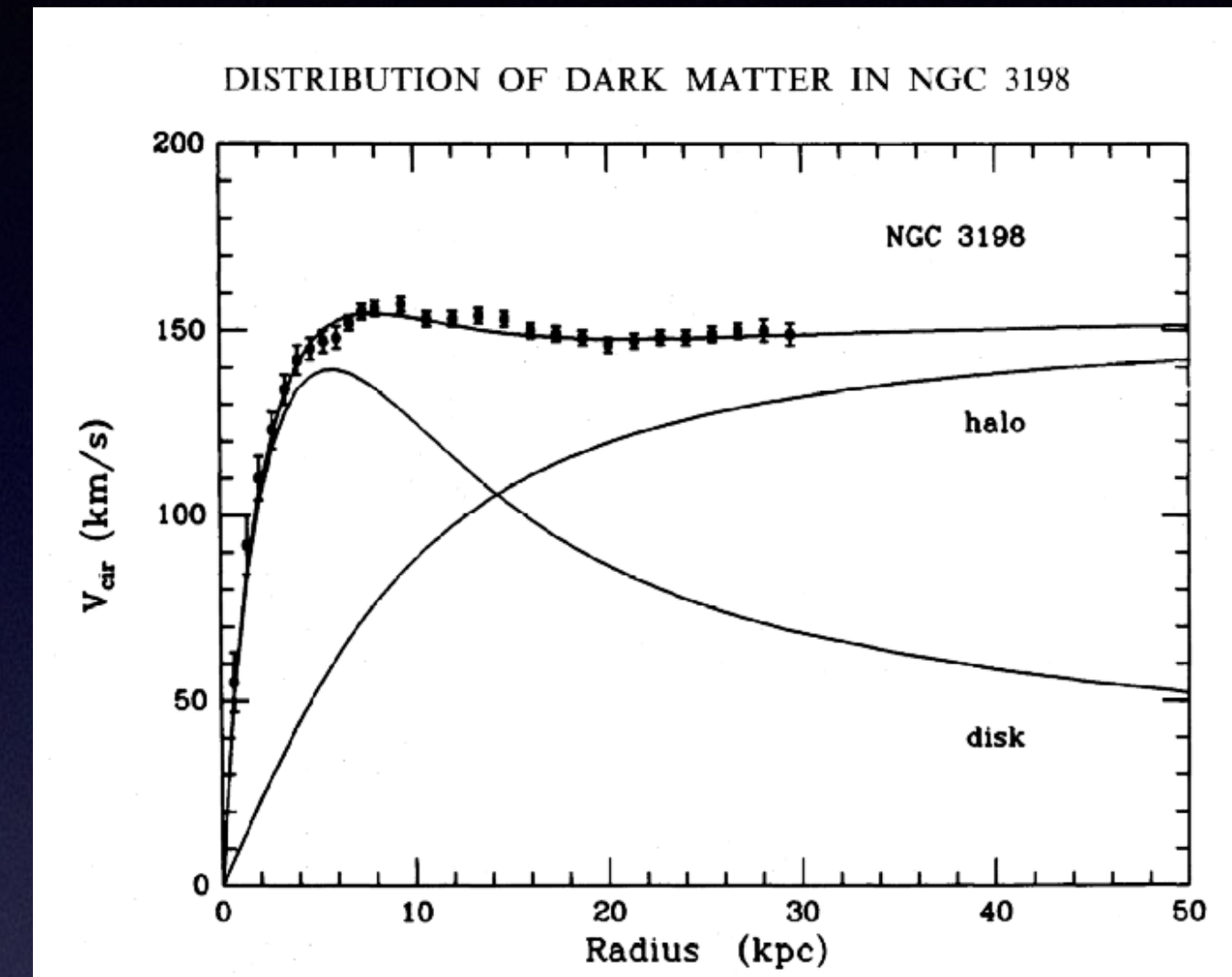
(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

暗黒物質：重力でしか見えない物質

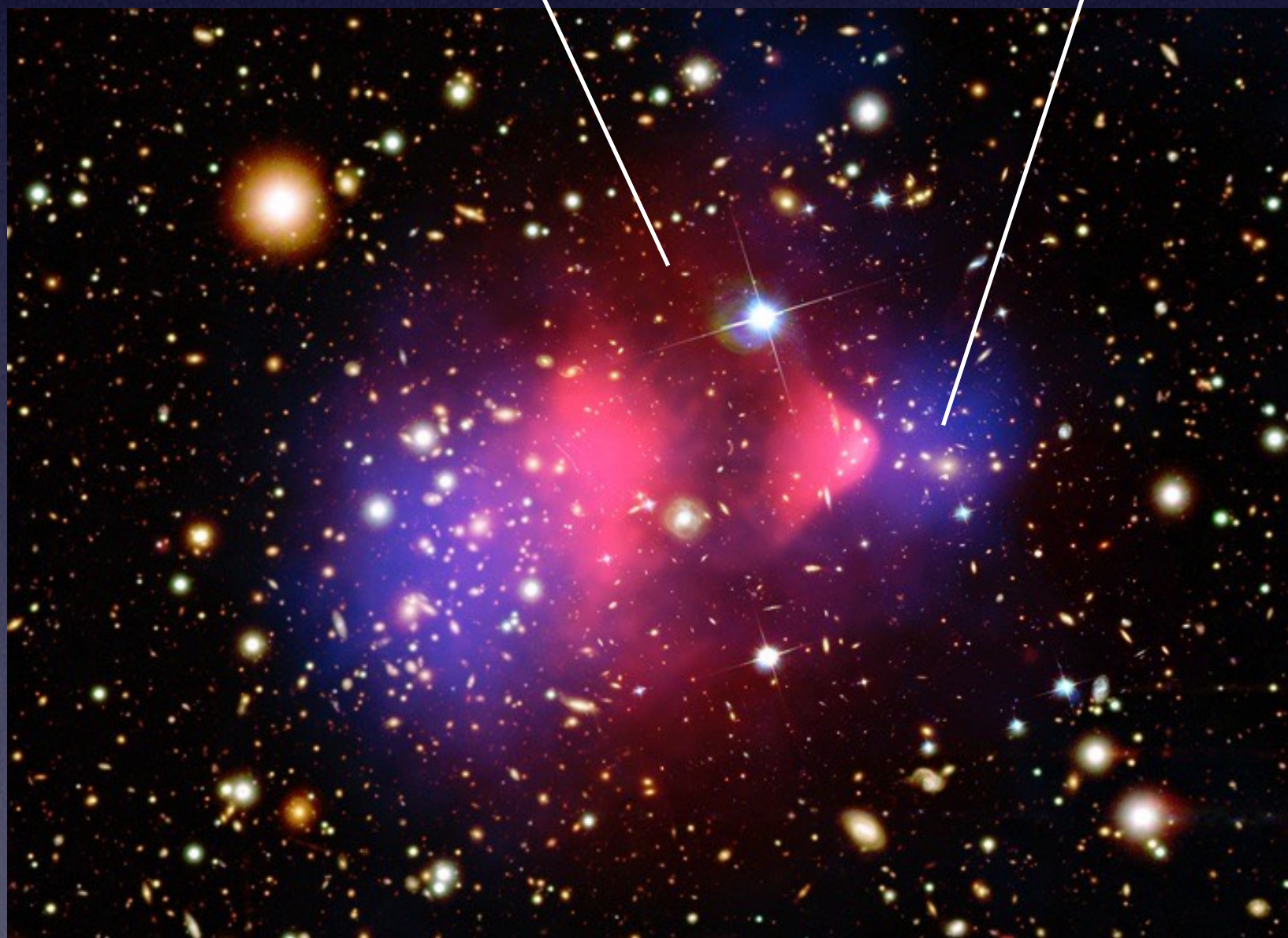
正体は分からないけど、
存在するという証拠は
沢山ある・・・。

- ・ 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
- ・ . . .



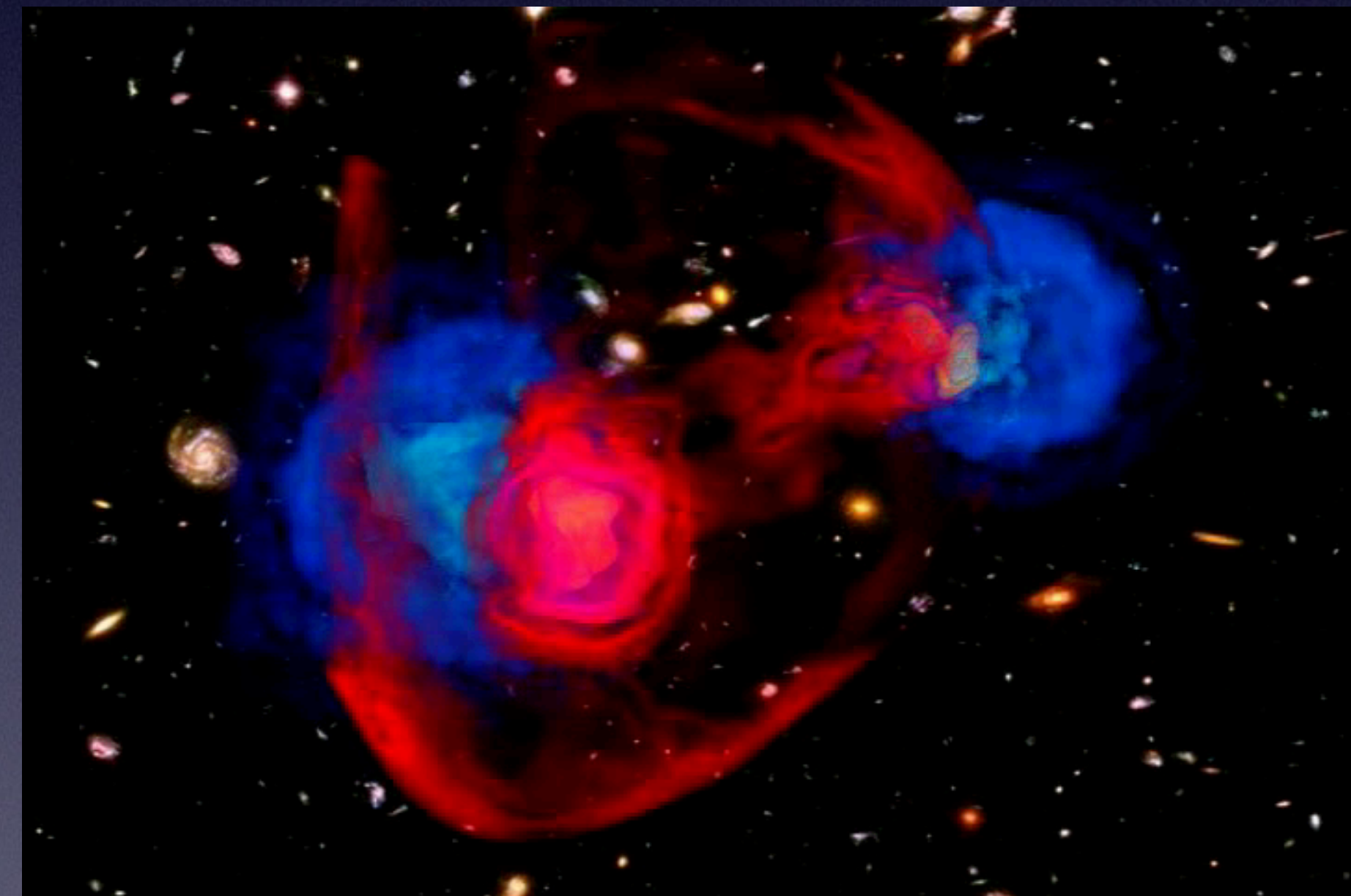
暗黒物質：重力でしか見えない物質

X線で見た像
(ふつうの物質)



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.

重力レンズで見た像
(暗黒物質)

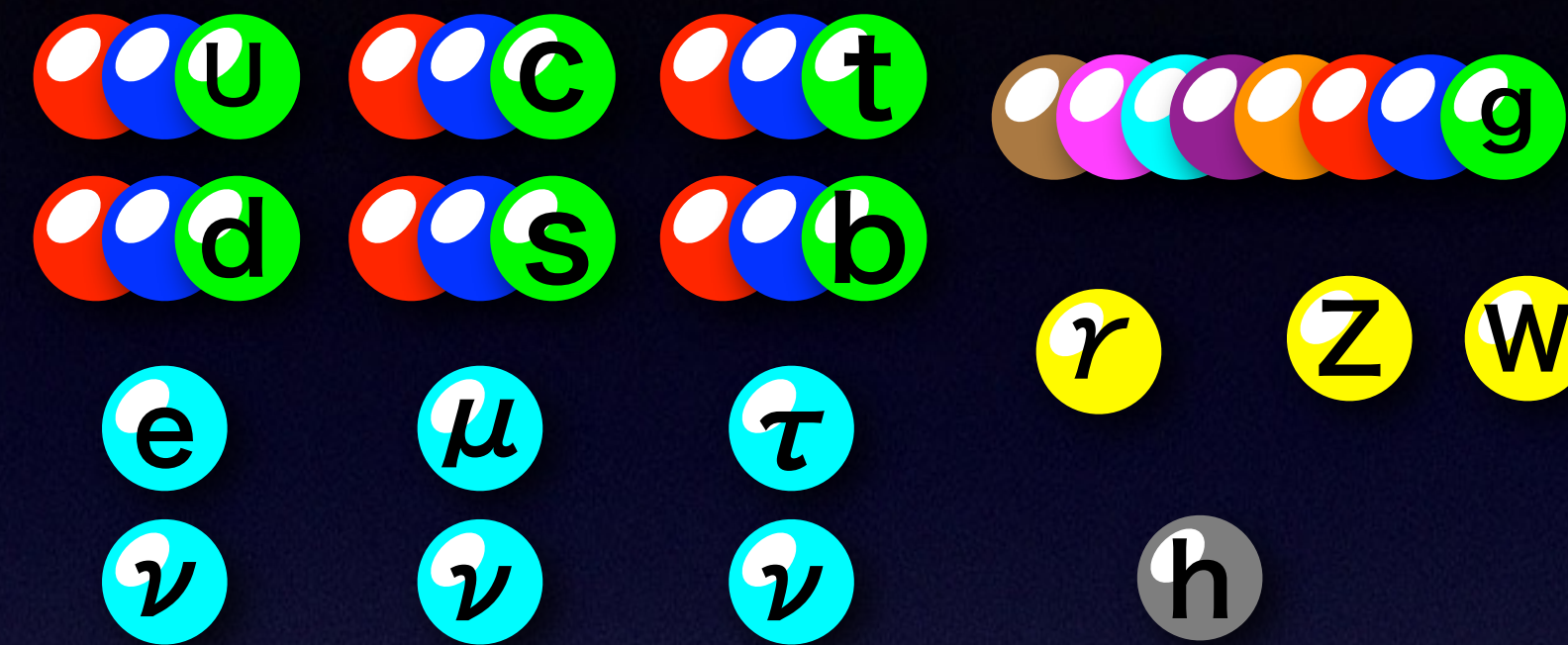


Credit: J.Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)
<http://www.slac.stanford.edu/~jwise/research/movies/HiResBullet.mov>

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



標準模型の中には暗黒物質になれる
粒子はない！！

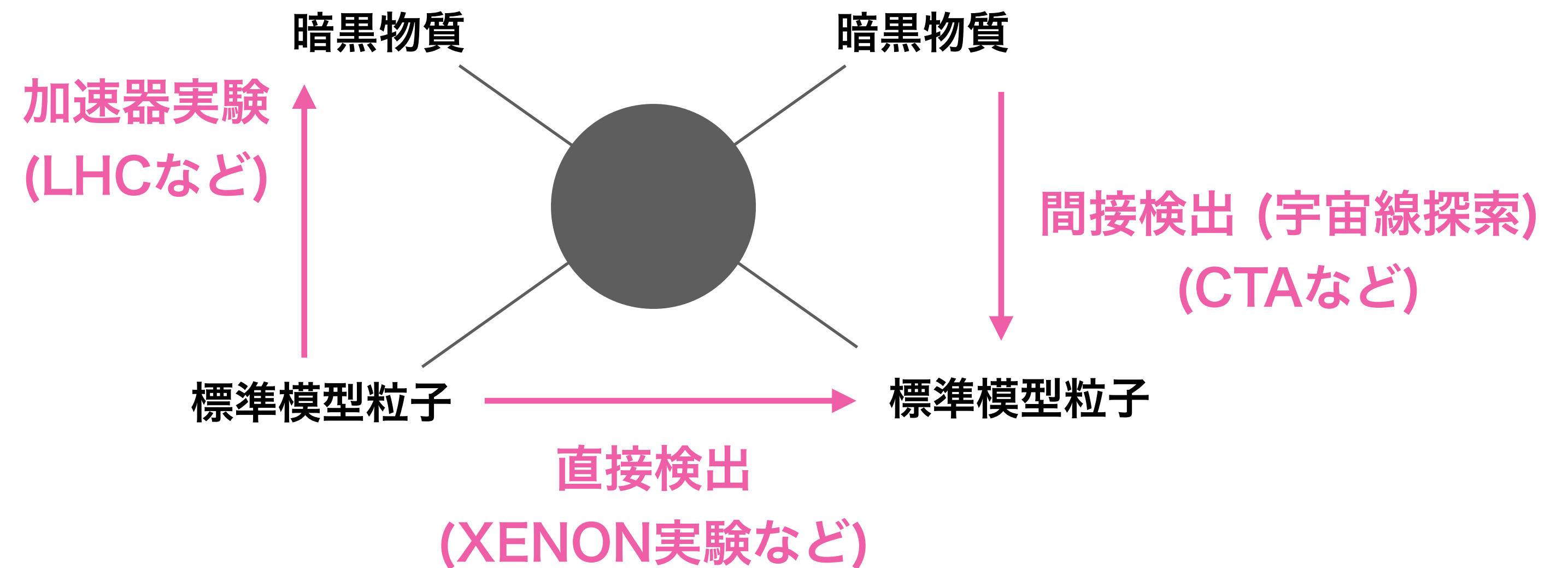
何か新しい粒子、新しい理論が必要

x ?

WIMP 暗黒物質 (WIMP = Weakly Interacting Massive Particle)

- ▶ 宇宙の暗黒物質の候補
- ▶ 電荷ゼロで安定。
- ▶ 電弱スケールのくらいの質量と「弱い相互作用」くらいの大きさの相互作用。
- ▶ 「thermal relic シナリオ」により残存量を自然に説明できる。
- ▶ WIMPの例：超対称性粒子のLSP

- ▶ 様々な探索実験が行われている。



理論的にも、それぞれに詳しい研究者がいたりして、比較的大きな研究テーマとなっています。
第3週以降の講義で少し詳しく解説する予定です。

WIMP 暗黒物質

► WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, **thermal relic シナリオ**.

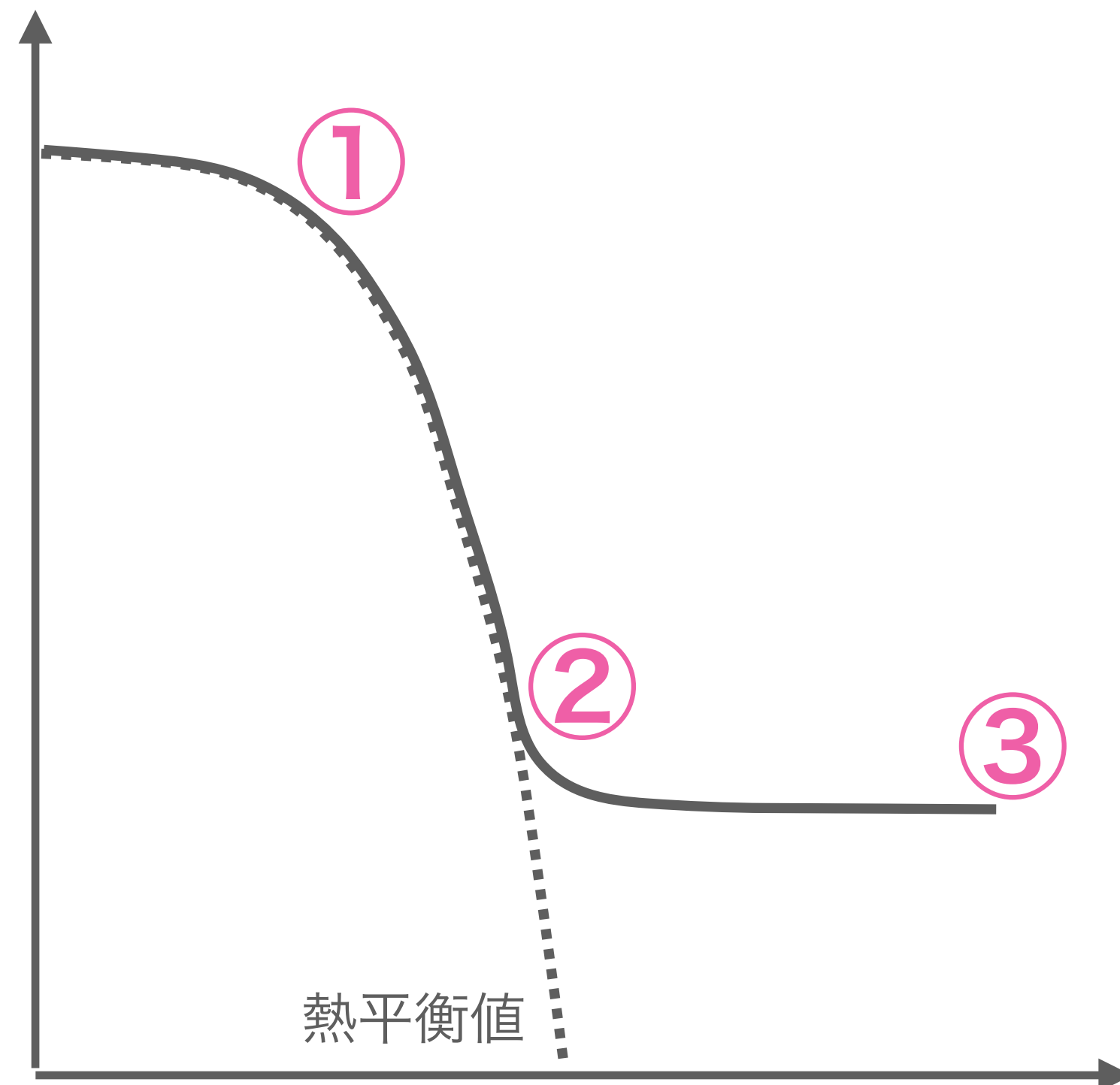
① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

DMの数 (comoving)



$$\Omega_{\text{DM}} \sim 0.1 \left(\frac{1 \text{ pb}}{\langle \sigma_{\text{annihilation}} v \rangle} \right)$$

weak scale mass,
weak scale interaction
でちょうど良い。"WIMP miracle"

WIMP 暗黒物質

▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, **thermal relic シナリオ**.

① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

WIMP 暗黒物質

► WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, **thermal relic シナリオ**.

① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

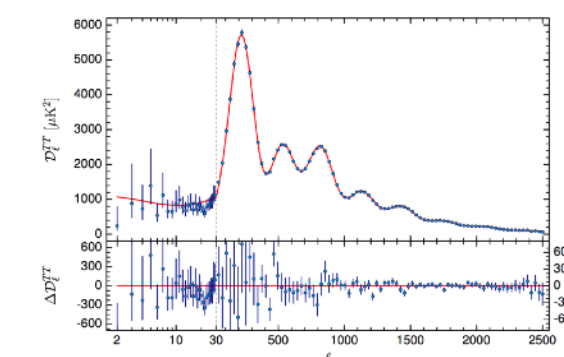
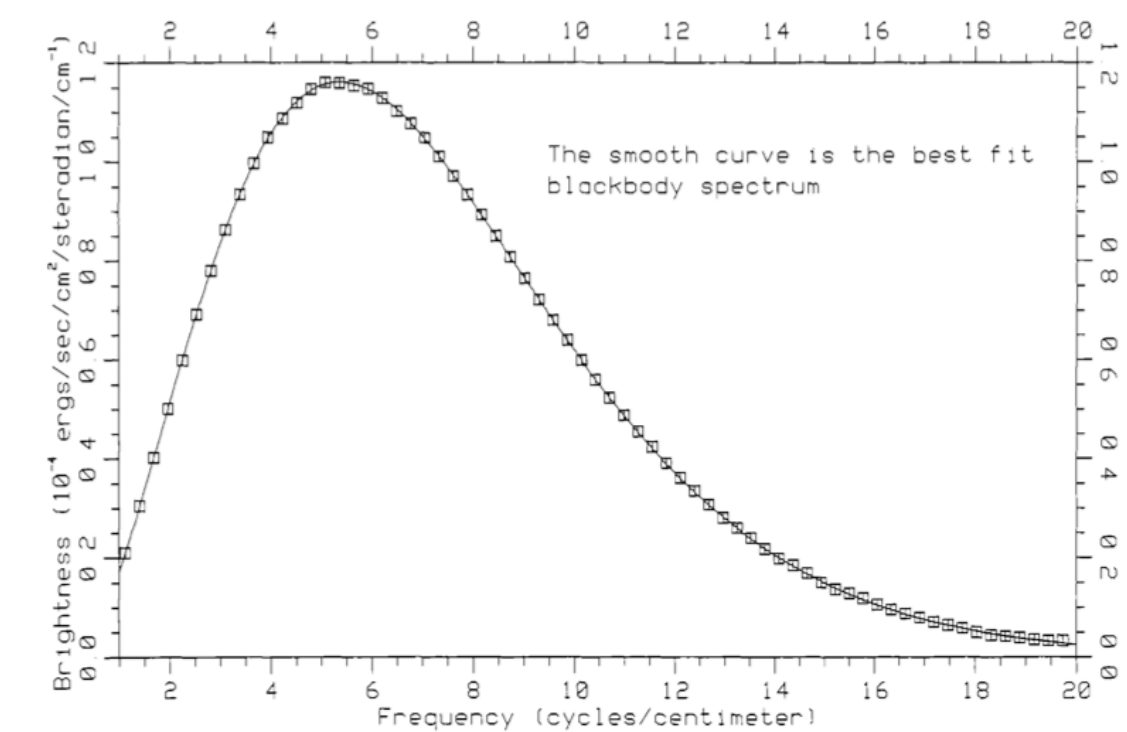
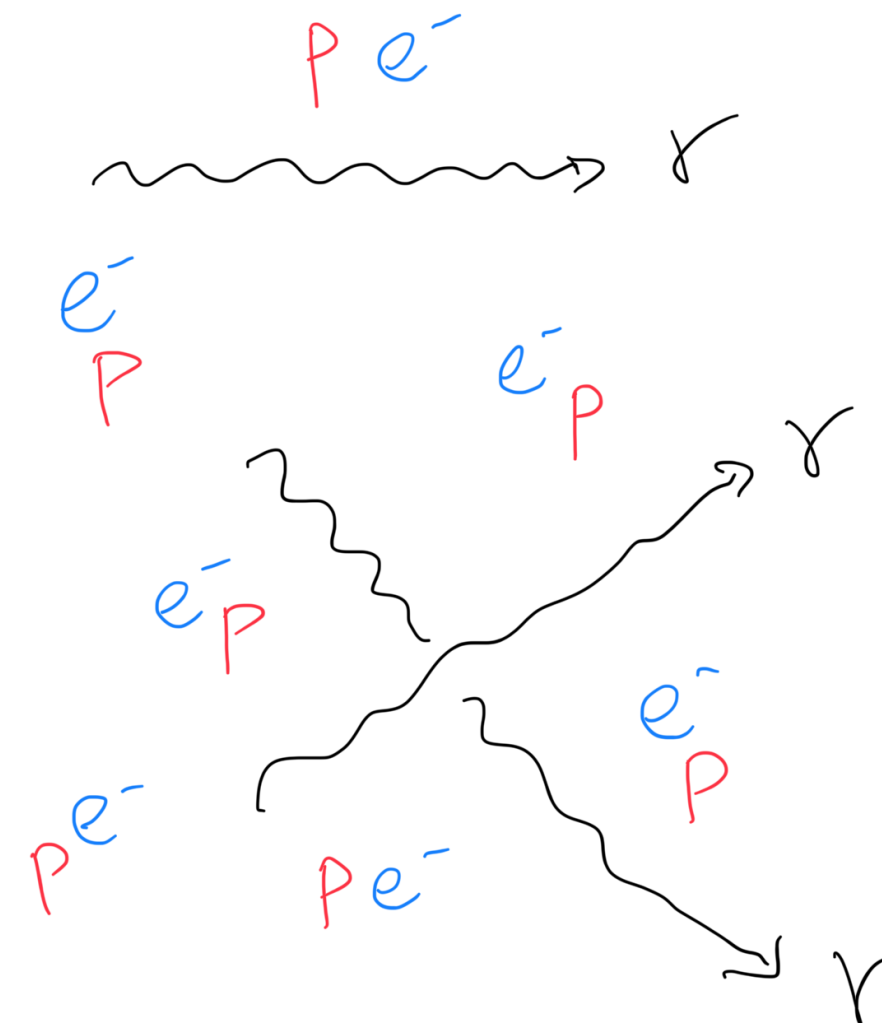
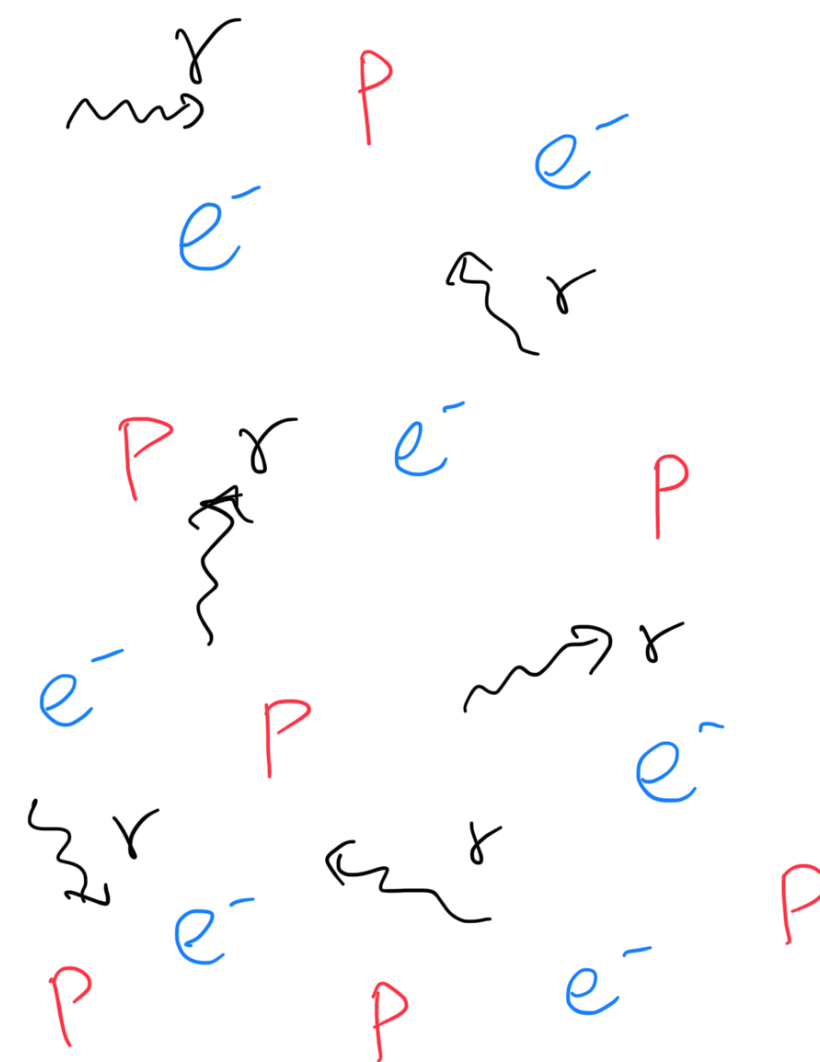
他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

例 1 : CMB

① $T > 3000 \text{ K}$ → ② $T \sim 3000 \text{ K}$ → ③ 2.7 K CMB



WIMP 暗黒物質

► WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, **thermal relic シナリオ**.

① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

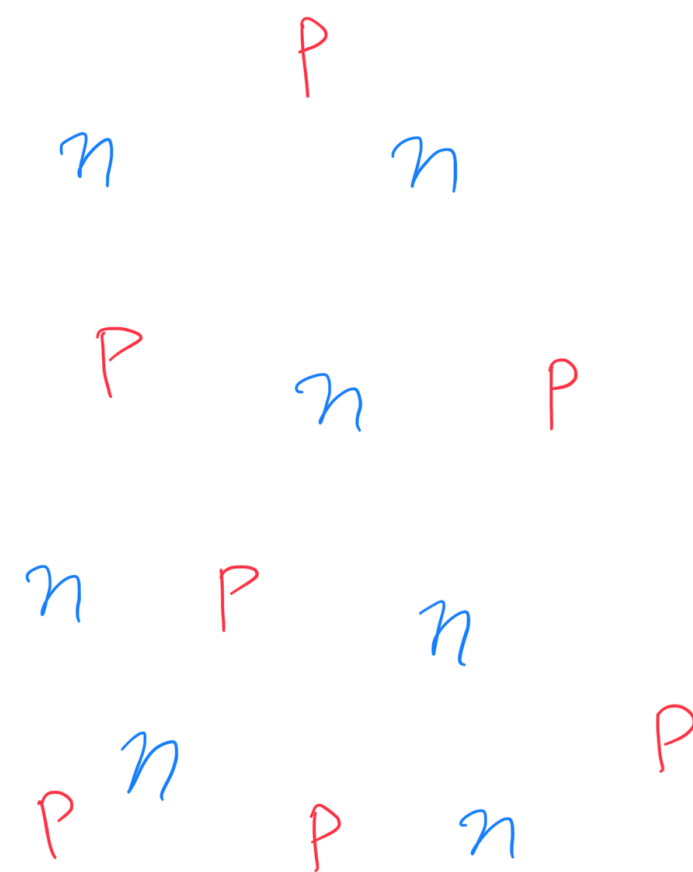
他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

例 2 : BBN

① $T \gg 1 \text{ MeV}$ → ② $T \sim 1 \text{ MeV}$ → ③ 現在



+ $\mathcal{O}(10^0) \times (e^\pm, \gamma, \nu)$

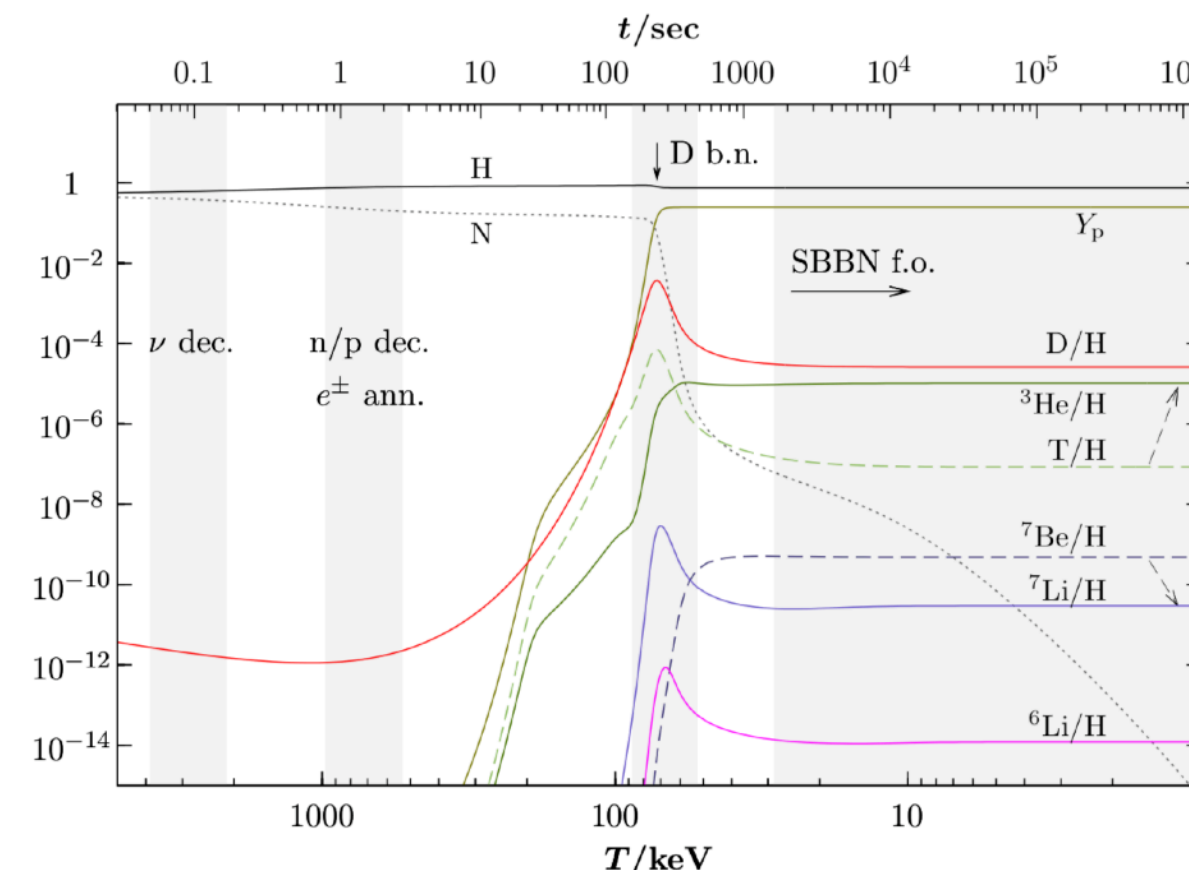


fig. from 1011.1054

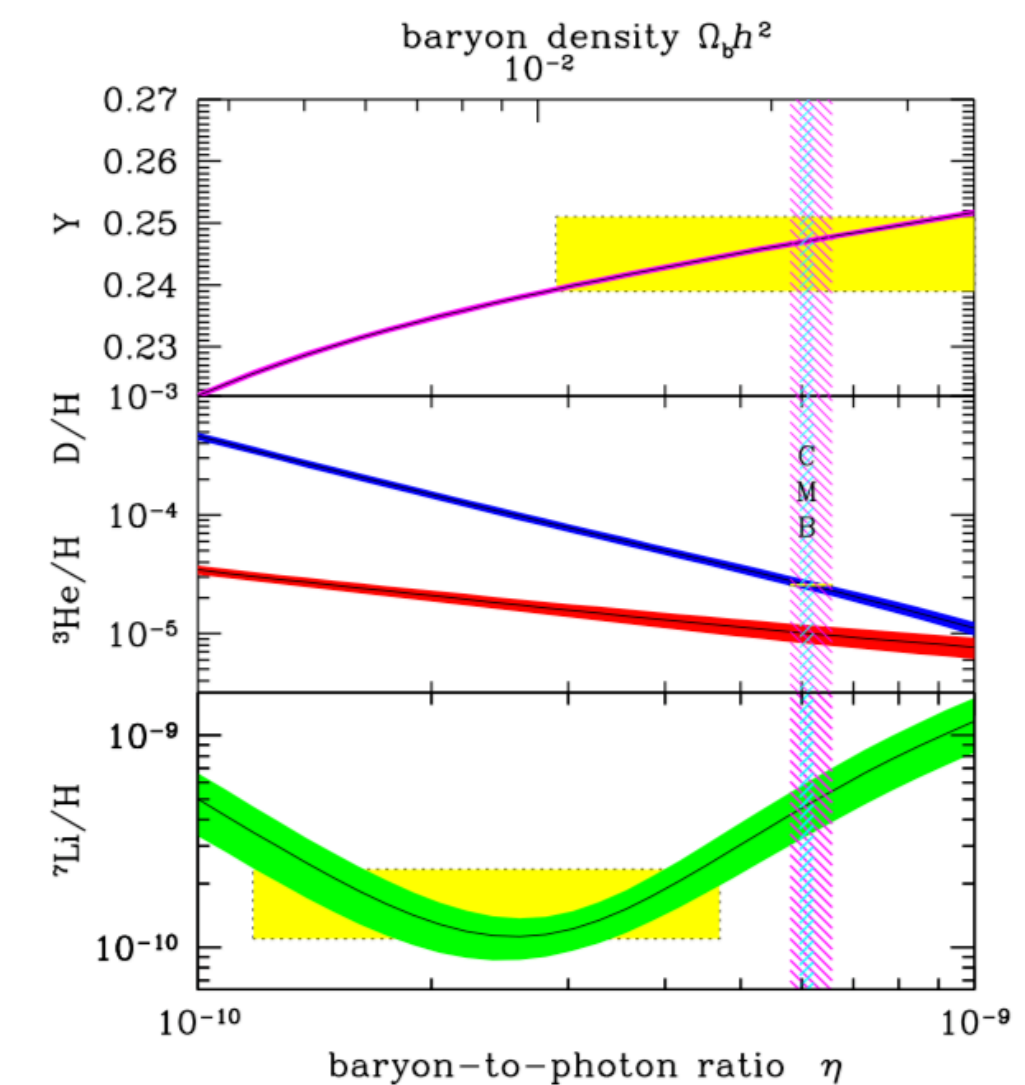


fig. from PDG

WIMP 暗黒物質

► WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, **thermal relic シナリオ**.

① 熱かった → ② 冷えた → ③ 今に至る

他の粒子たちと熱平衡

熱平衡から外れる

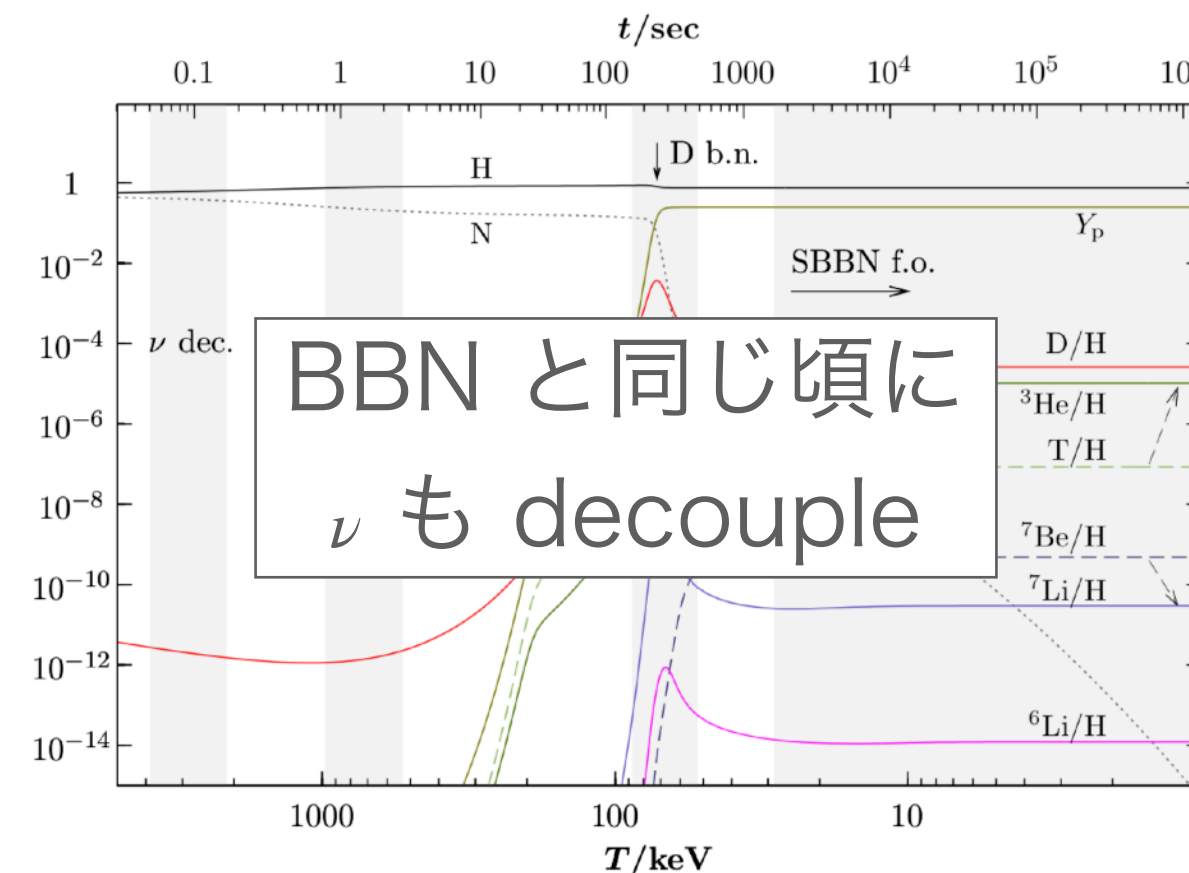
あとは宇宙膨張に従うだけ

例 3 : $C_\nu B$

① $T \gg 1 \text{ MeV}$ → ② $T \sim 1 \text{ MeV}$ → ③ 現在

p
 n n
 p n p
 n p n
 p n p n

+ $\mathcal{O}(10^0) \times (e^\pm, \gamma, \nu)$



1.9 K の $C_\nu B$ がいるはず。
いつか観測出来るかも？

WIMP 暗黒物質

▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生

① 熱かった → ②

他の粒子たちと熱平衡

熱

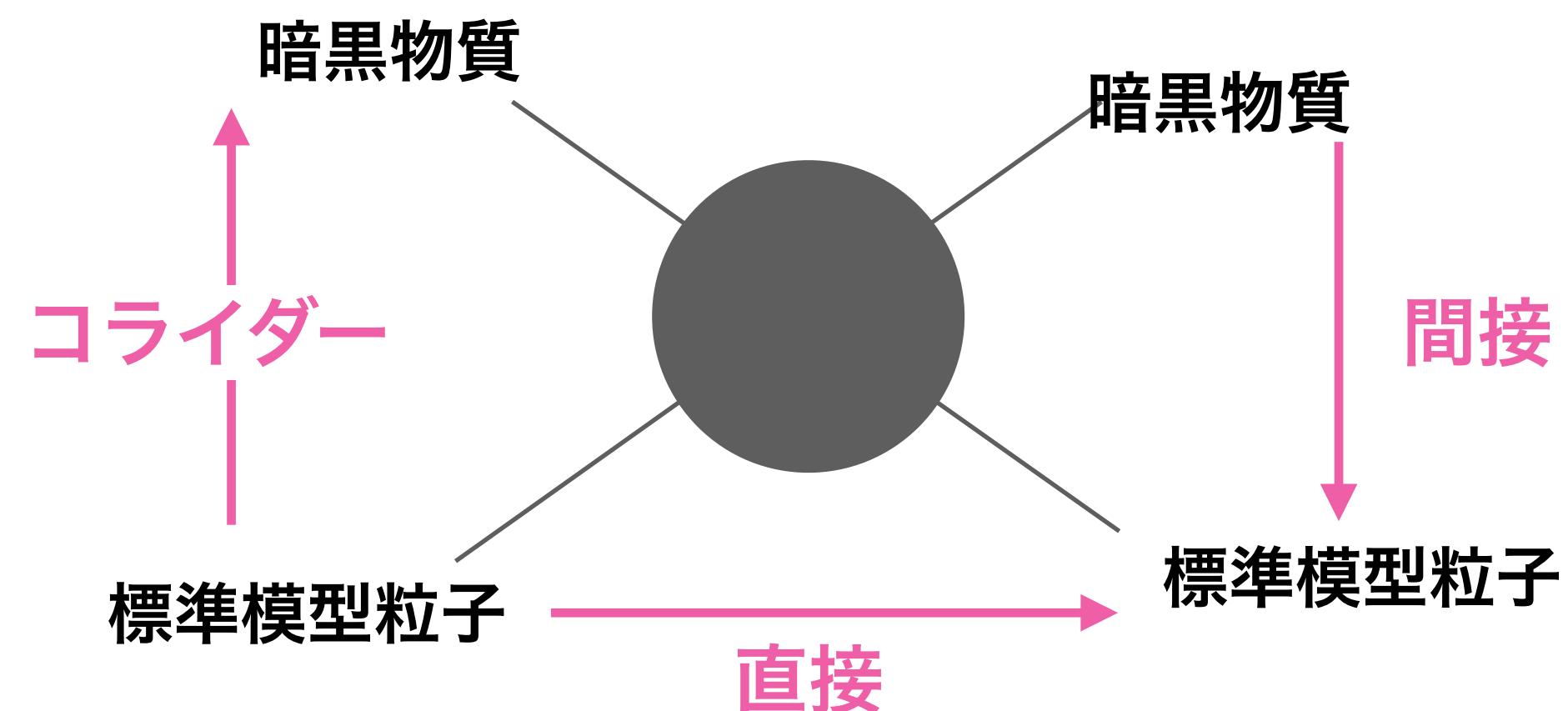
例 4 になるか? : WIMP DM !!!

DMの数 (comoving)

熱平衡値

m_{DM}/T (時間)

しかも検証可能!



$$\Omega_{\text{DM}} \sim 0.1 \left(\frac{1 \text{ pb}}{\langle \sigma_{\text{annihilation}} \nu \rangle} \right)$$

WIMP 暗黒物質

▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生

① 熱かった → ②

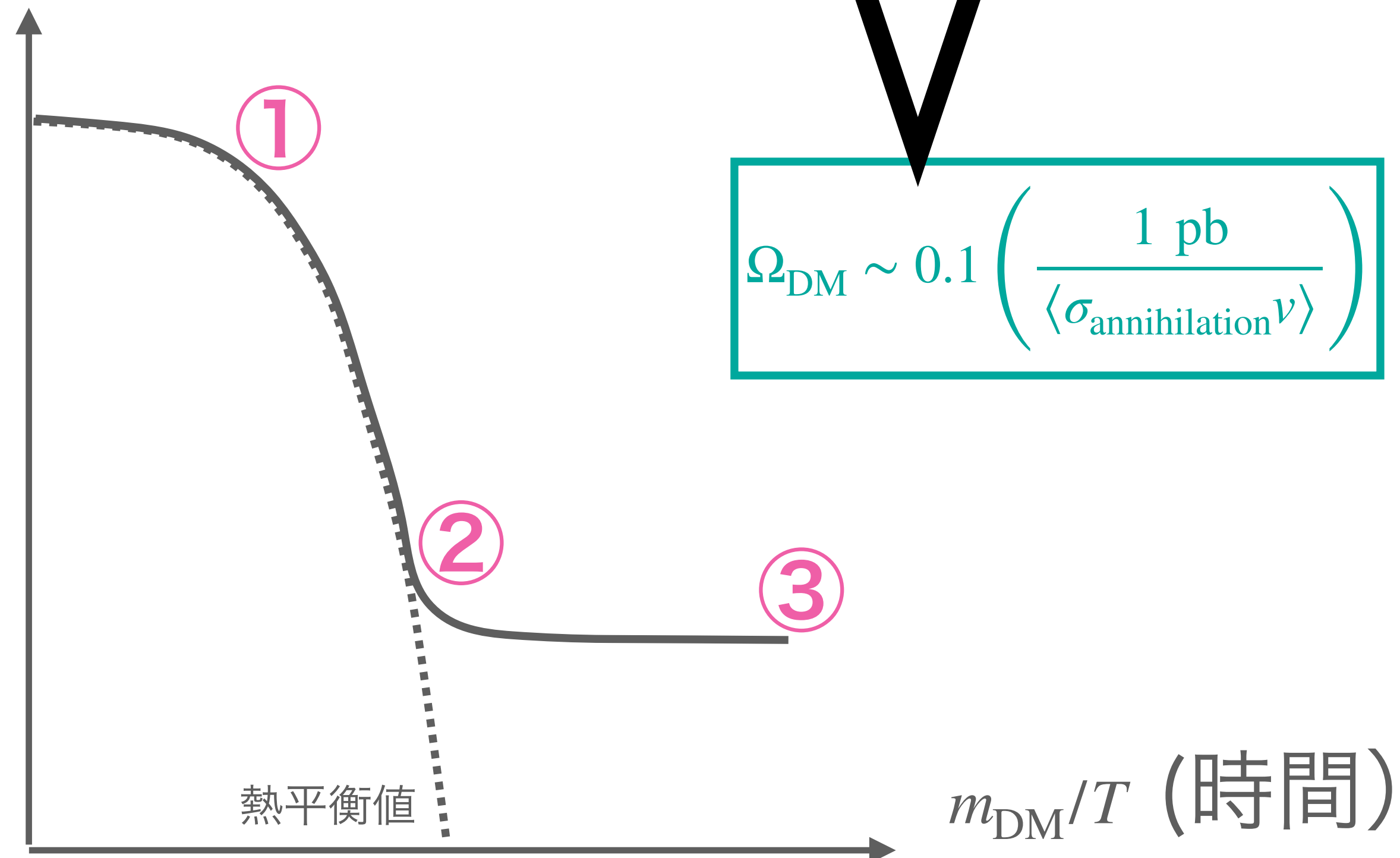
他の粒子たちと熱平衡

熱

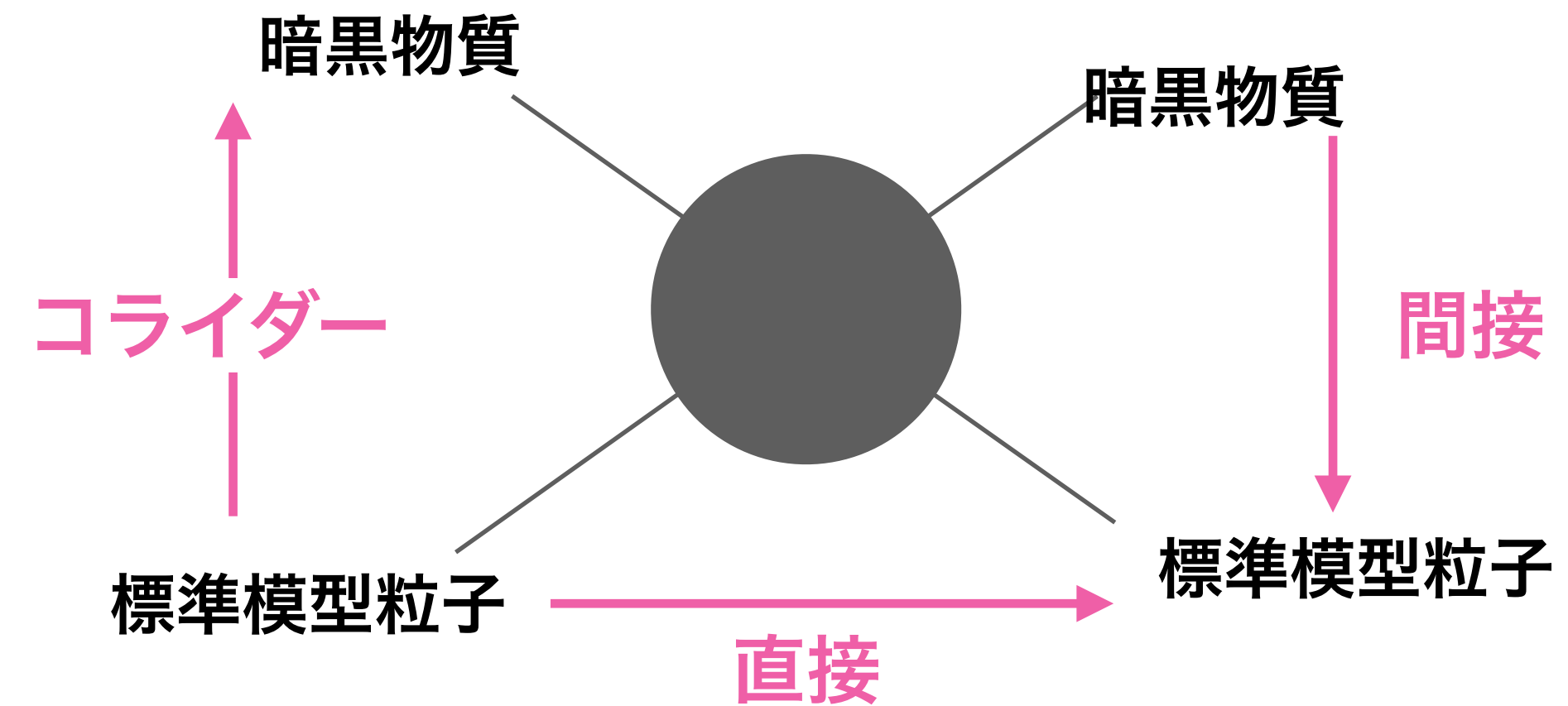
例4になるか? : WIMP DM !!!

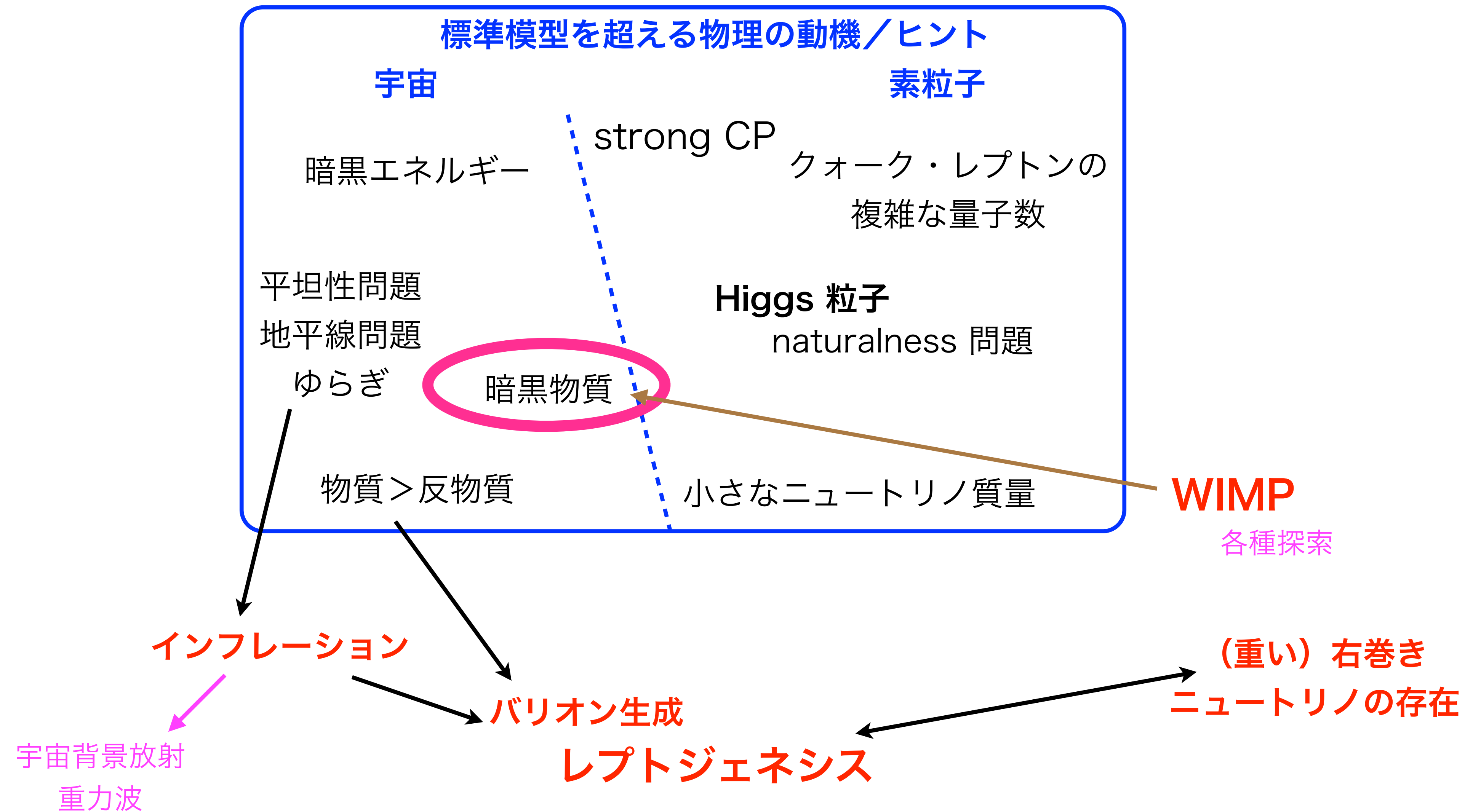
DMの数 (comoving)

第3週以降では
WIMP暗黒物質の
熱的残存量の計算も
解説します。



しかも検証可能!





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

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

WIMP

各種探索

インフレーション

宇宙背景放射
重力波

バリオン生成

レプトジェネシス

(重い) 右巻き

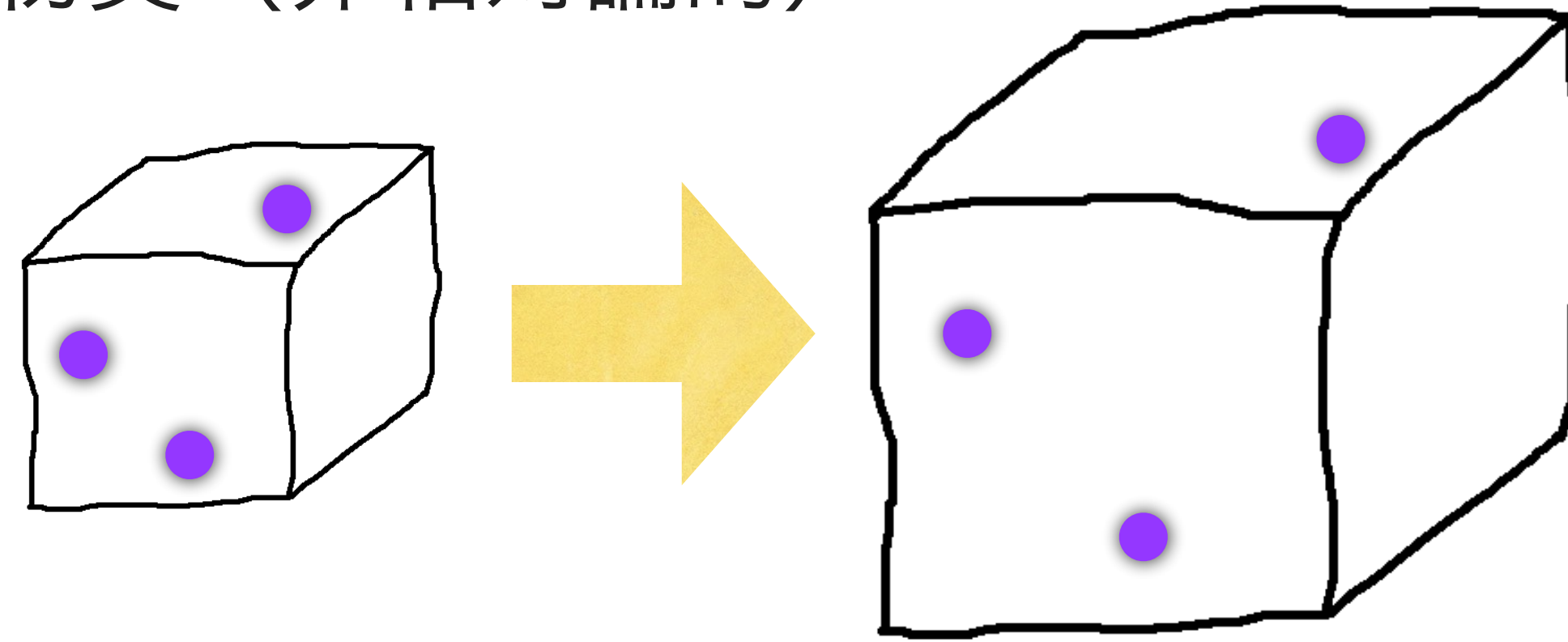
ニュートリノの存在

またちょっと休憩



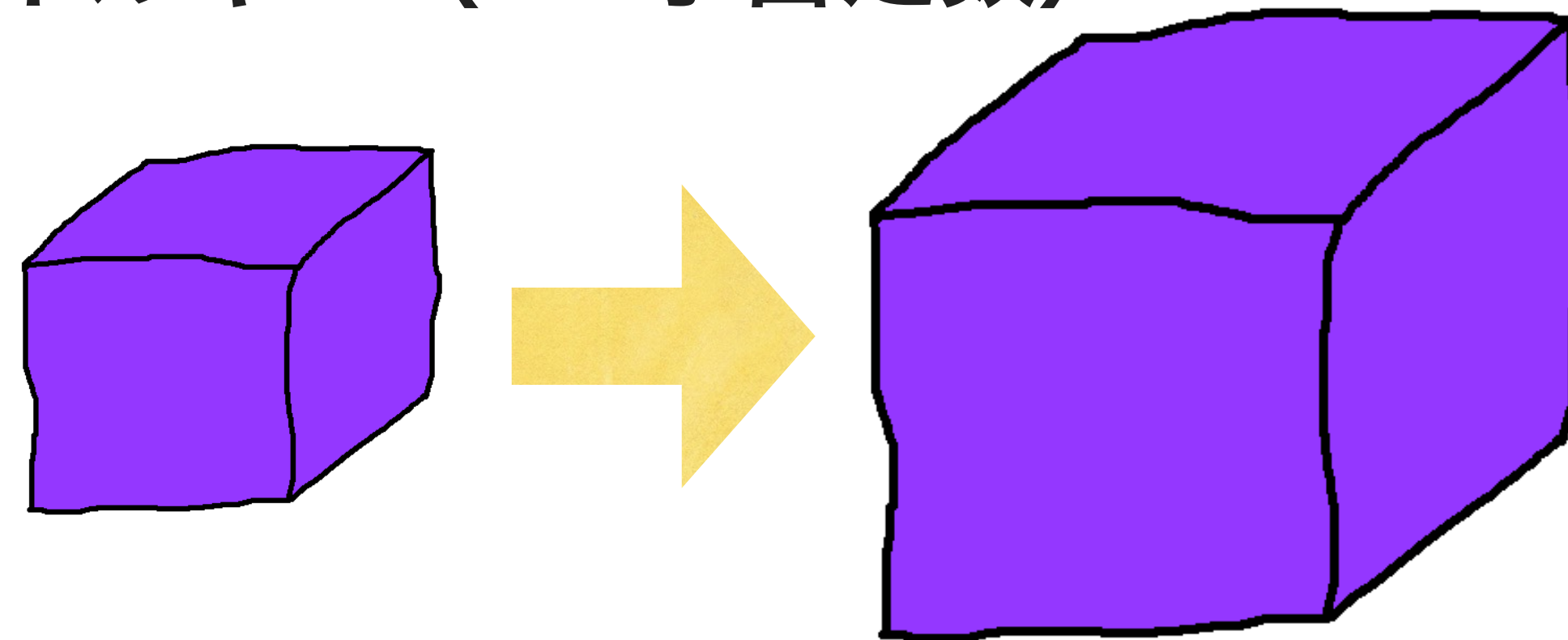
暗黒エネルギーの謎

普通の物質（非相対論的）



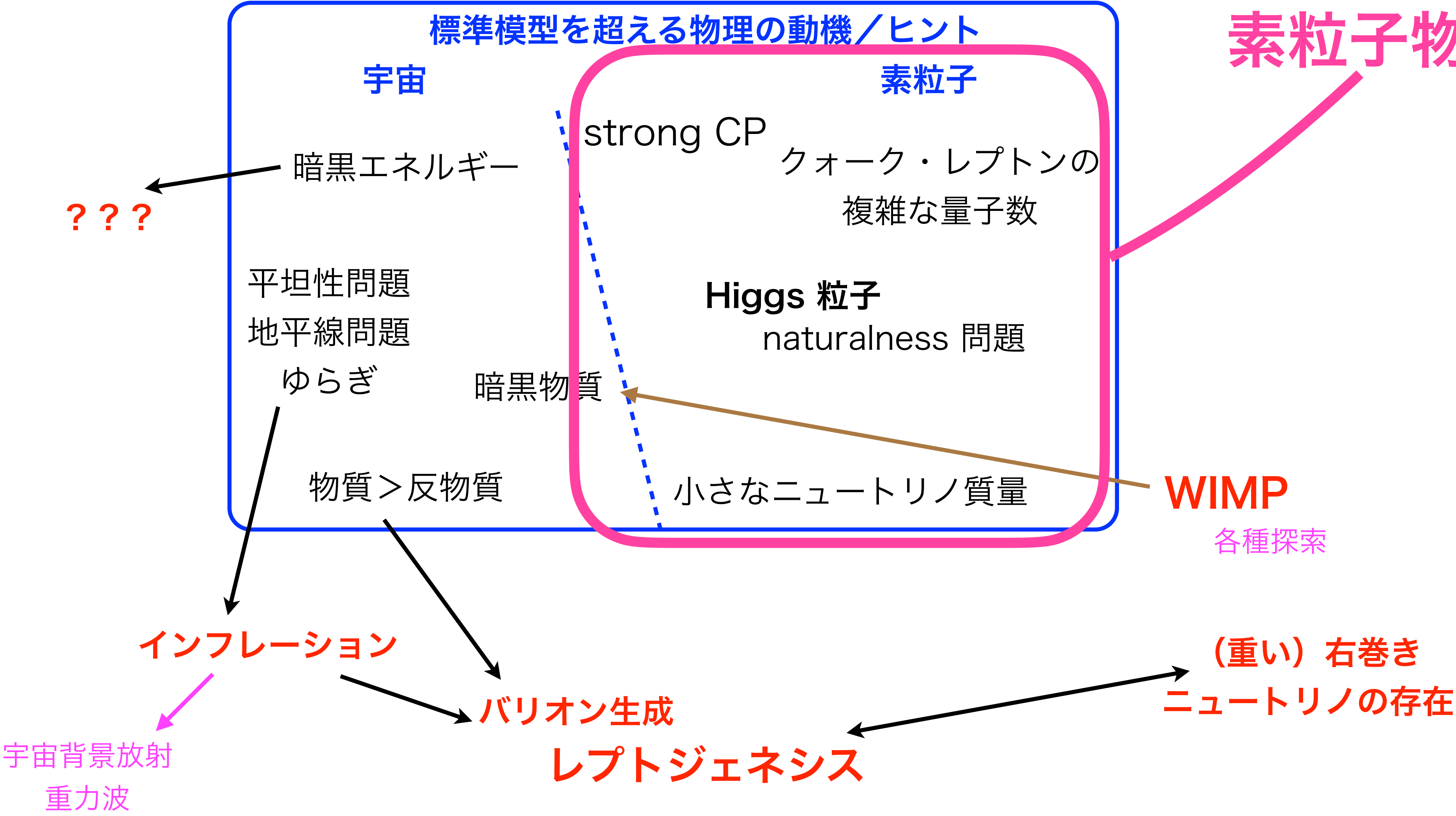
宇宙が膨張して体積が倍になったら密度は半分

暗黒エネルギー（ $\simeq$ 宇宙定数）



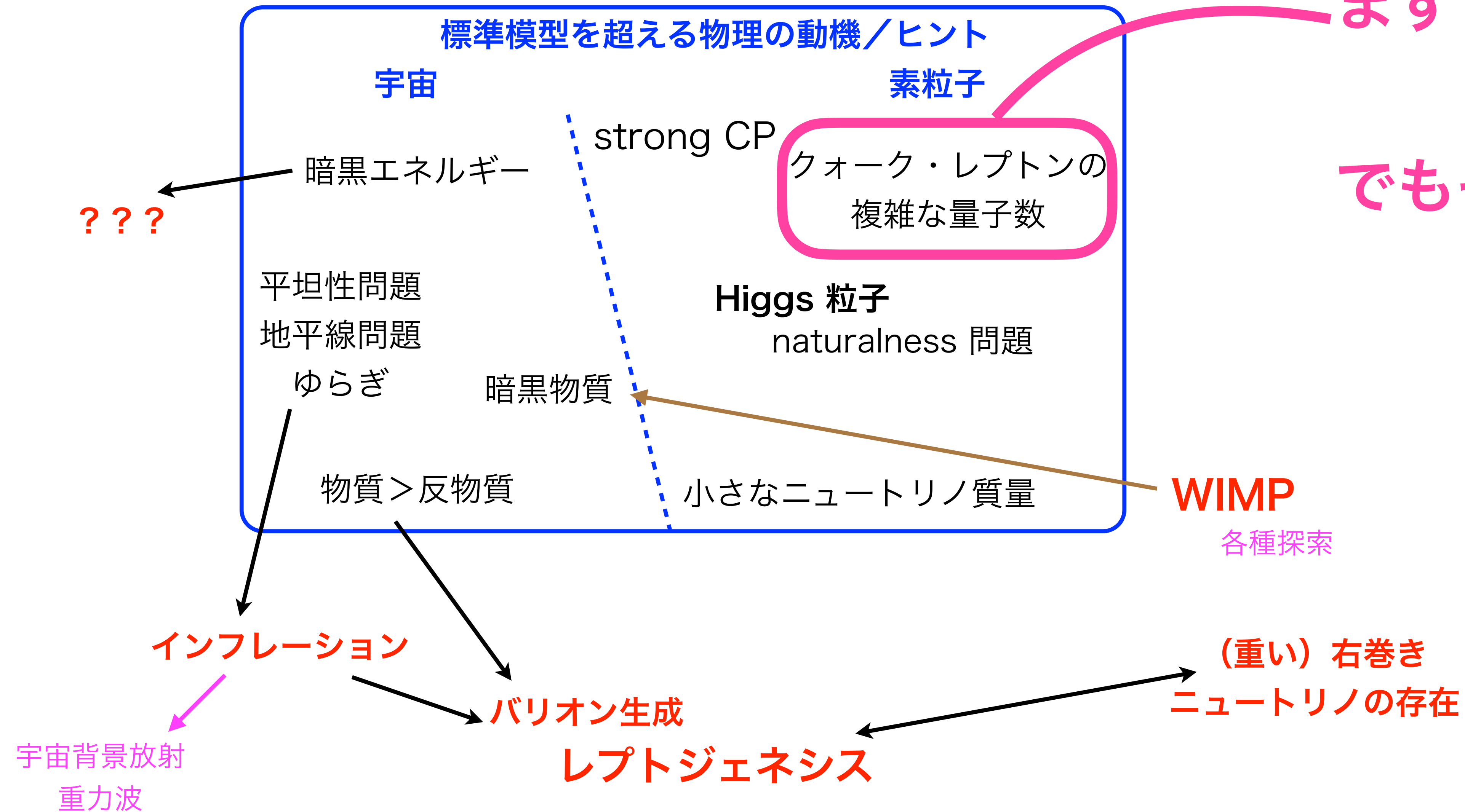
宇宙が膨張しても密度が一定

ここからは
素粒子物理の謎



まずここから

でもその前に…



標準模型

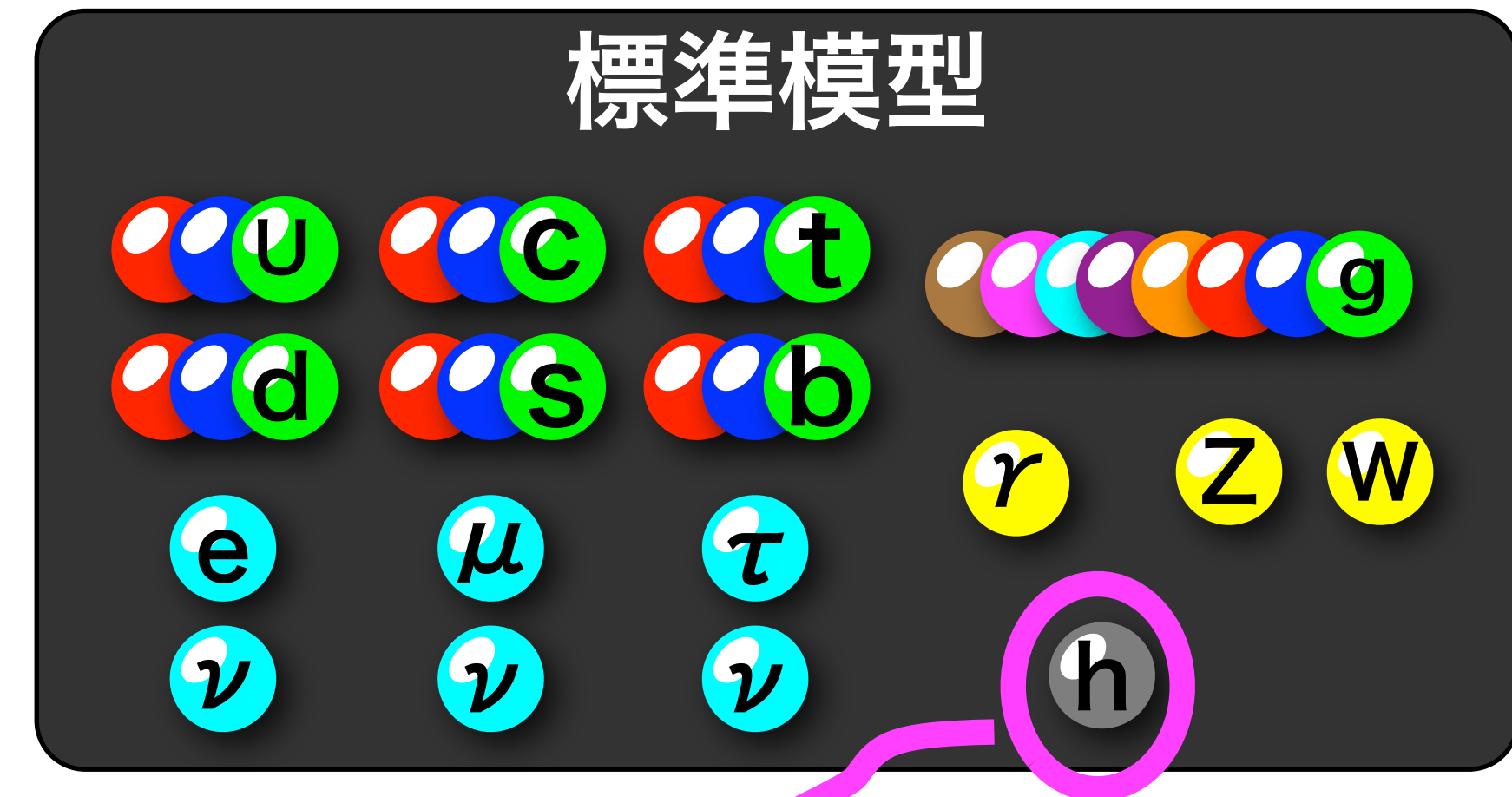


▶ ヒッグスについて

- 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

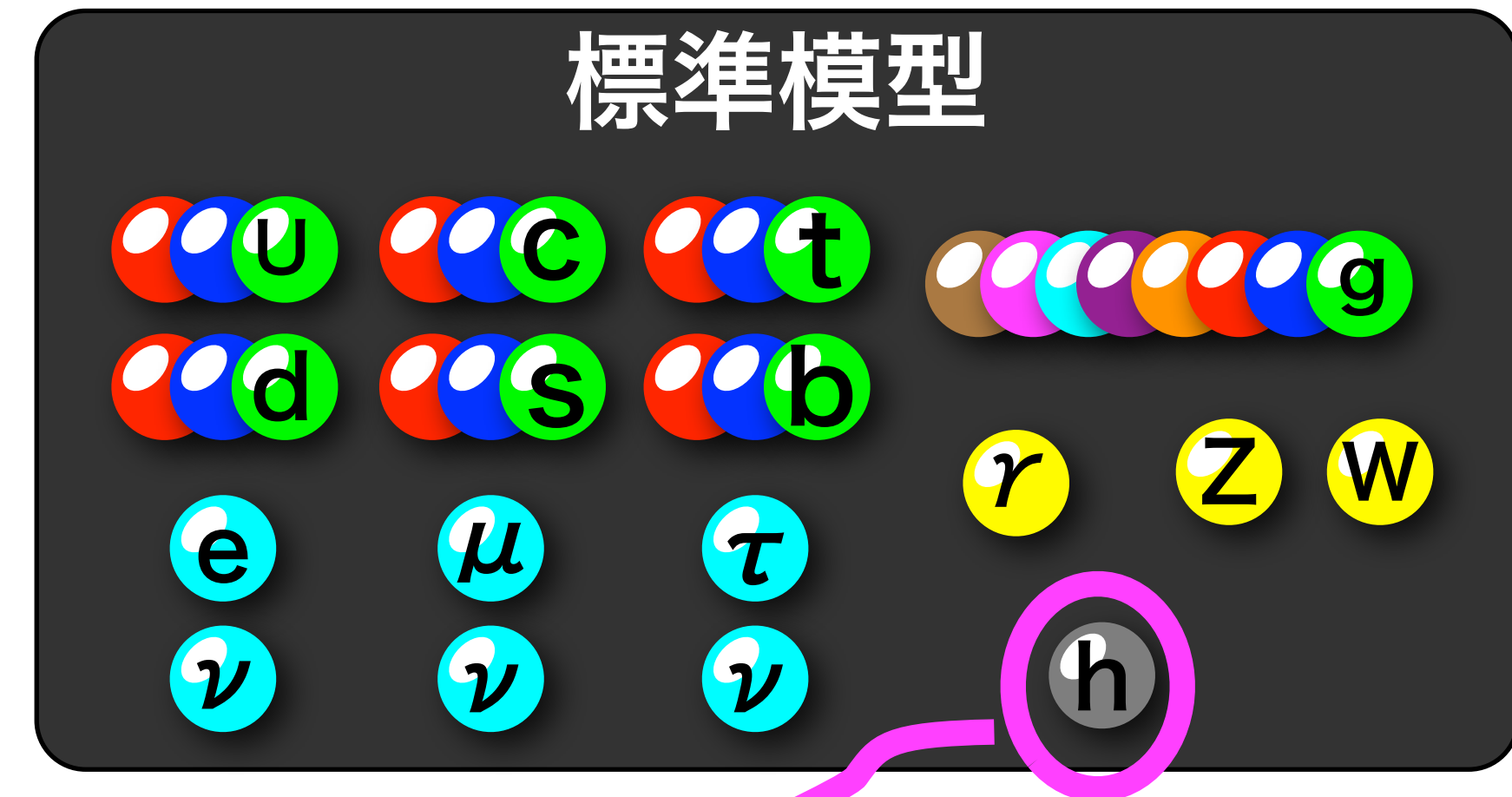
- 全ての素粒子の質量の起源

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・・・

(弱い相互作用しない)

右巻き電子 e_R

左巻き電子 e_L

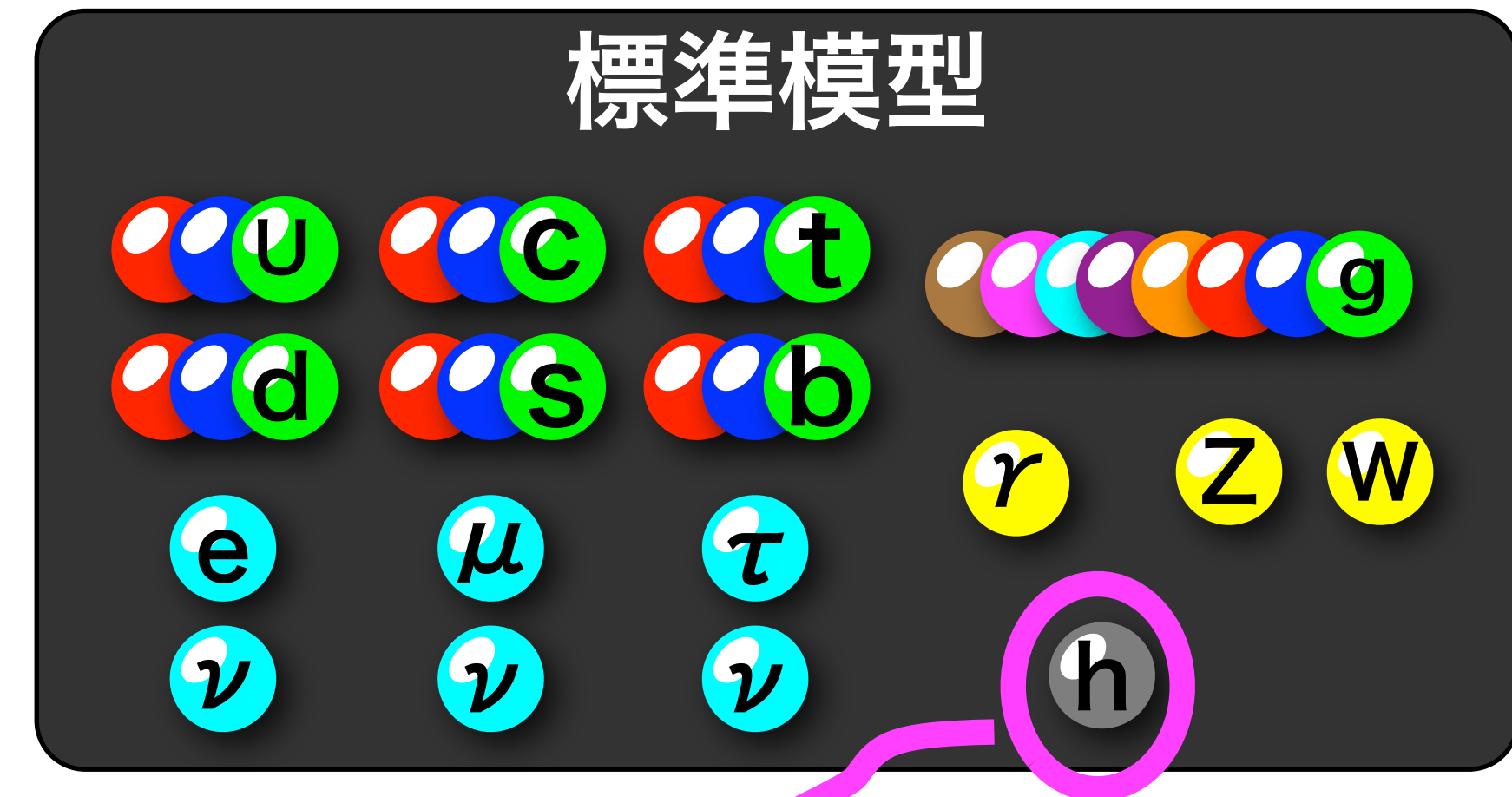
(弱い相互作用する)

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

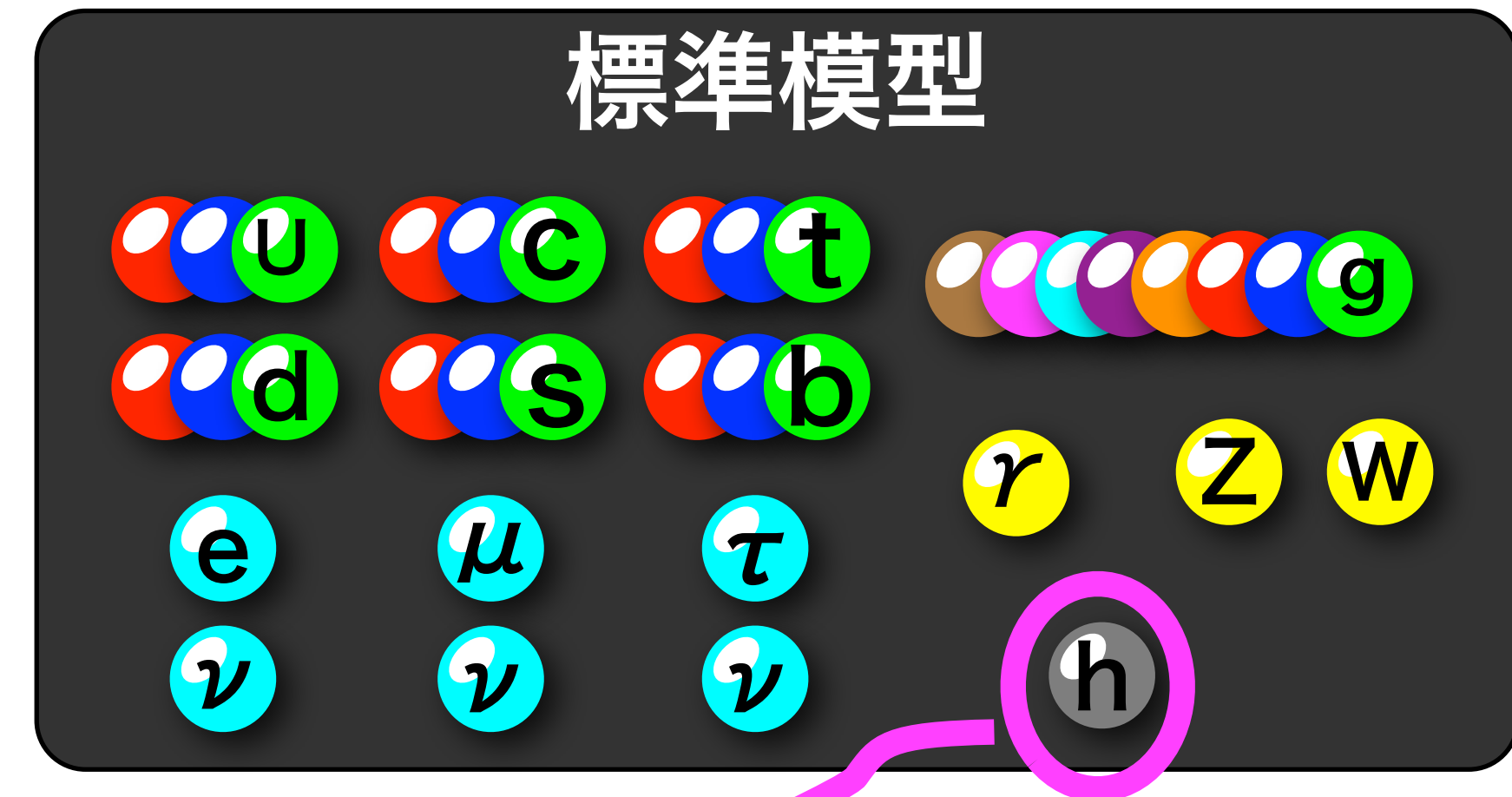
(弱い相互作用する)

右巻きと左巻きがつながる

----- ヒッグス

Yukawa 相互作用

標準模型

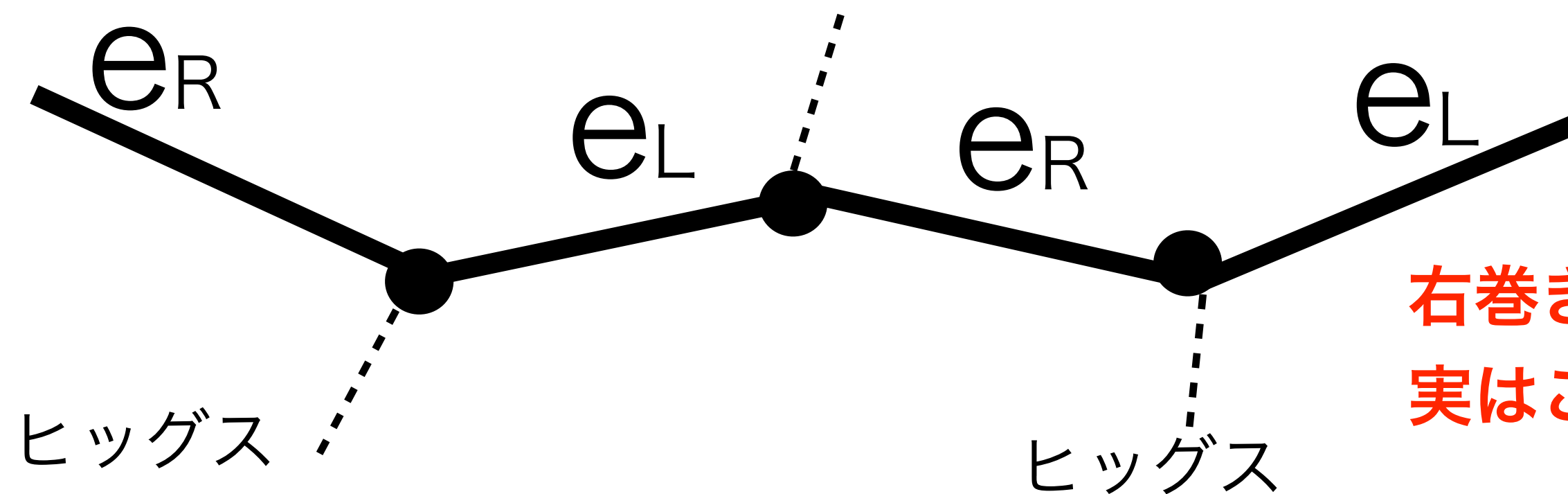


▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

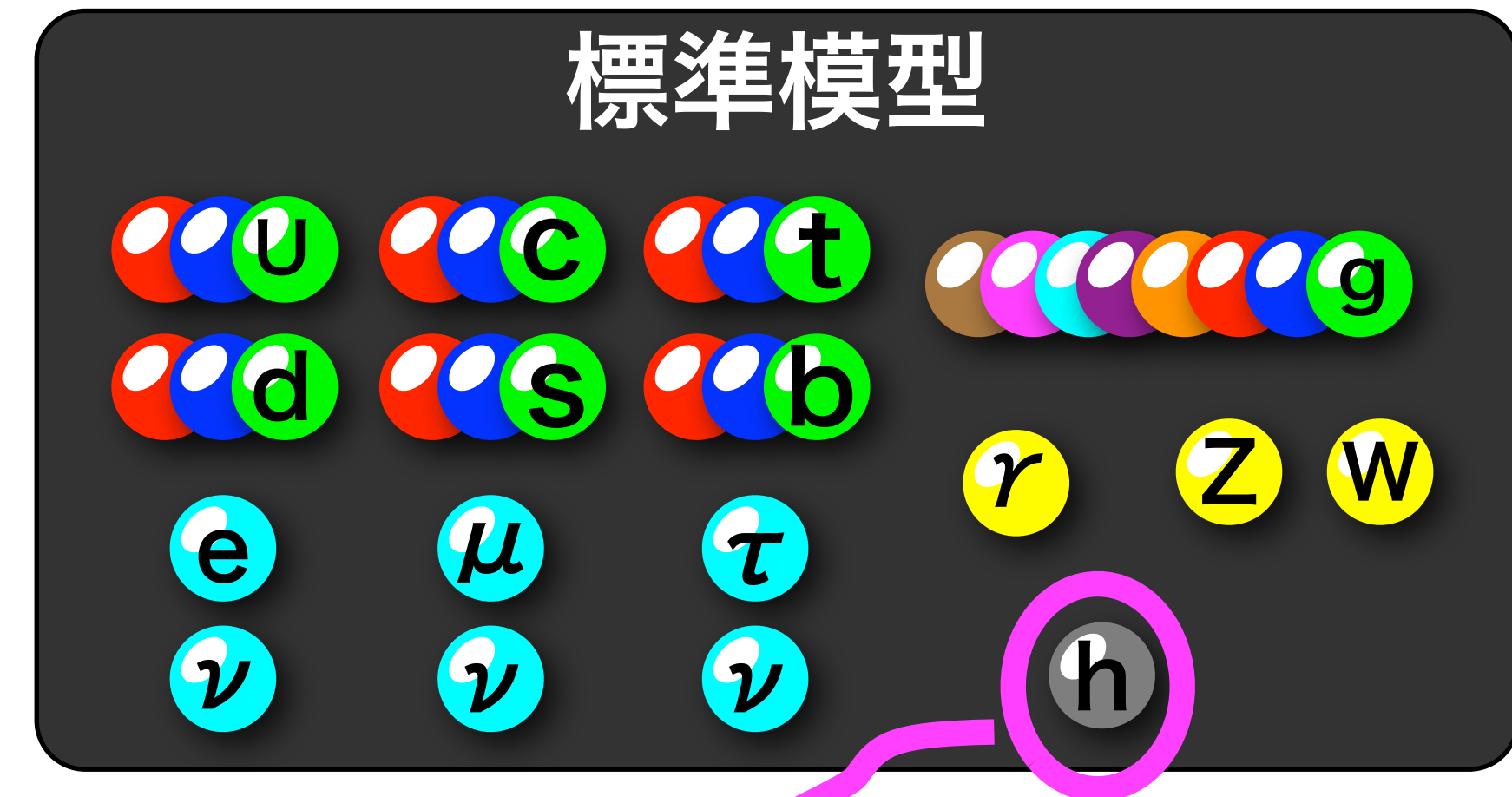
例えば電子：

「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



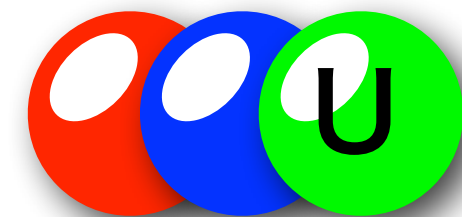
▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

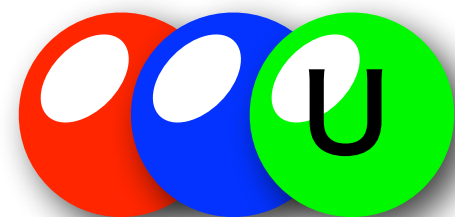
左巻き

右巻き

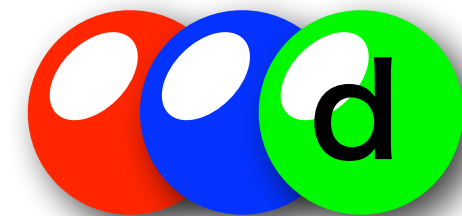
クォーク



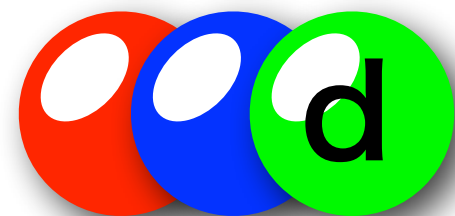
+



→ 質量をもつ

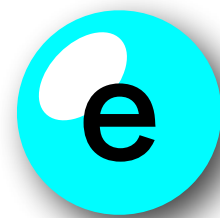


+



→ 質量をもつ

電子



+



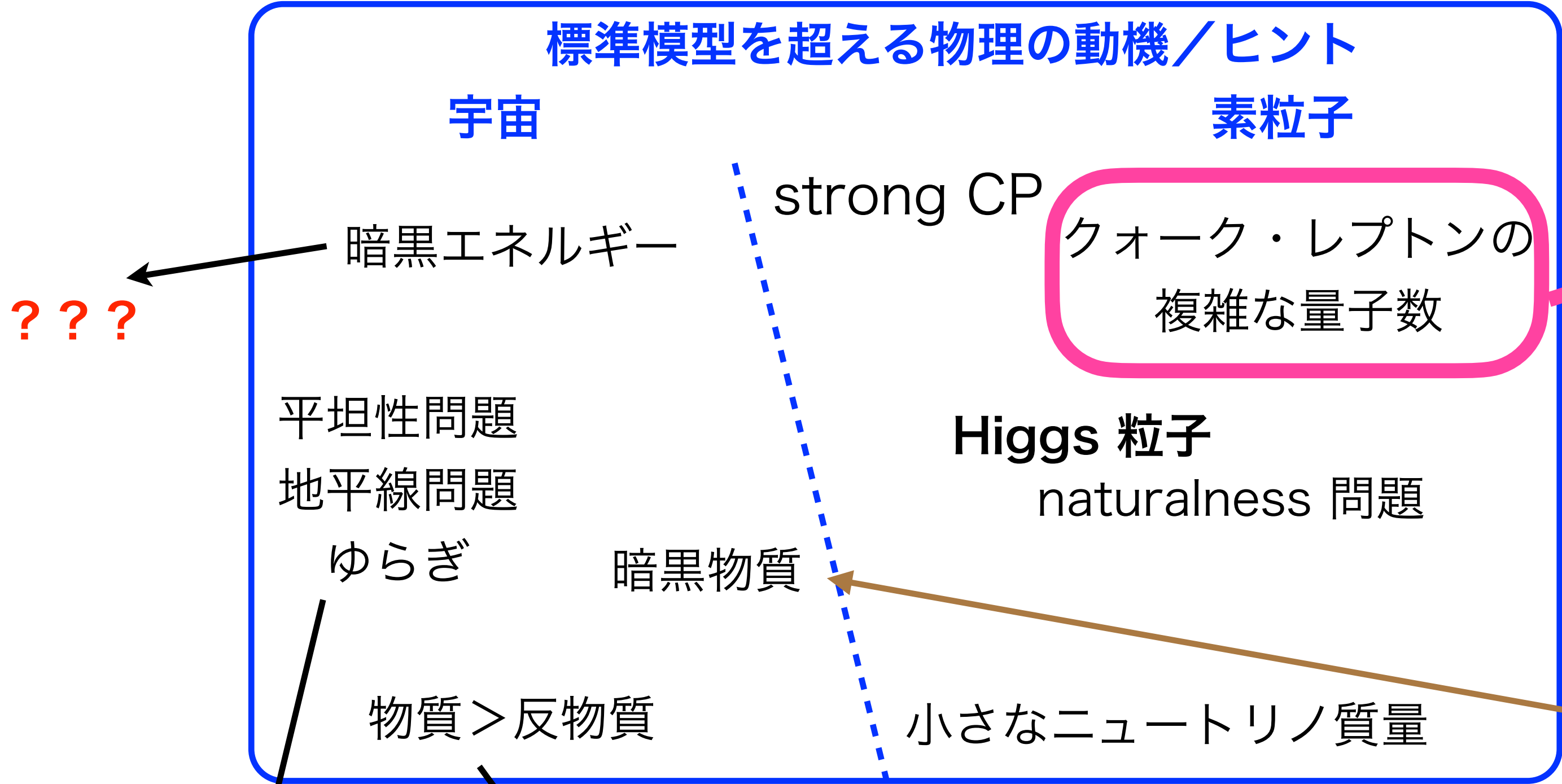
→ 質量をもつ

ニュートリノ



(+ N ?)

で、この話



???

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

strong CP

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

Higgs 粒子
naturalness 問題

暗黒物質

小さなニュートリノ質量

WIMP

各種探索

インフレーション

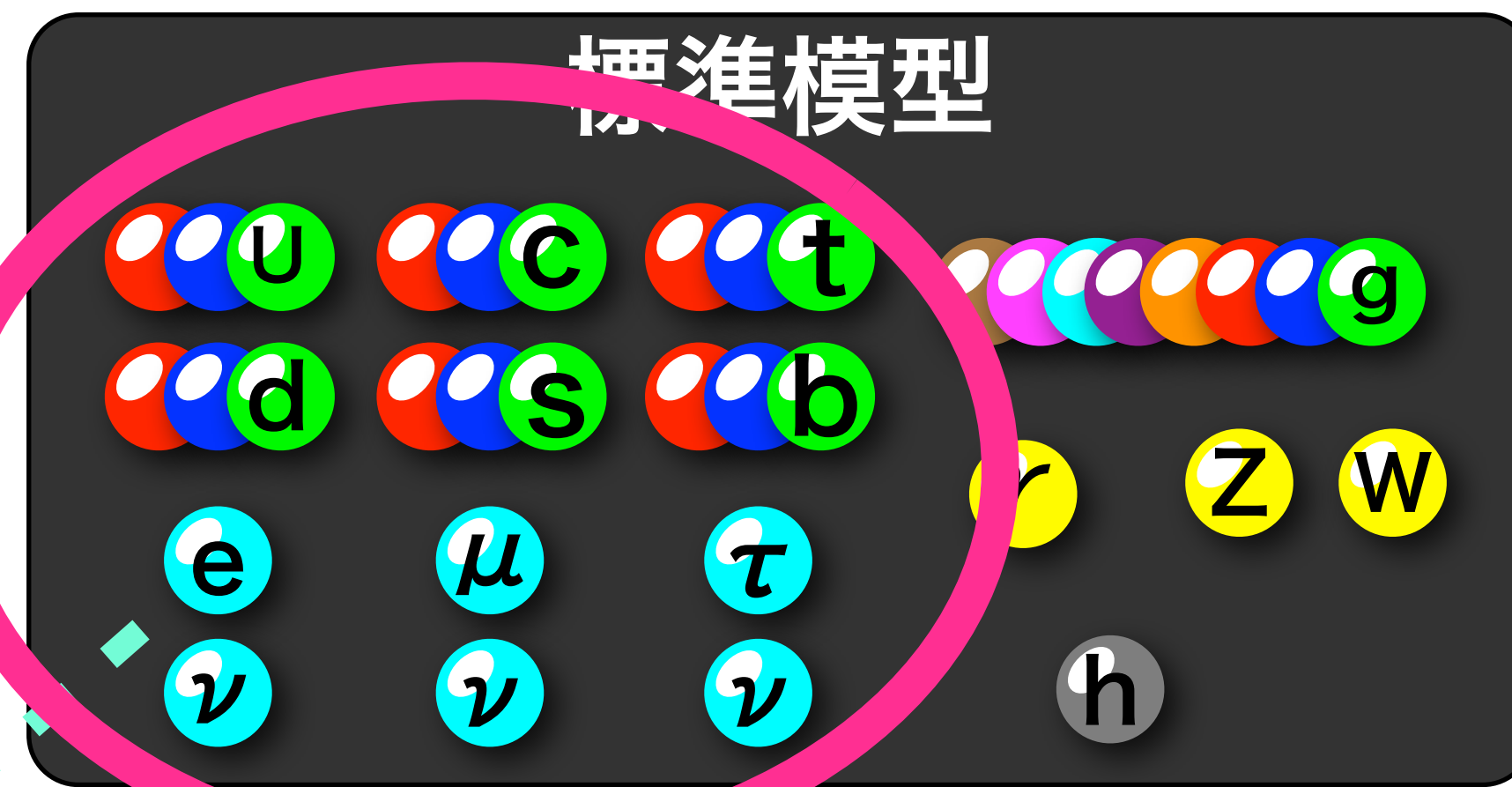
宇宙背景放射
重力波

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

こいつらの話

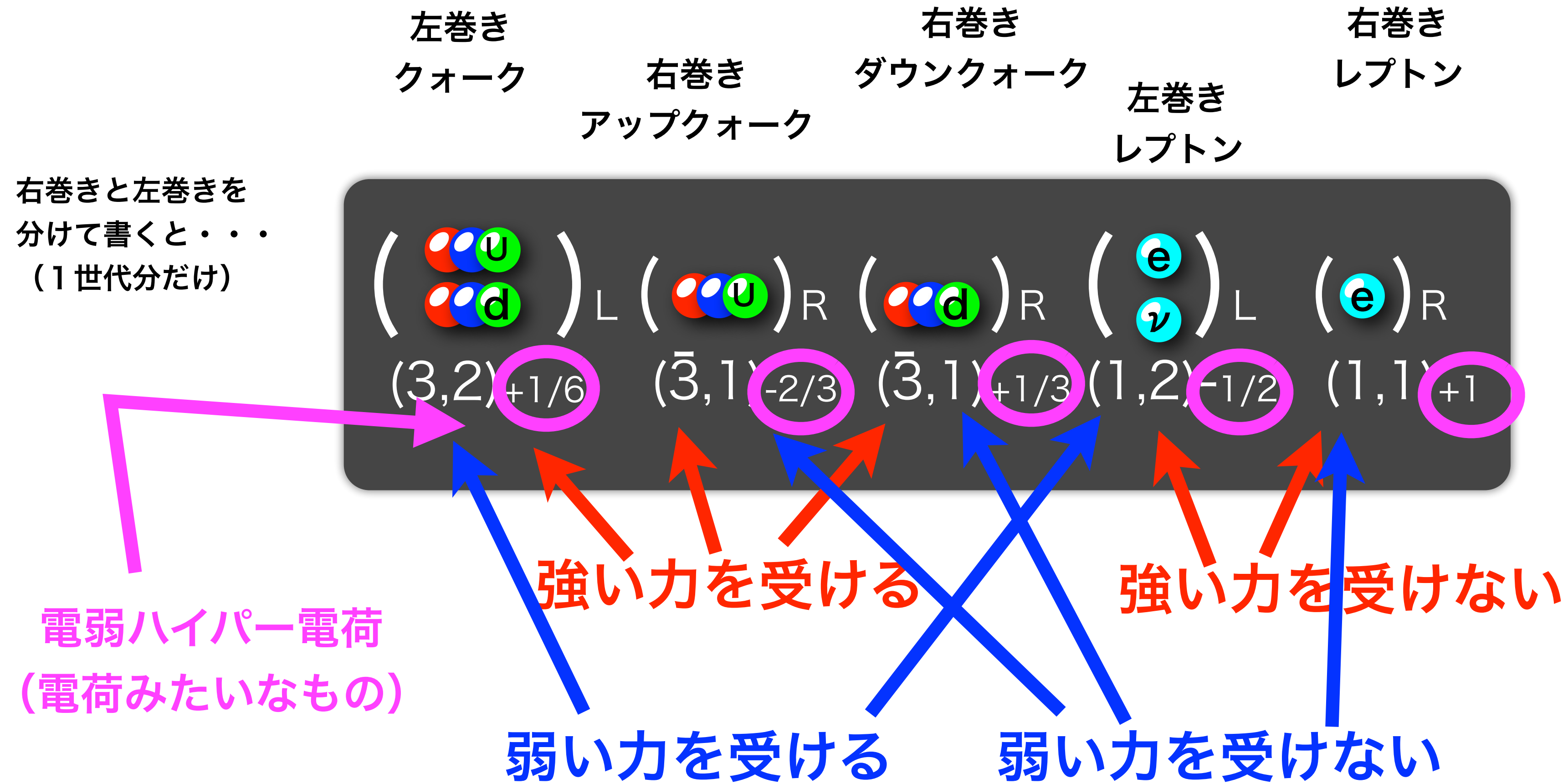


電子の話を思い出すと・・・

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。)



・・・なんかバラバラ！

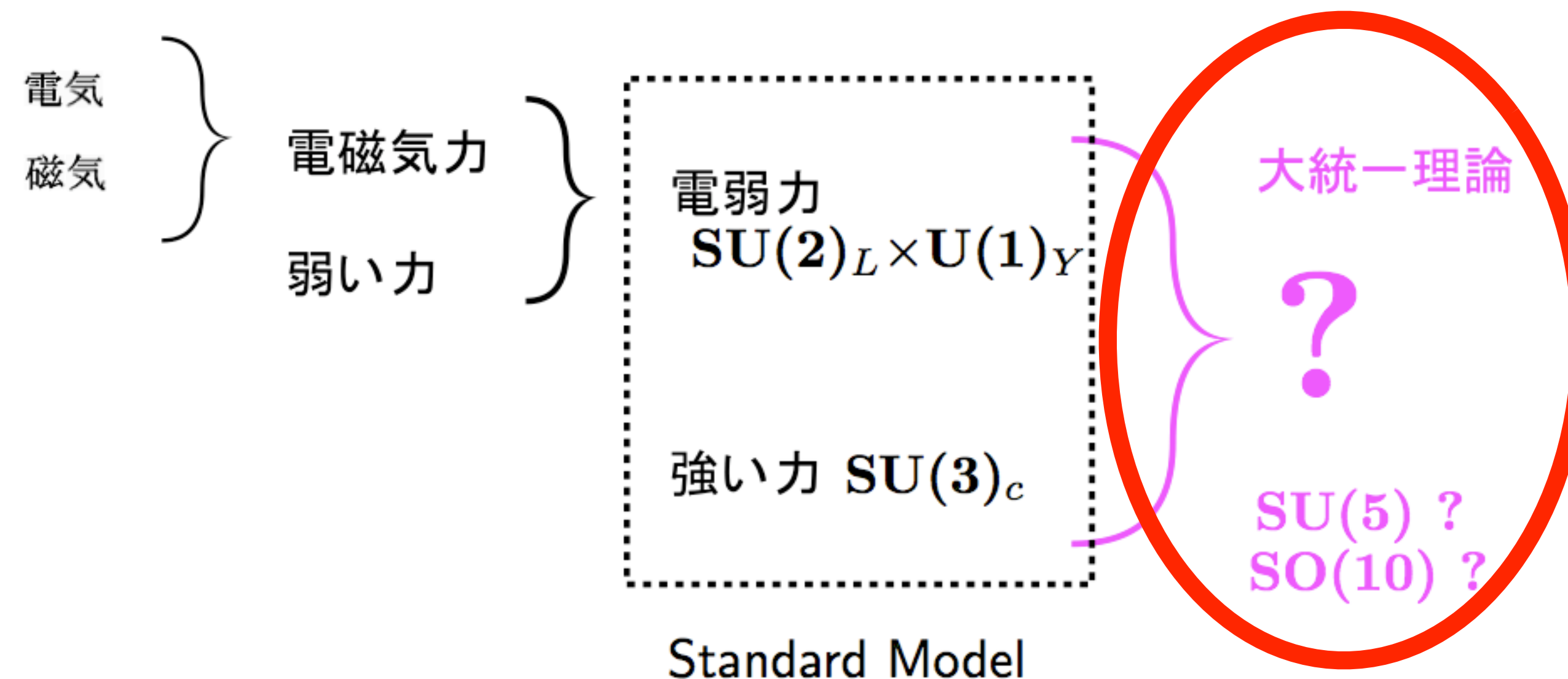
謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

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

$$\begin{pmatrix} \text{u} \\ \text{d} \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{u} \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \text{d} \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \text{e} \\ \nu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{e} \end{pmatrix}_R$$

$(3, 2)_{+1/6} \quad (\bar{3}, 1)_{-2/3} \quad (\bar{3}, 1)_{+1/3} \quad (1, 2)_{-1/2} \quad (1, 1)_{+1}$

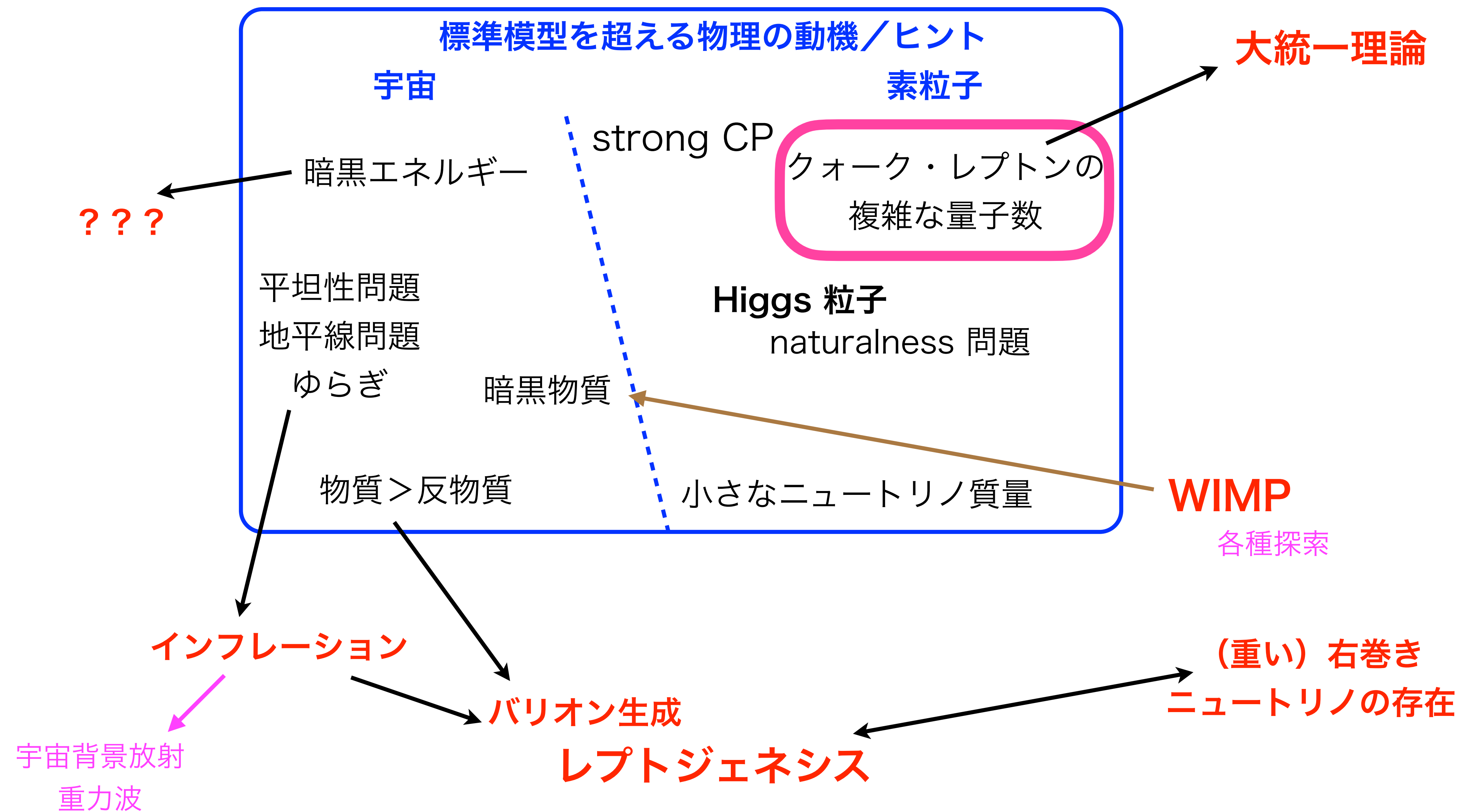
$$1/3 + 1/3 + 1/3 - 1/2 - 1/2 = 0$$

大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)

$$\begin{pmatrix} \text{u} \\ \text{d} \end{pmatrix}_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \begin{pmatrix} \text{e} \\ \nu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{d} \end{pmatrix}_R$$

10 5

[Georgi, Glashow 1974]

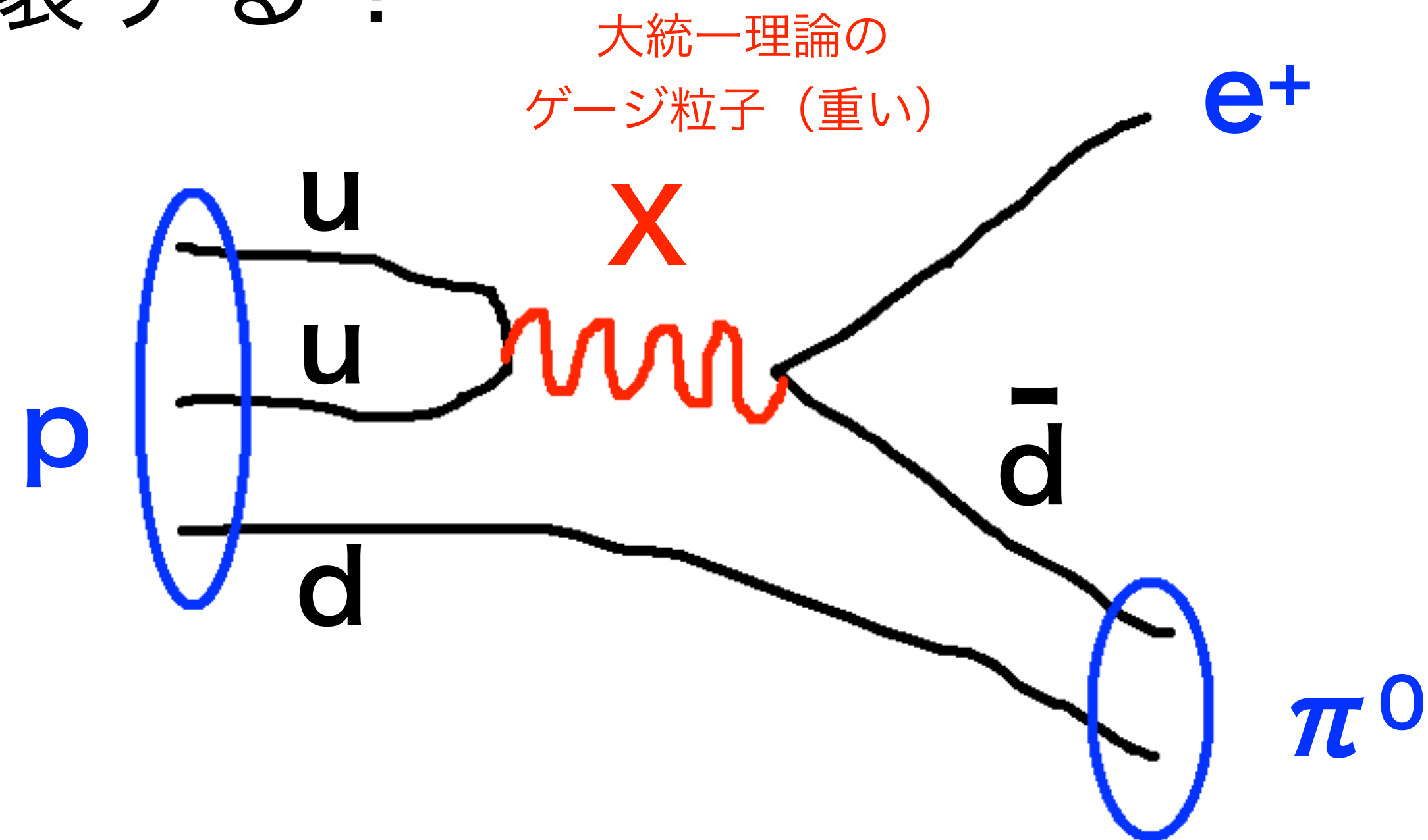


「大統一理論」の予言は？

「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！



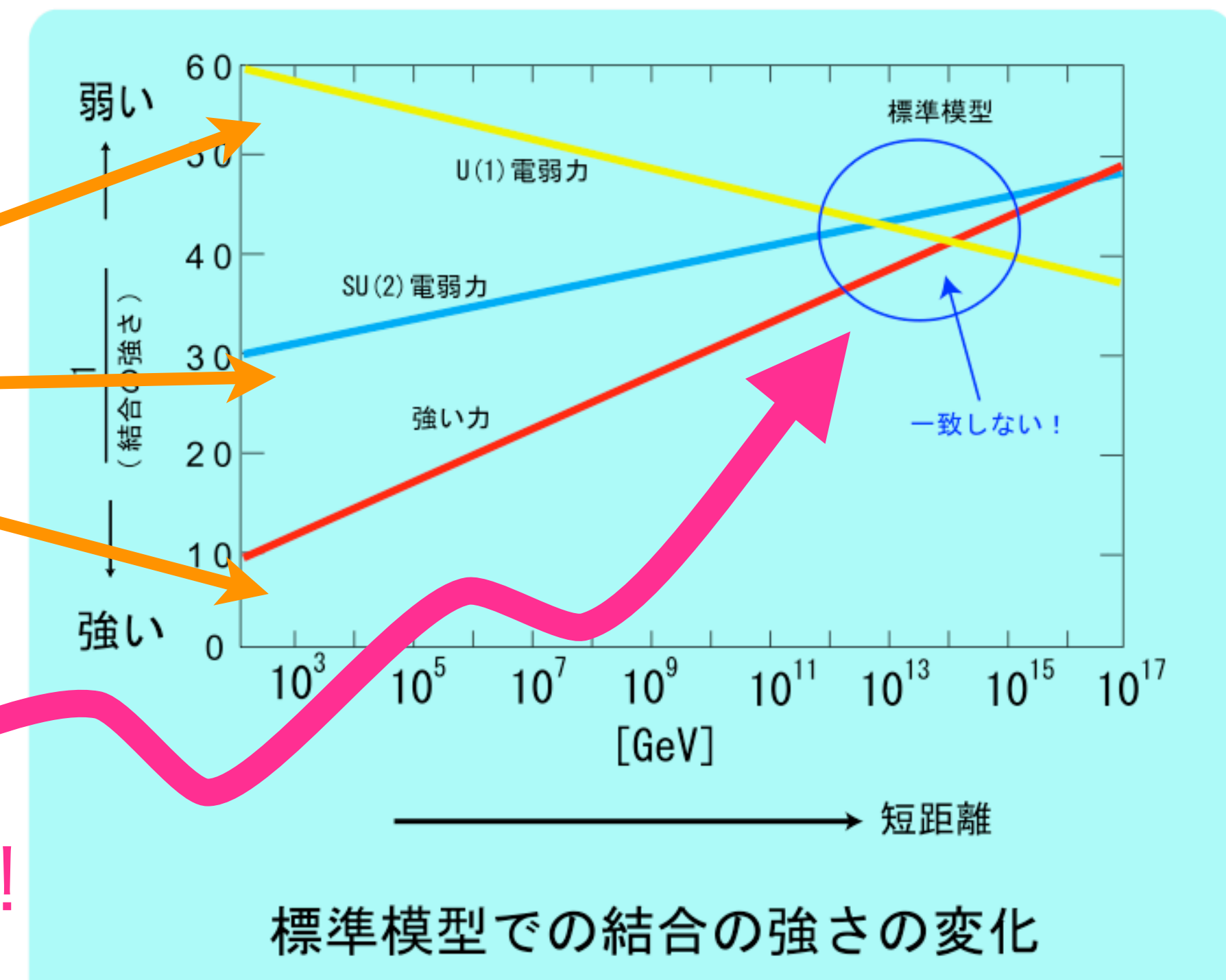
でも寿命の予言は大統一理論の模型によって大きく異なります。

「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・・・

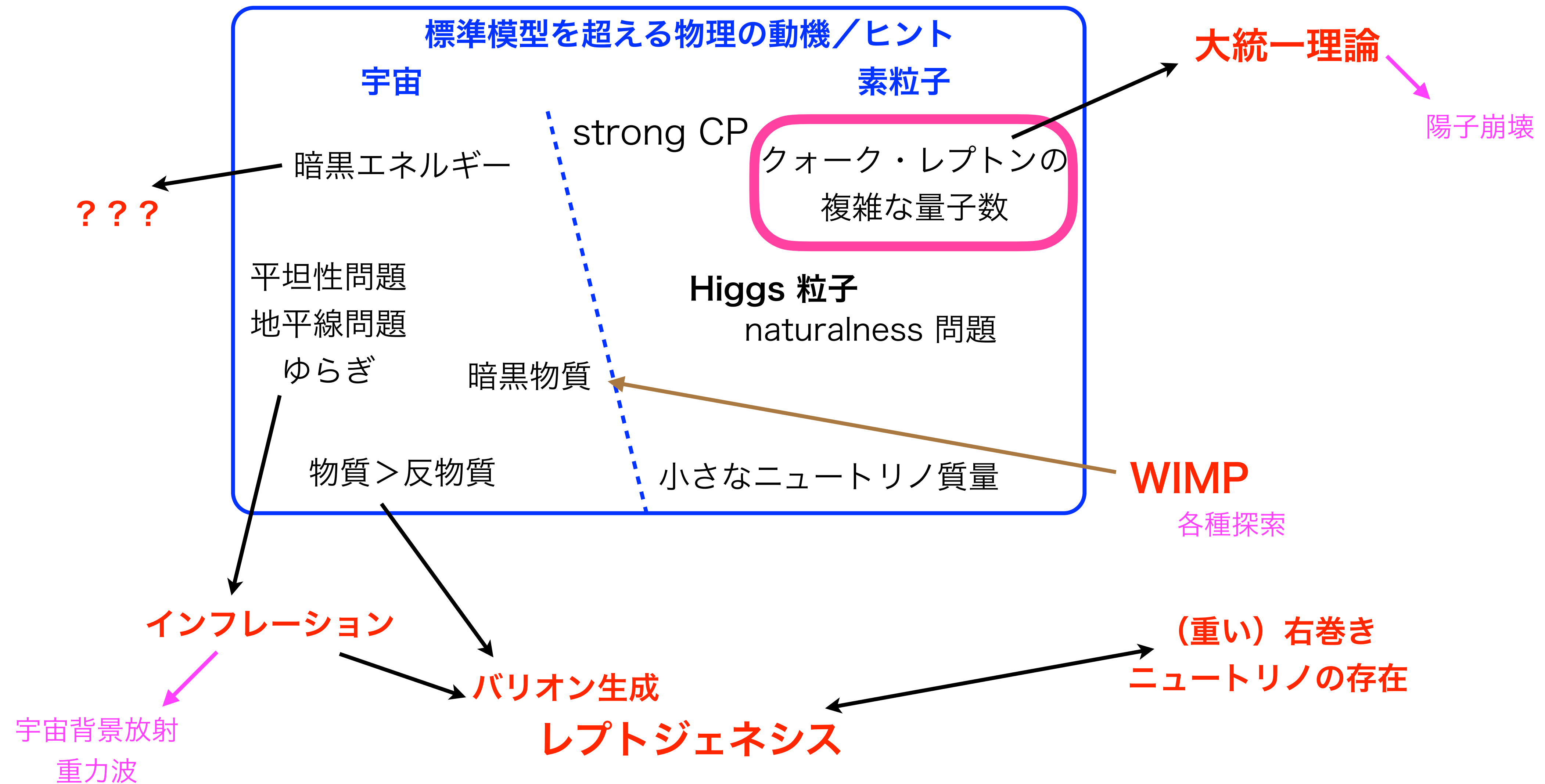
非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致する。

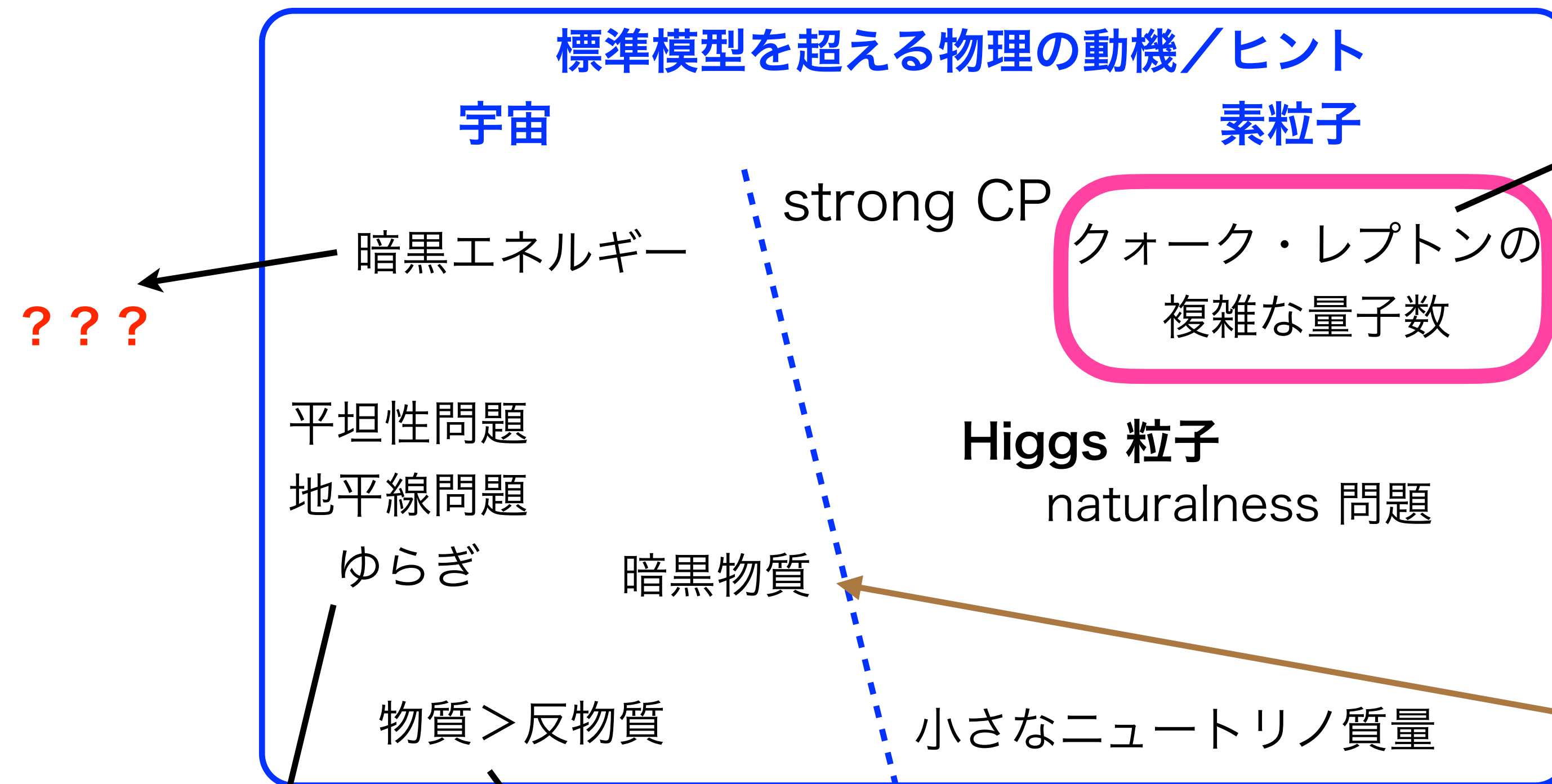
3つの力



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。





大統一理論

陽子崩壊

ちょっと休憩
(休憩多すぎ?)

WIMP

各種探索

インフレーション

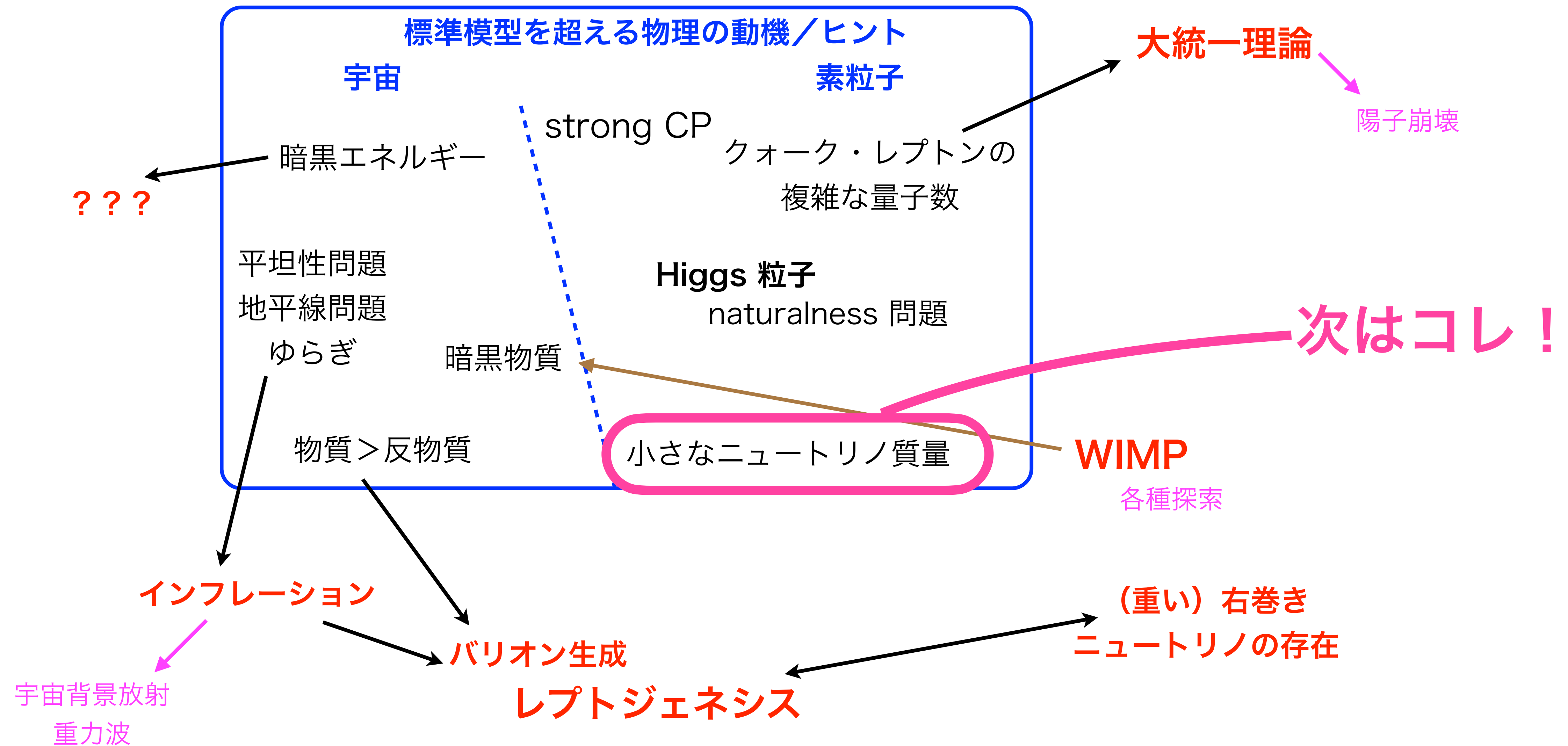
宇宙背景放射
重力波

バリオン生成

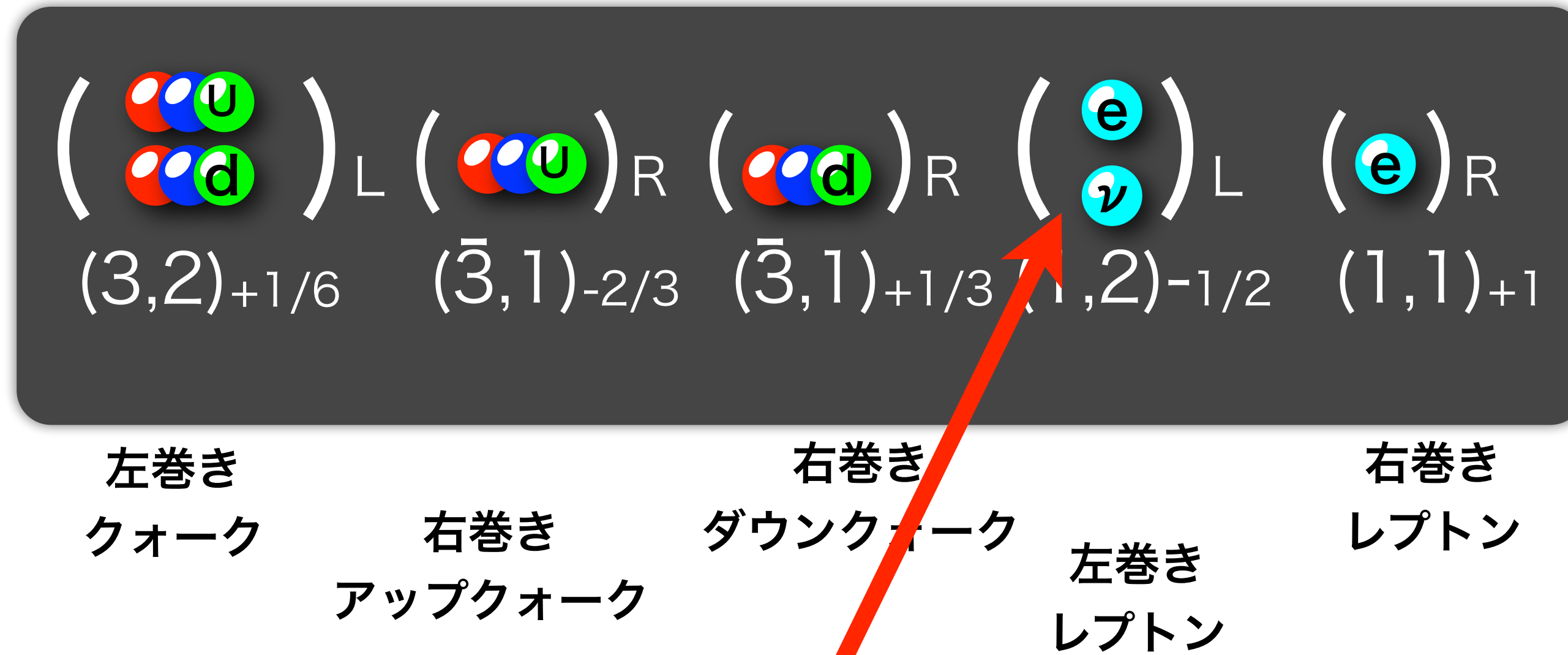
レプトジェネシス

(重い) 右巻き
ニュートリノの存在



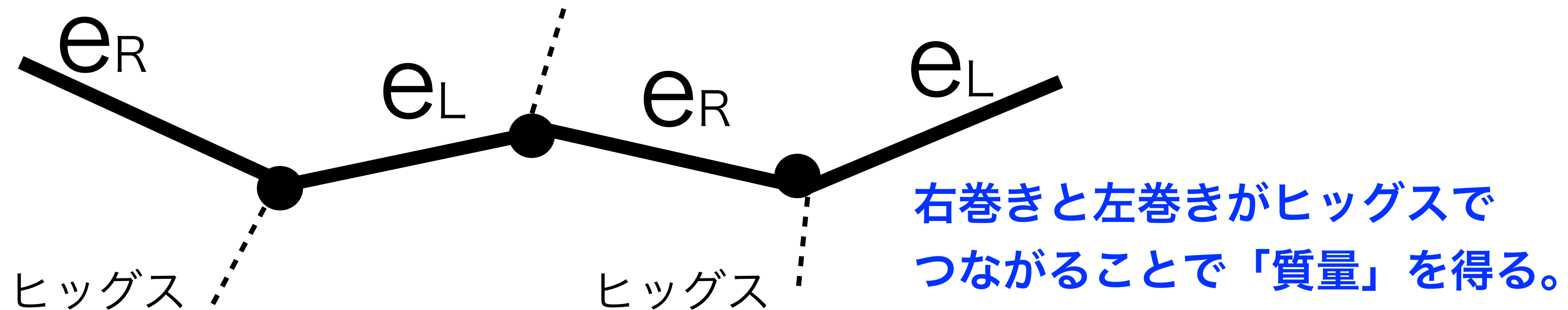


謎：ニュートリノの質量

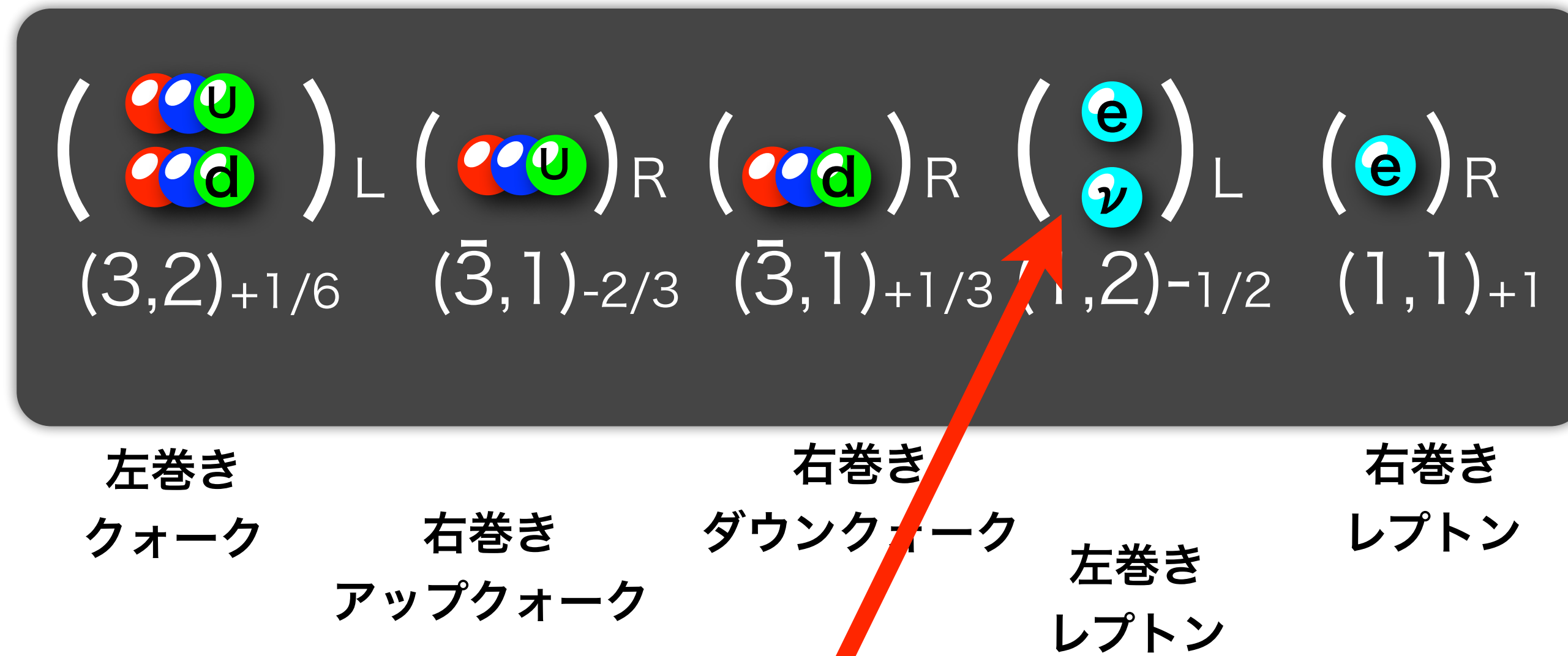


よく見るとニュートリノは左巻きしかない

再びヒッグスのところの電子の話を思い出すと・・・



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！



III: N. Elmehe. © Nobel Media 2015

2015 Nobel Prize
in Physics

謎：ニュートリノの質量

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

左巻き クォーク
 右巻き アップクォーク
 右巻き ダウunkォーク
 左巻き レプトン
 右巻き レプトン

+ N $(1, 1)_0$ 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（一人三役）

右巻きニュートリノ、実はすごい（一人三役）

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$\left(\begin{array}{ccc} \text{u} & & \\ \text{d} & & \end{array} \right)_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \left(\begin{array}{c} \text{e} \\ \nu \end{array} \right)_L \quad \text{d}_R \quad \text{SU}(5) \text{ 大統一} \quad + \quad \begin{array}{c} \text{N} \\ (1,1)_0 \end{array}$$

10 5

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \text{u} & & & \text{e} & & \\ \text{d} & & & \nu & & \end{array} \right)_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \text{d}_R \quad \text{N}_1 \text{R} \quad \text{SO}(10) \text{ 大統一}$$

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（一人三役）

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$= \left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \begin{array}{c} \text{e} \\ \nu \end{array} \text{L} \quad \text{d}_R \quad \text{N}_1 \text{R} \right) =$$

16

(↑ ↓ ↓ ↓ ↑)

(↑ ↓ ↓ ↑ ↓)

(↑ ↓ ↑ ↓ ↓)

(↓ ↑ ↓ ↓ ↑)

(↓ ↑ ↓ ↑ ↓)

(↓ ↑ ↑ ↓ ↓)

(↑ ↑ ↑ ↑ ↓)

(↑ ↑ ↑ ↓ ↑)

(↑ ↑ ↓ ↑ ↑)

(↓ ↓ ↑ ↑ ↓)

(↓ ↓ ↑ ↓ ↑)

(↓ ↓ ↓ ↑ ↑)

(↑ ↓ ↑ ↑ ↑)

(↓ ↑ ↑ ↑ ↑)

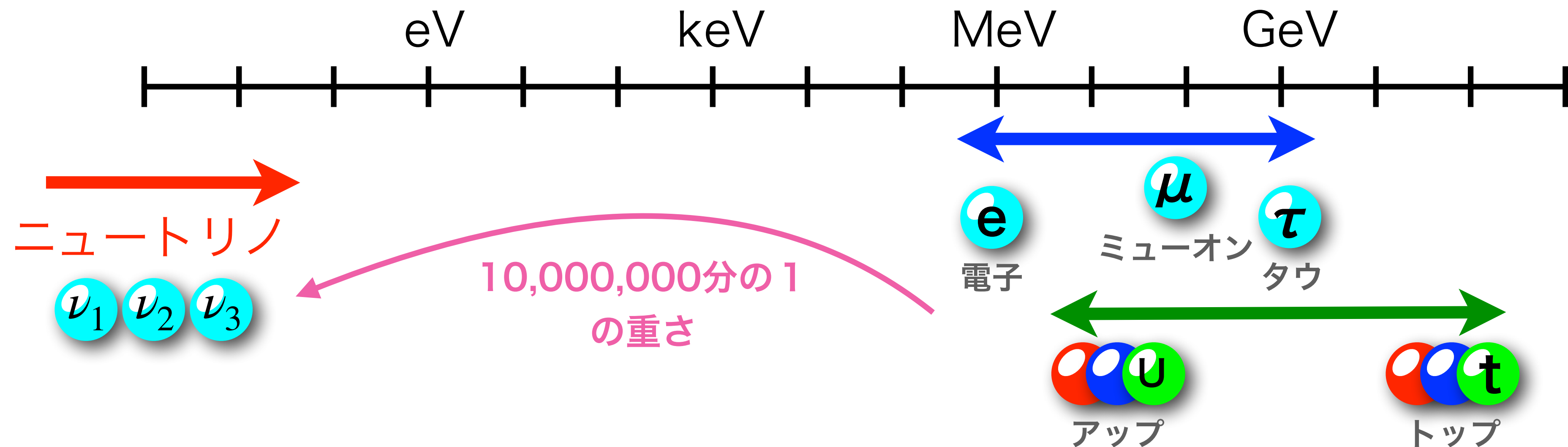
(↑ ↑ ↓ ↓ ↓)

(↓ ↓ ↓ ↓ ↓)

右巻きニュートリノ、実はすごい（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明

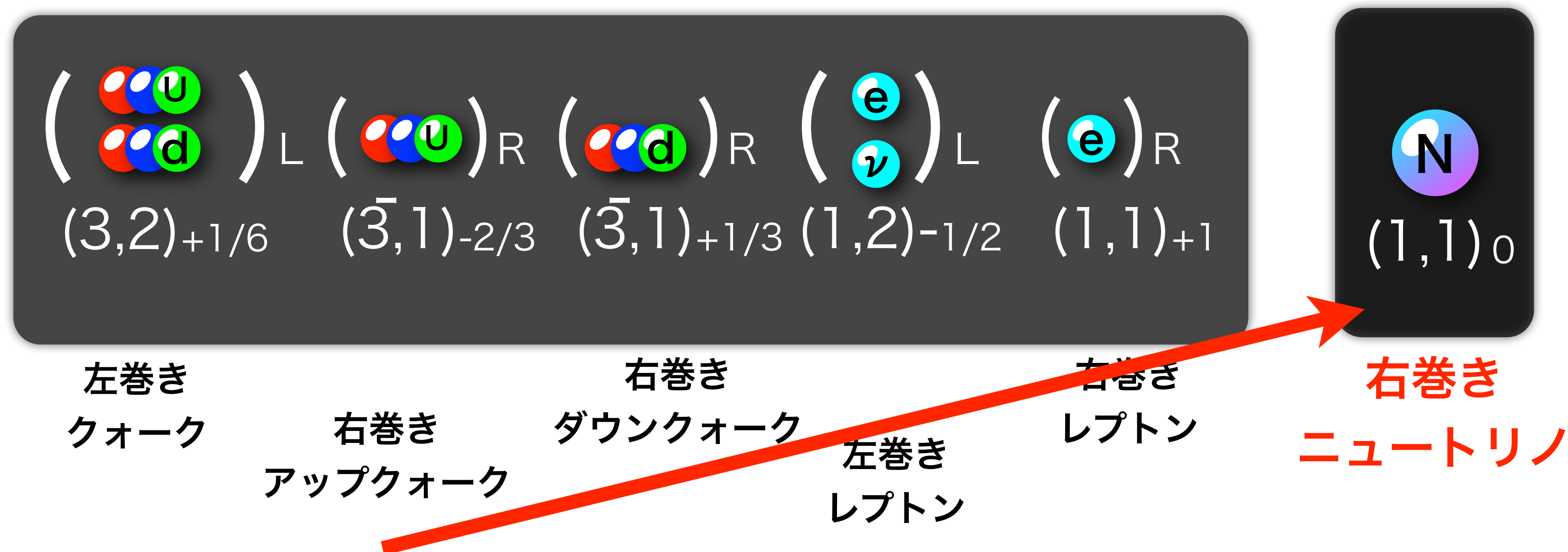
クォーク、レプトンの質量



・・・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（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明

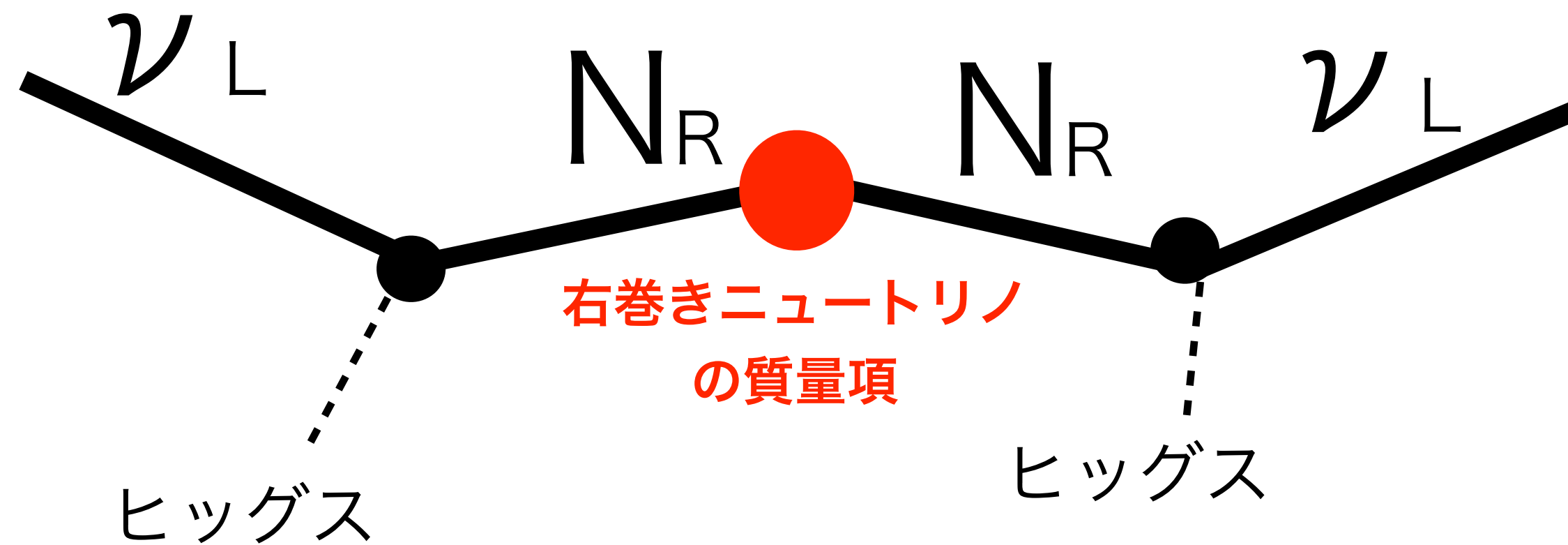


実はこいつだけ特別！ 電磁気・弱い力・強い力どれとも反応しない。

- 電荷を全く持っていない。
- 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（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明



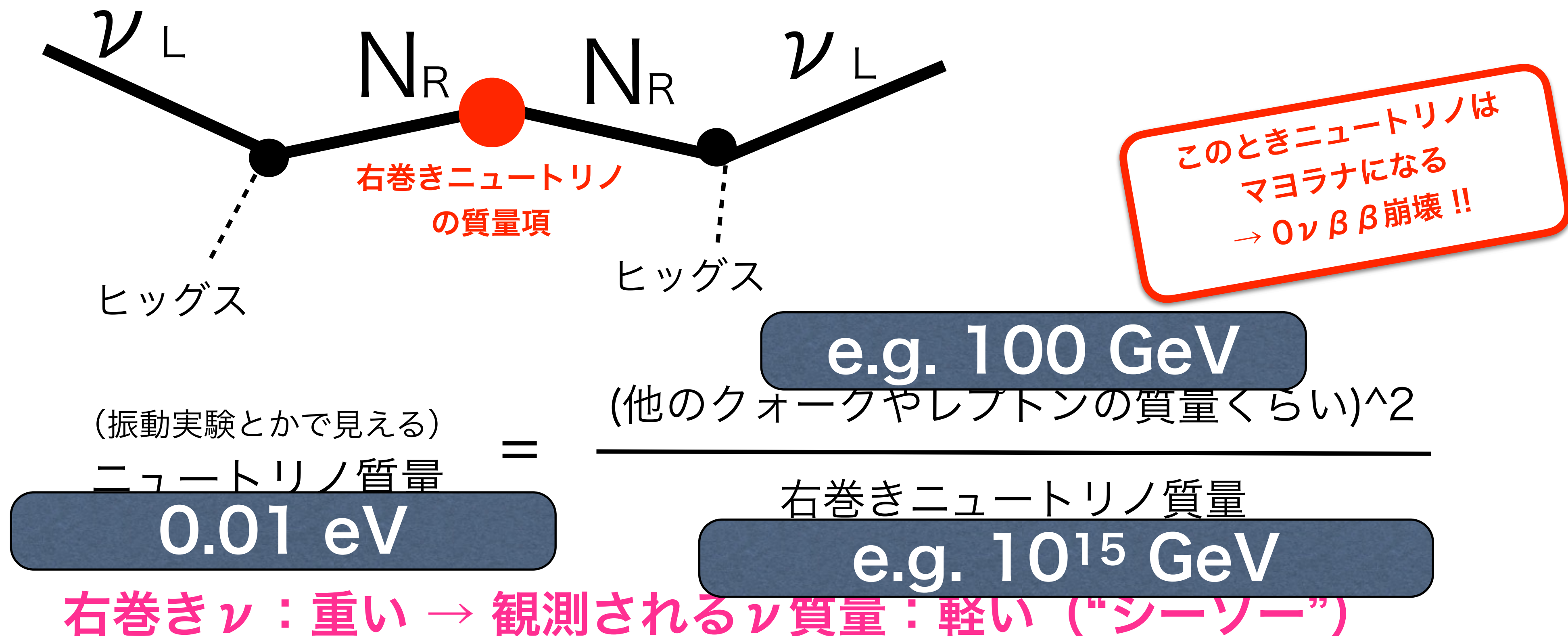
$$\begin{array}{l} \text{(振動実験とかで見える)} \\ \text{ニュートリノ質量} \end{array} = \frac{\text{(他のクォークやレプトンの質量くらい)}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量}}$$

右巻き ν ：重い → 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（一人三役）

② 小さなニュートリノ質量を説明



$$\begin{array}{l} \text{(振動実験とかで見える)} \\ \text{ニュートリノ質量} \\ \mathbf{0.01 \text{ eV}} \end{array} = \frac{\mathbf{e.g. 100 \text{ GeV}}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量} \\ \mathbf{e.g. 10^{15} \text{ GeV}}}$$

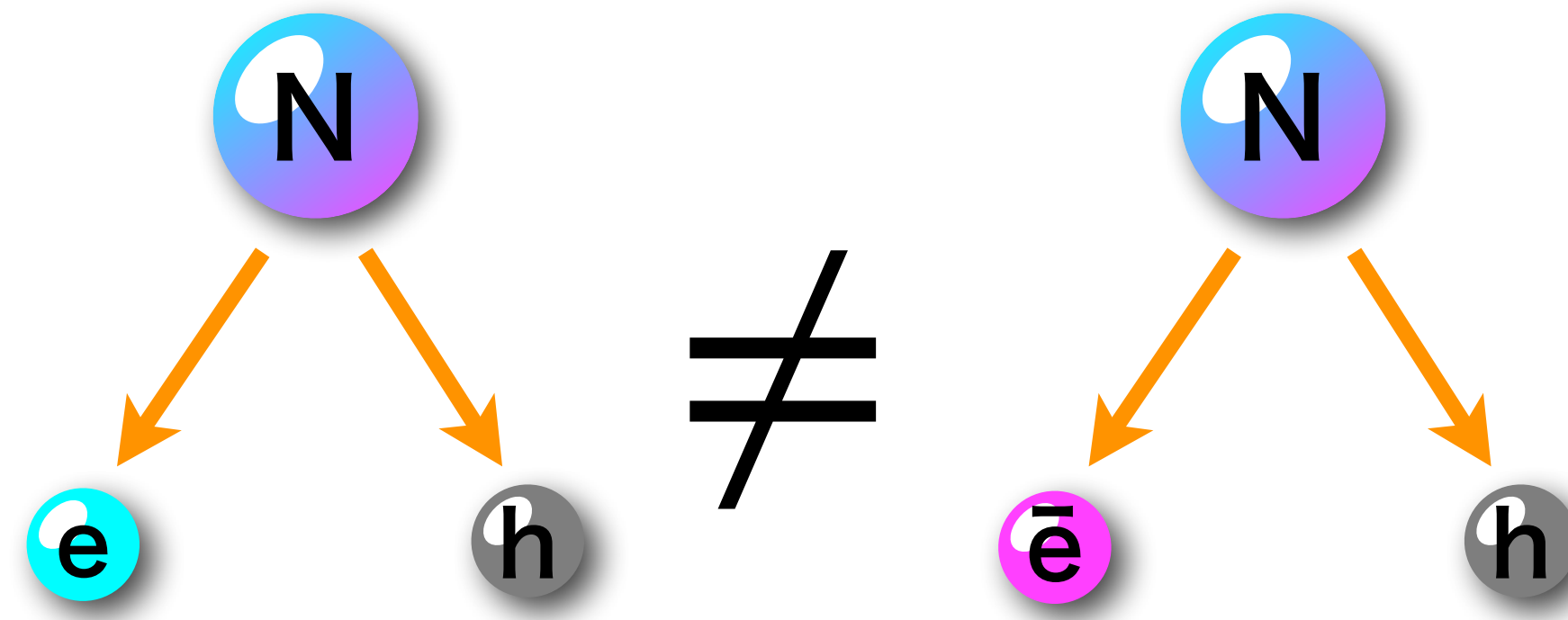
右巻き ν ：重い → 観測される ν 質量：軽い（“シーソー”）

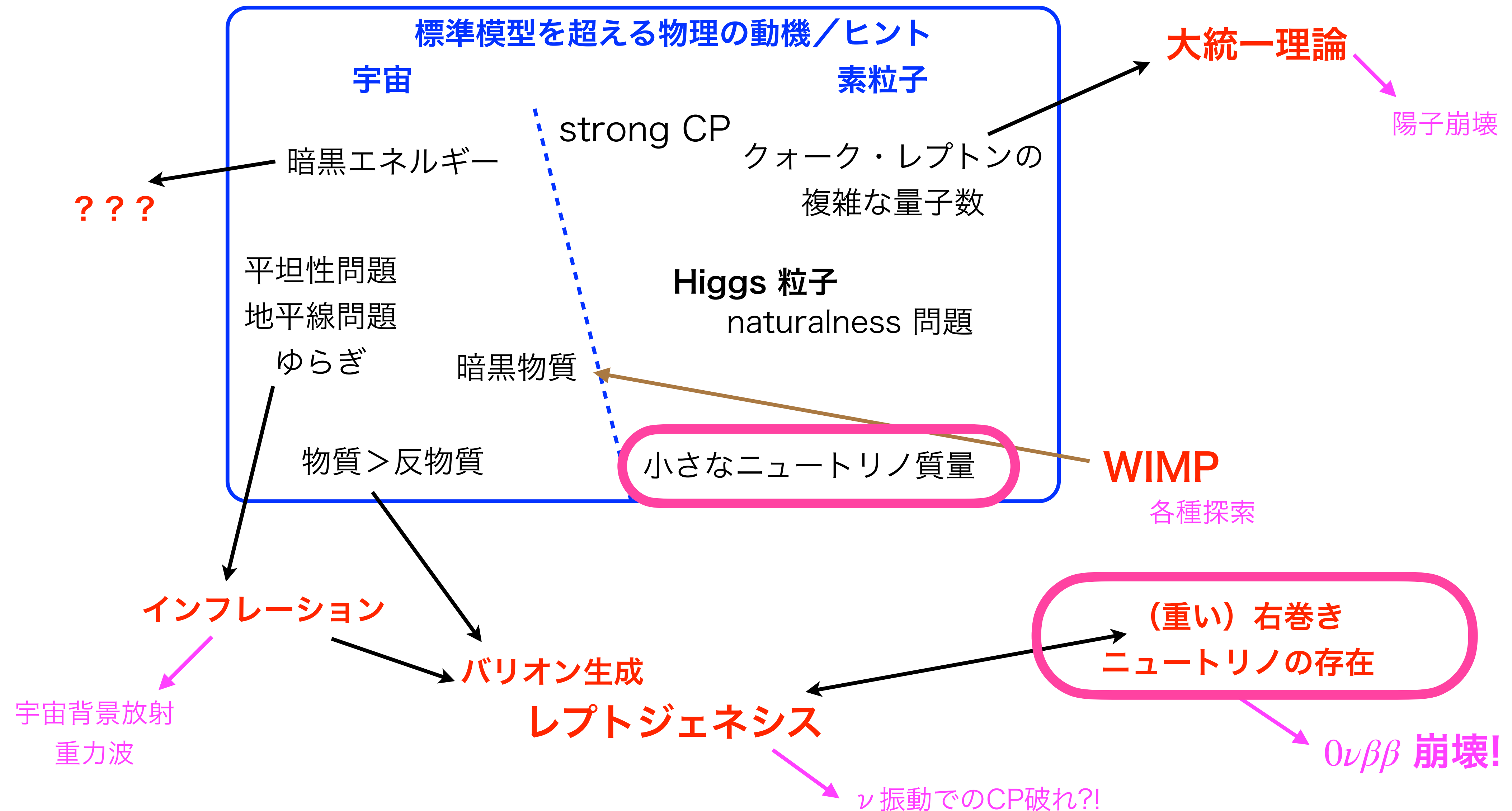
（大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る！）

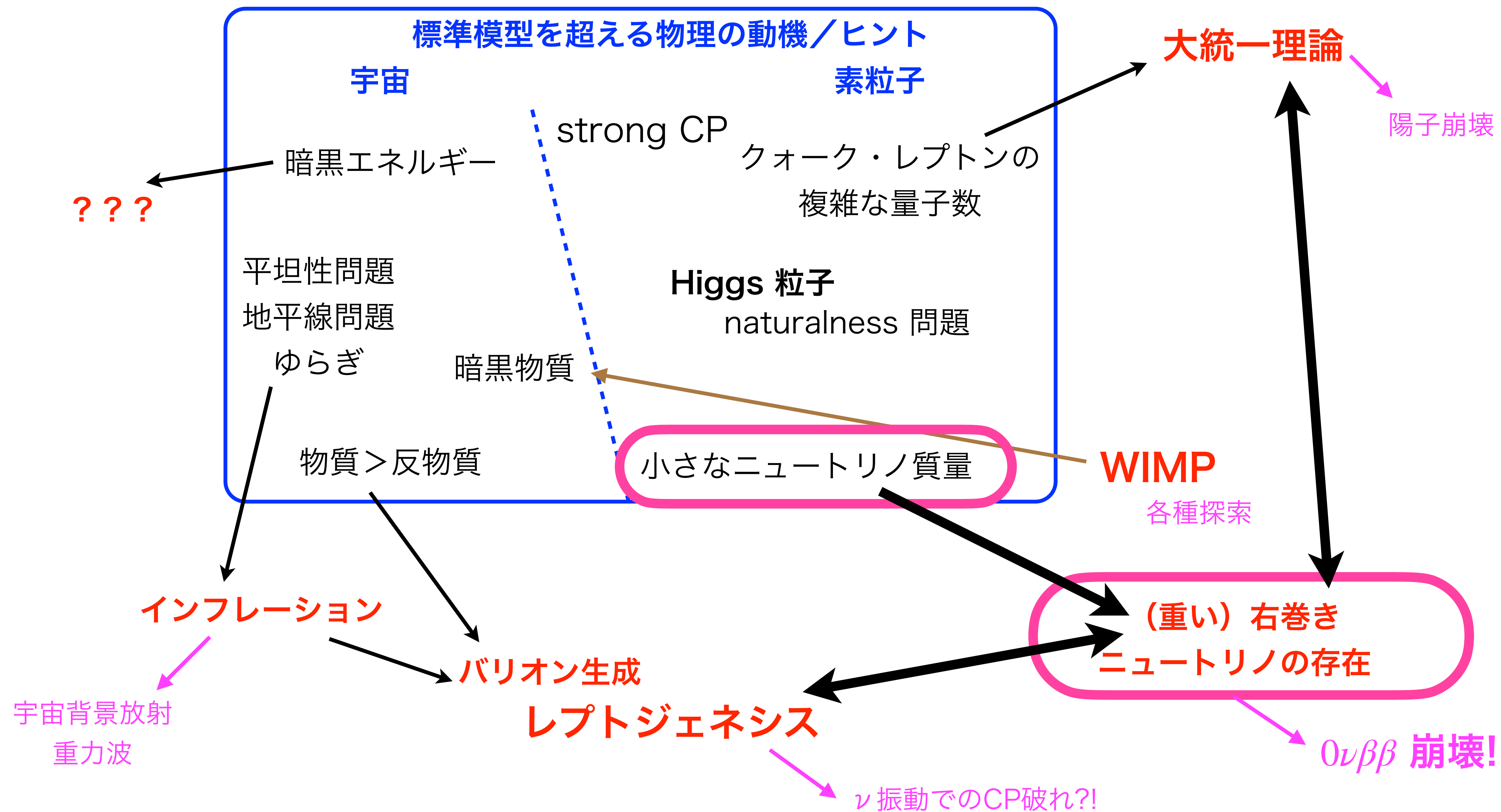
右巻きニュートリノ、実はすごい（一人三役）

③ 宇宙の物質＞反物質を説明できる！

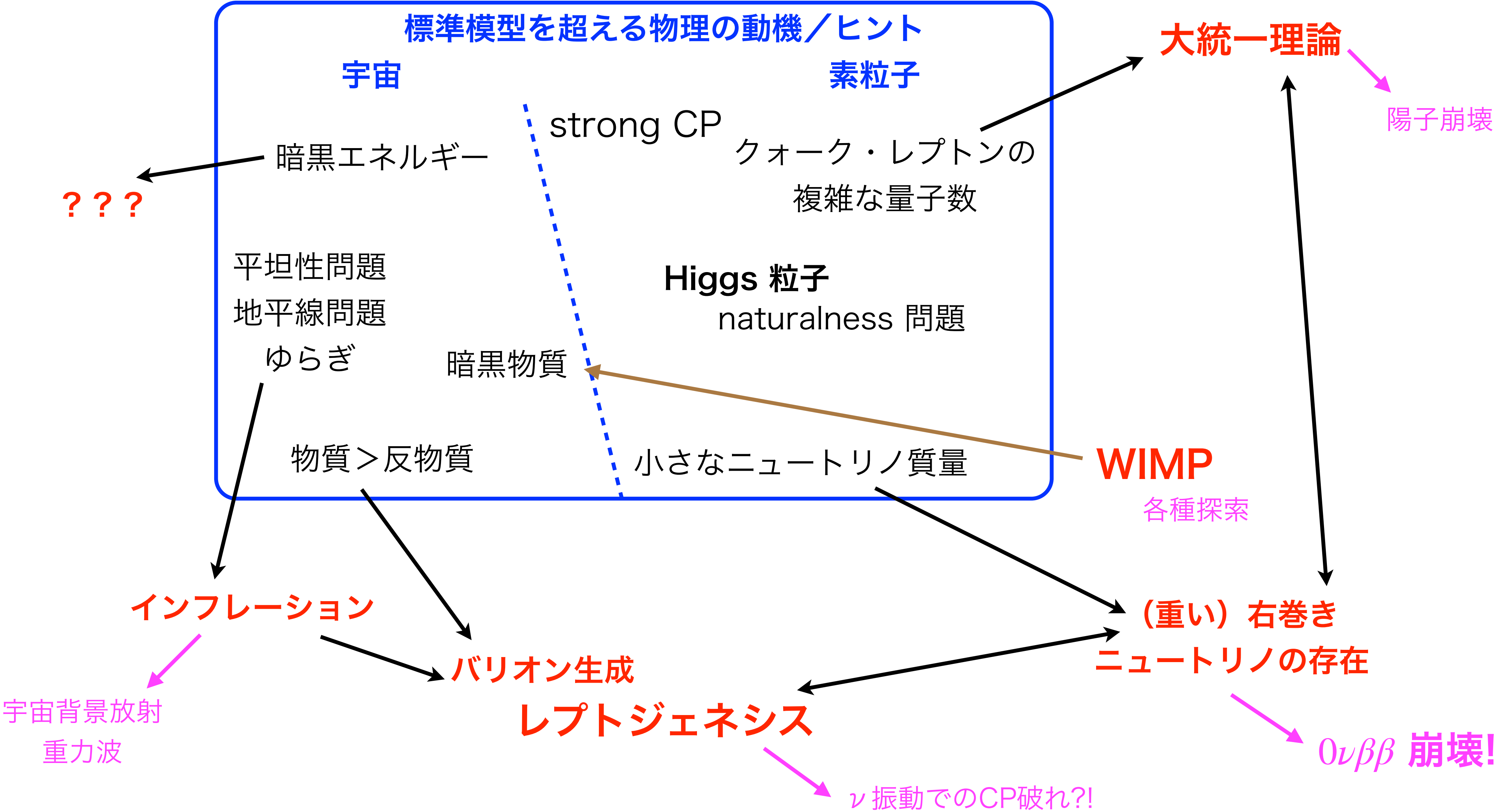
レプトジェネシス





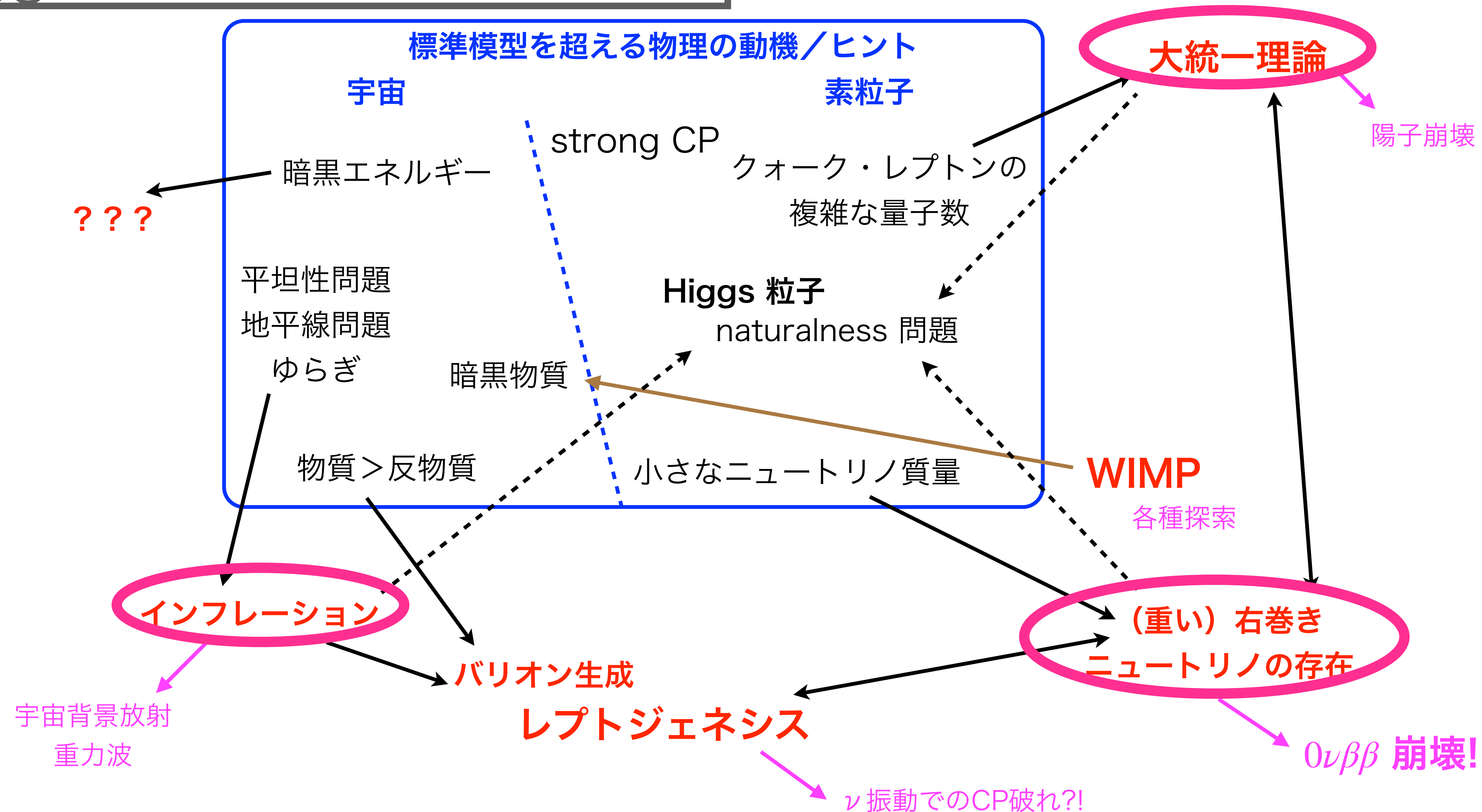


あと少し…！



次は . . .

Higgsに関する理論的な問題



ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

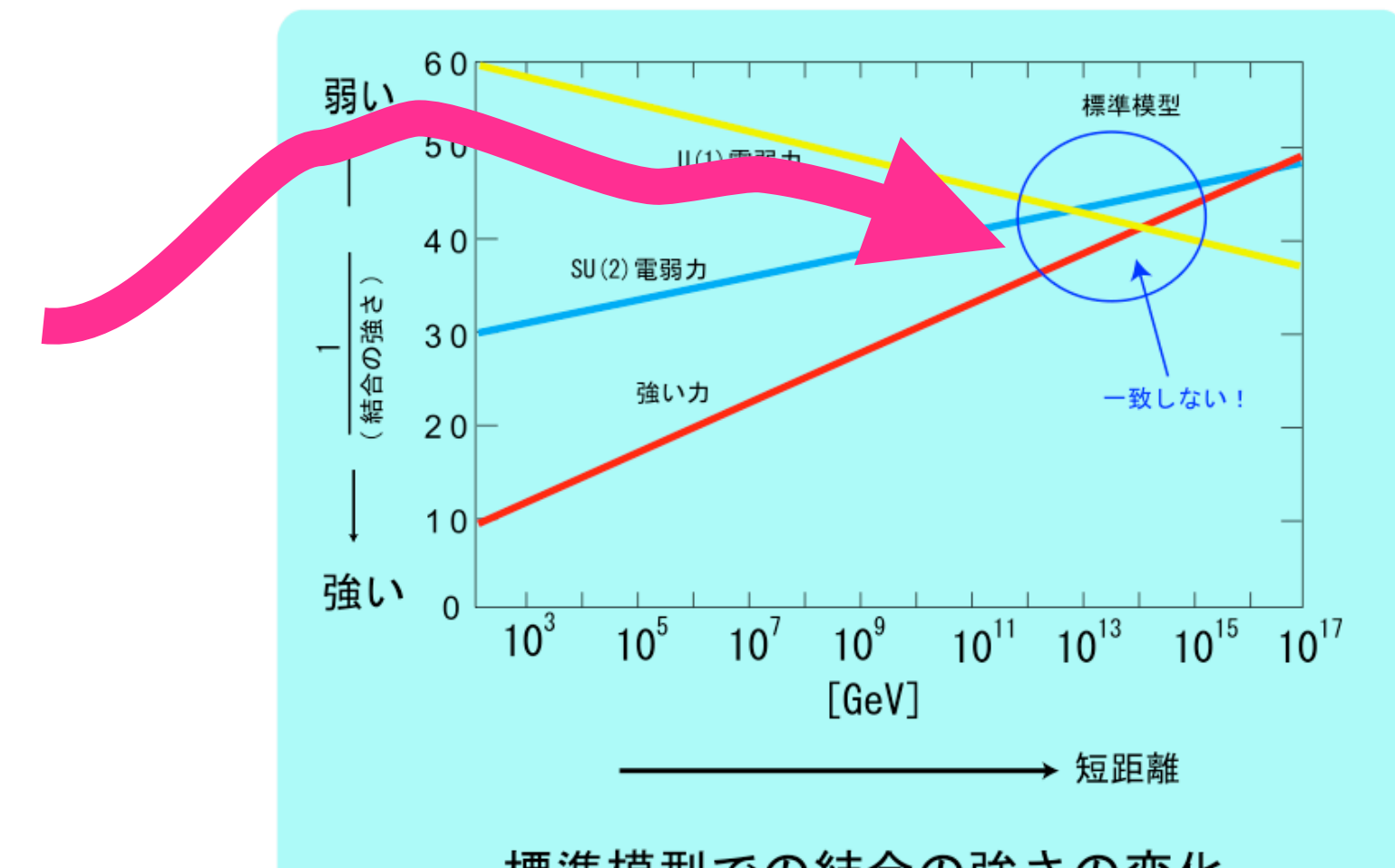
①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質＞反物質を説明するには N_1 の質量 $> 10^9 \text{ GeV}$ 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 = $10^{14} \sim 10^{16} \text{ GeV}$



③：インフレーション

・・・やはり高いスケールを要求。

例えば比較的シンプルなインフレーションモデルでは

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

($\sim 10^{18} \text{ GeV}$) (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)

→ 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)

quarks q	$\frac{1}{2}$	$\xleftrightarrow{\text{spin}}$	0	squarks $\tilde{q}$
leptons ℓ	$\frac{1}{2}$	$\xleftrightarrow{\hspace{1cm}}$	0	sleptons $\tilde{\ell}$
gauge bosons A_μ	1	$\xleftrightarrow{\hspace{1cm}}$	$\frac{1}{2}$	gauginos λ
Higgs bosons H	0	$\xleftrightarrow{\hspace{1cm}}$	$\frac{1}{2}$	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

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

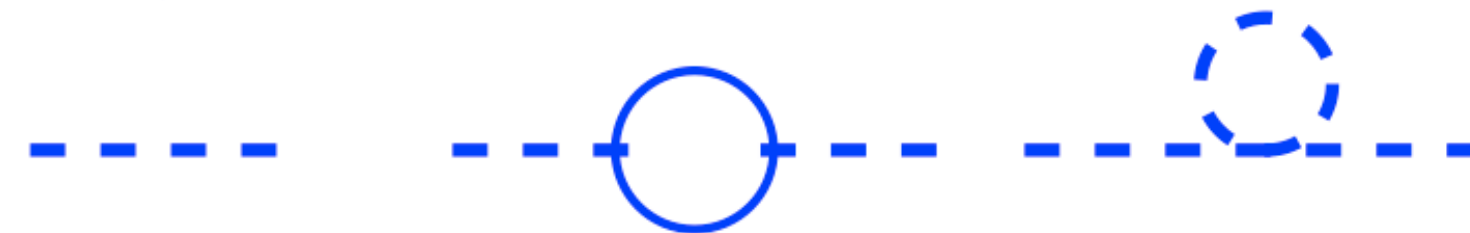


(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

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

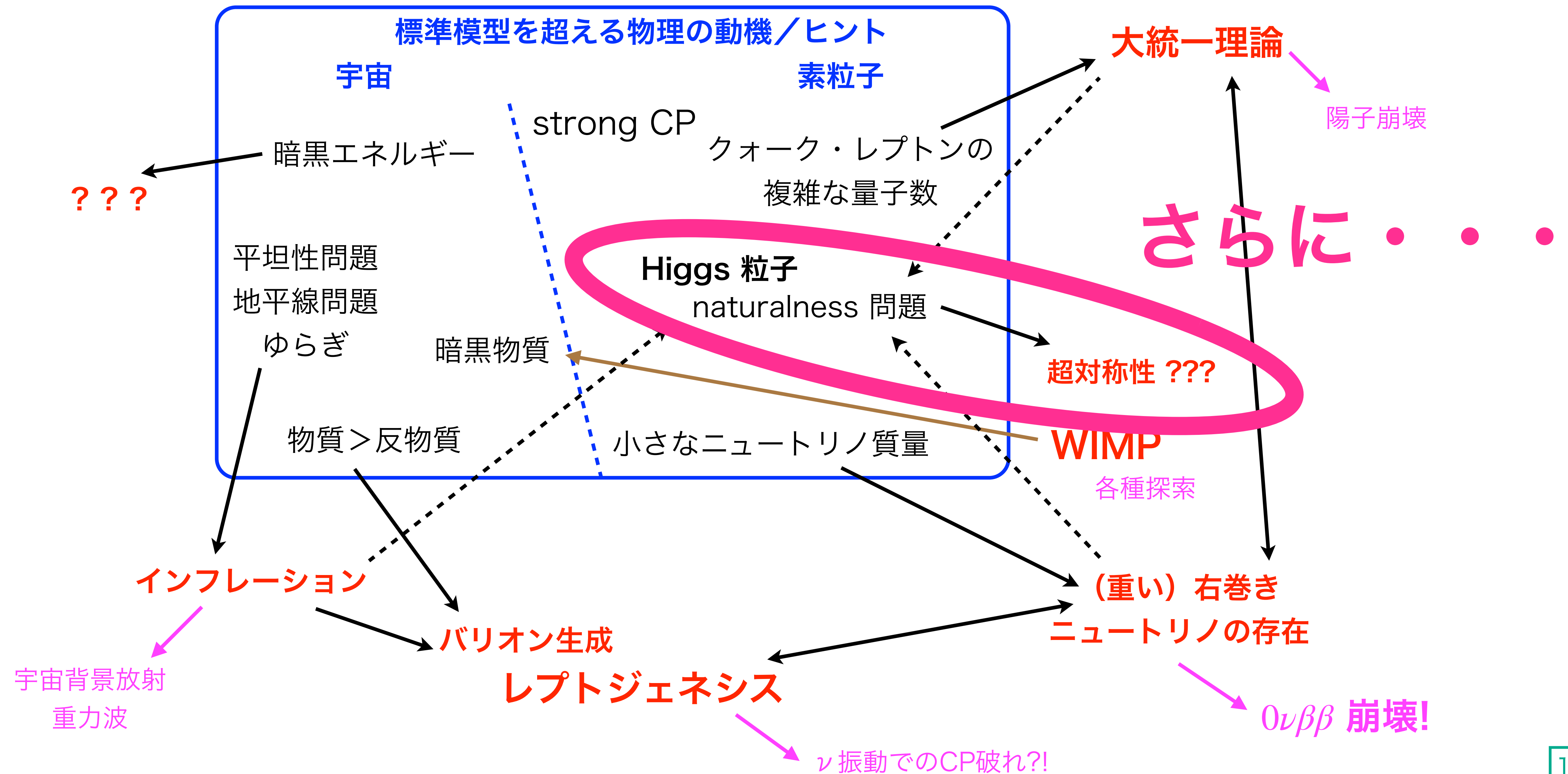
超対称性あり
問題解決！

fine tuning をほとんどなくするためには・・・

SUSY 粒子 < O(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？・・・???)

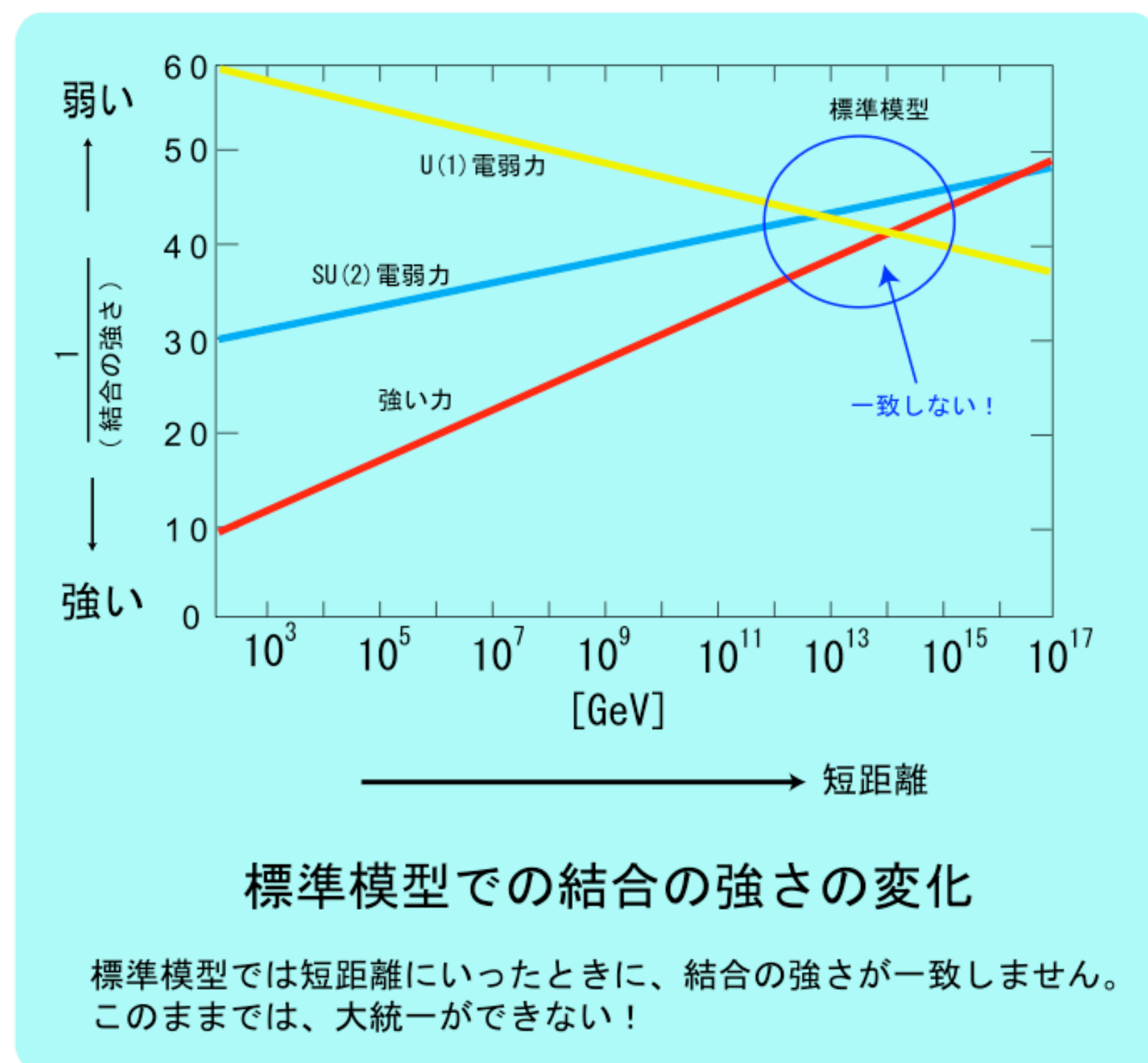


大統一理論の予言：

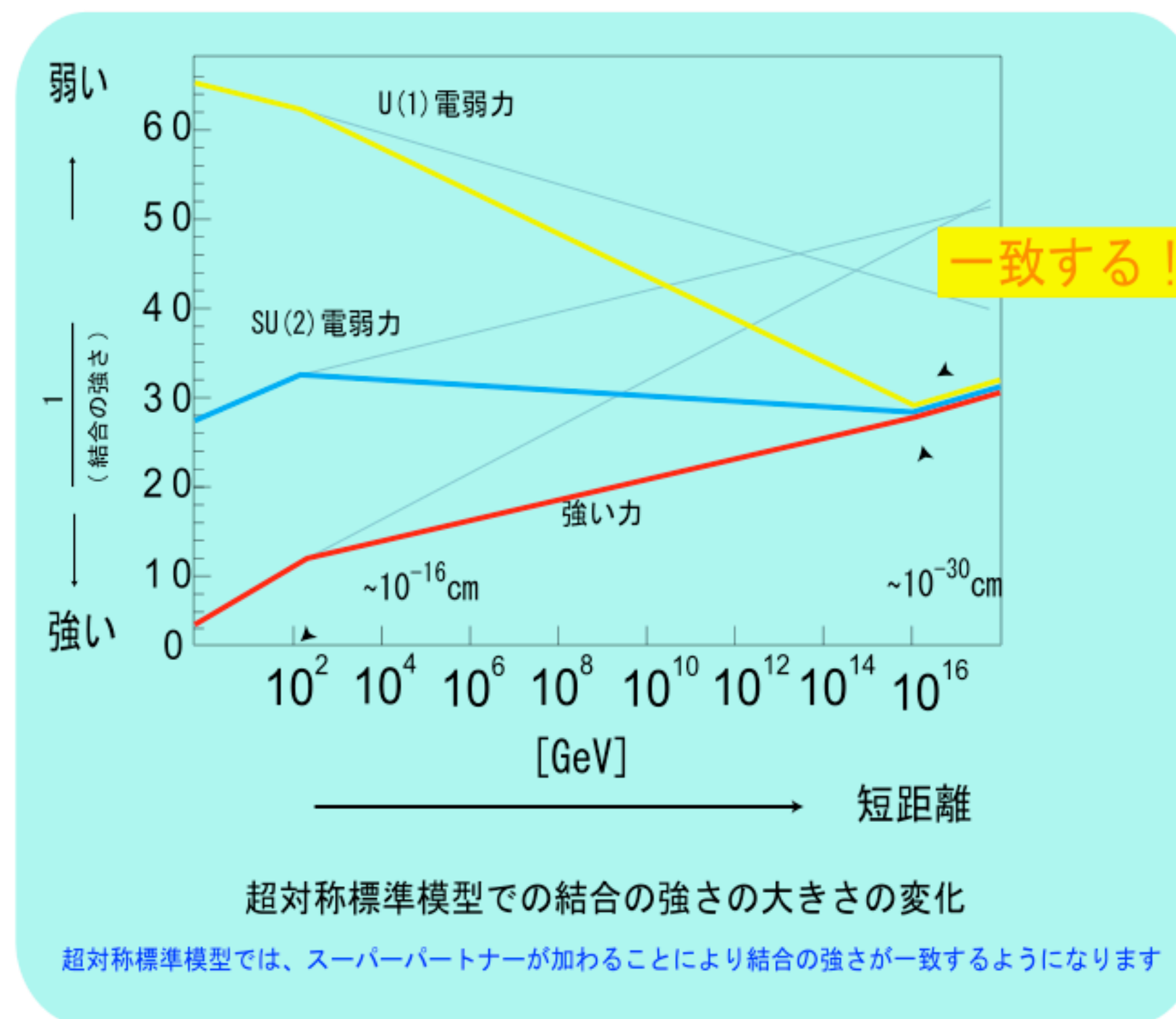
もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

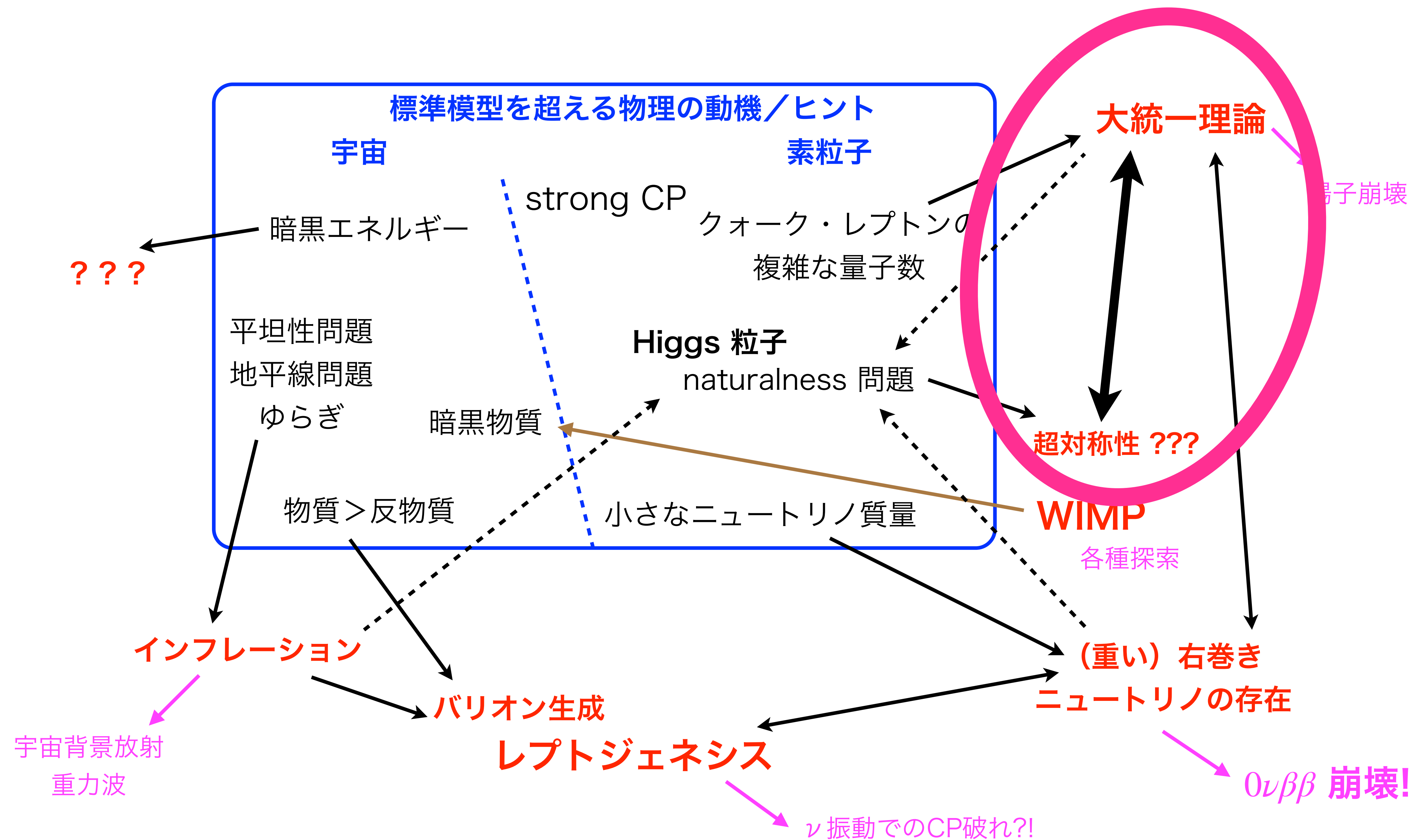
非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致するはず。

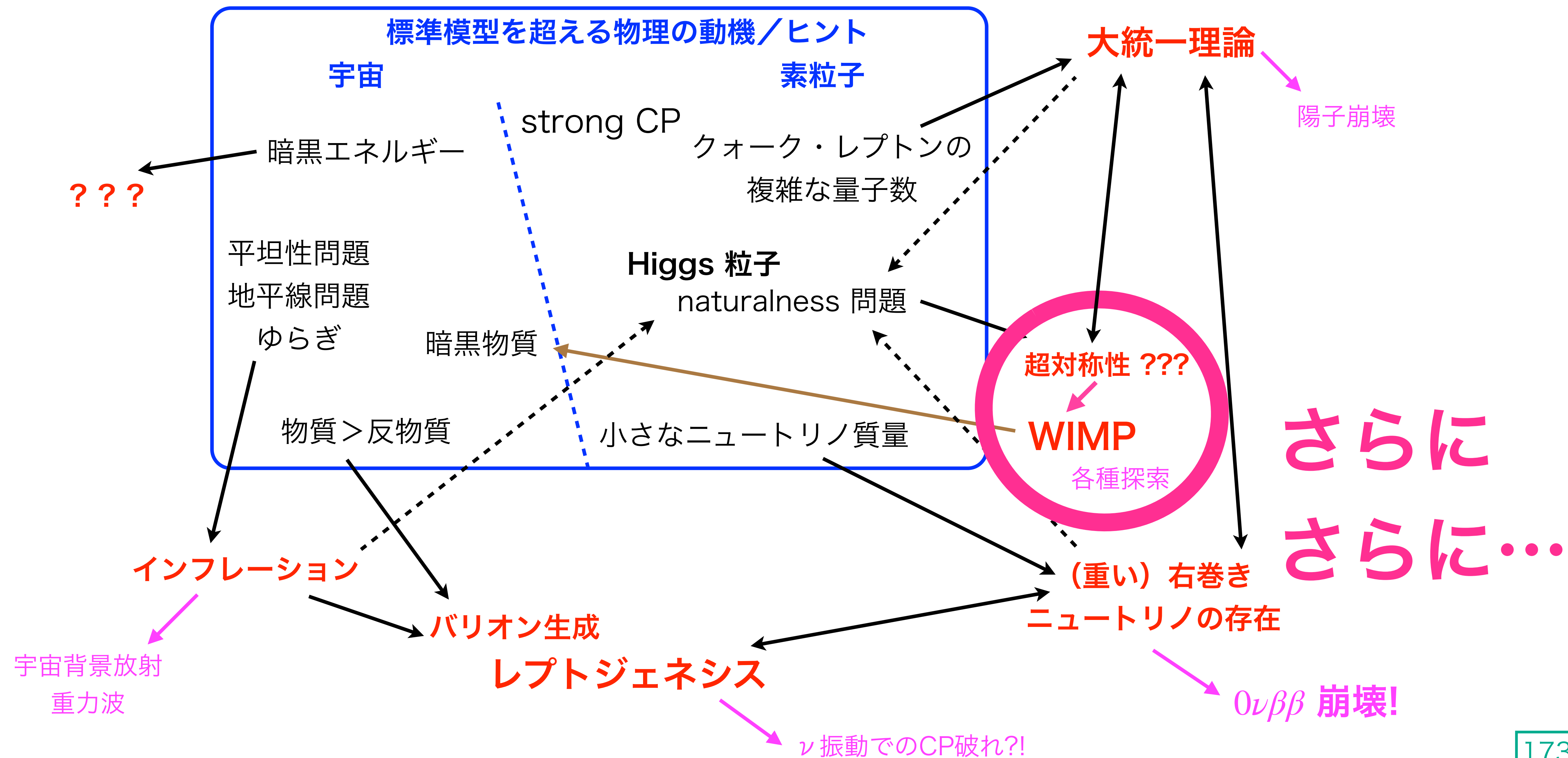
標準模型



標準模型 + SUSY



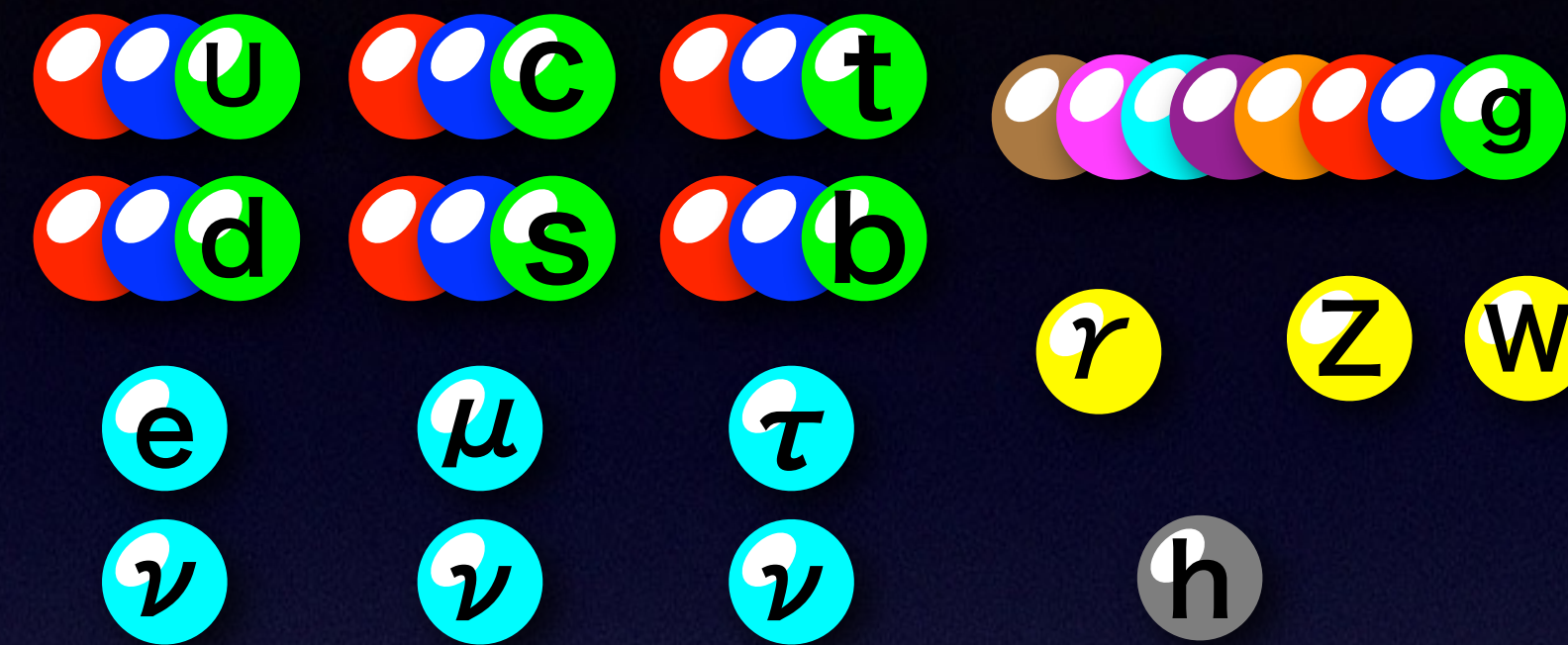




暗黒物質の正体

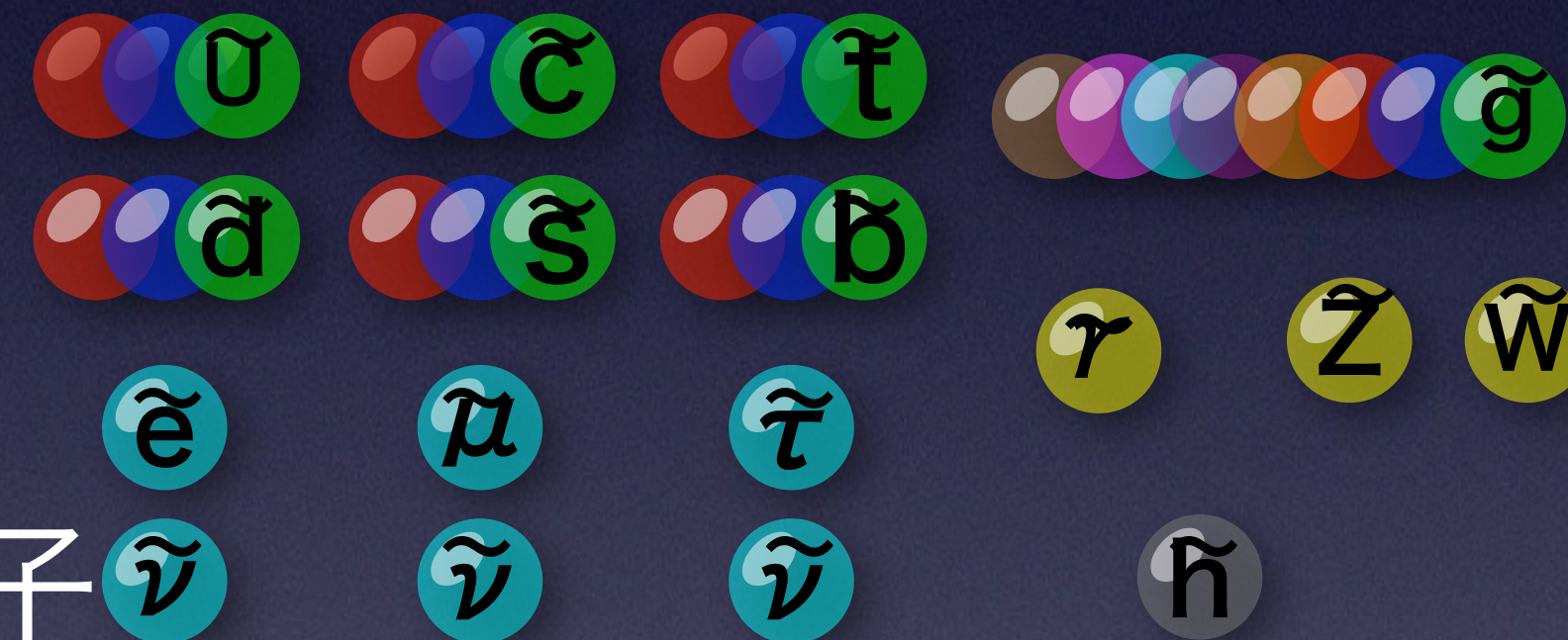
標準模型を超える素粒子理論が必要！

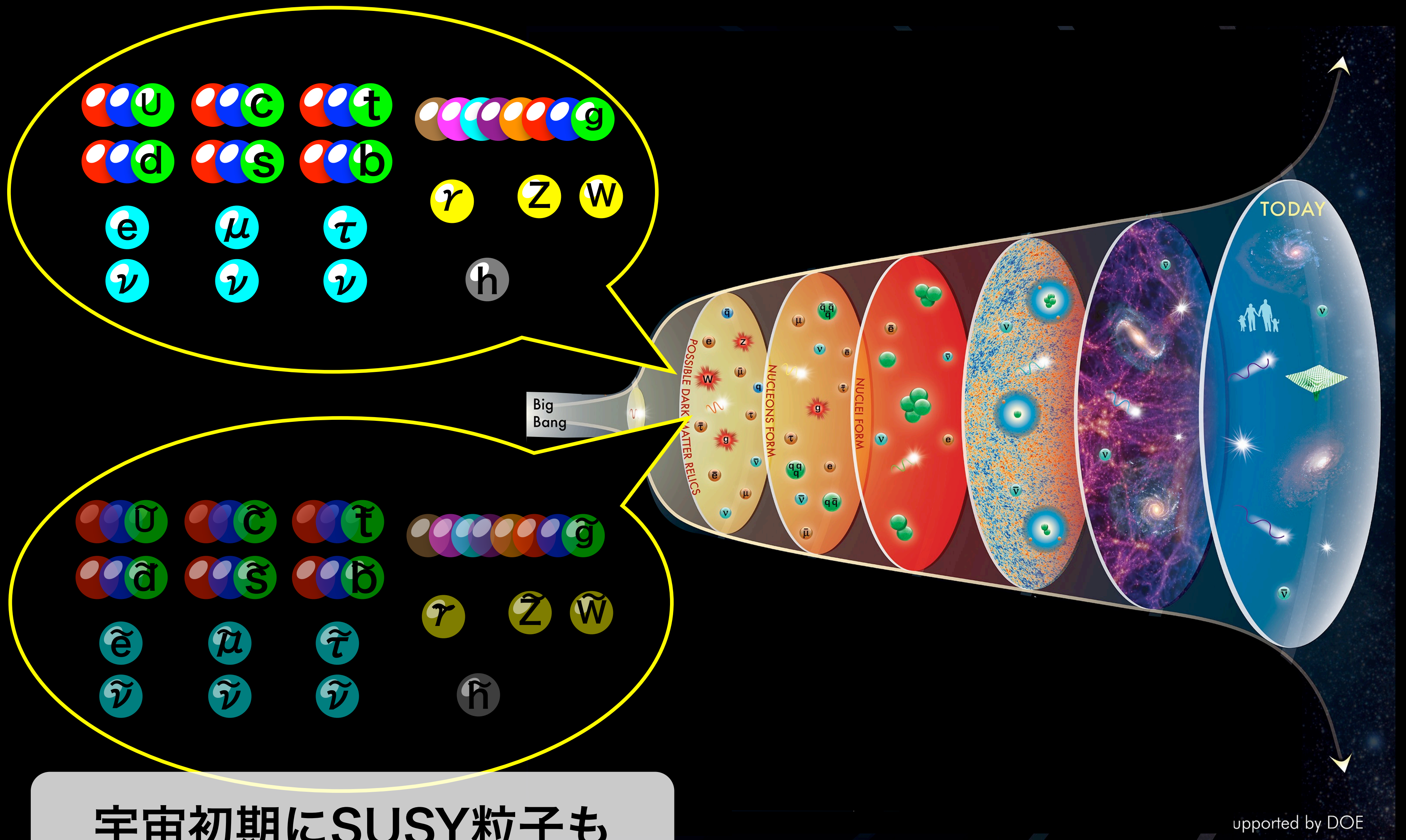
標準模型



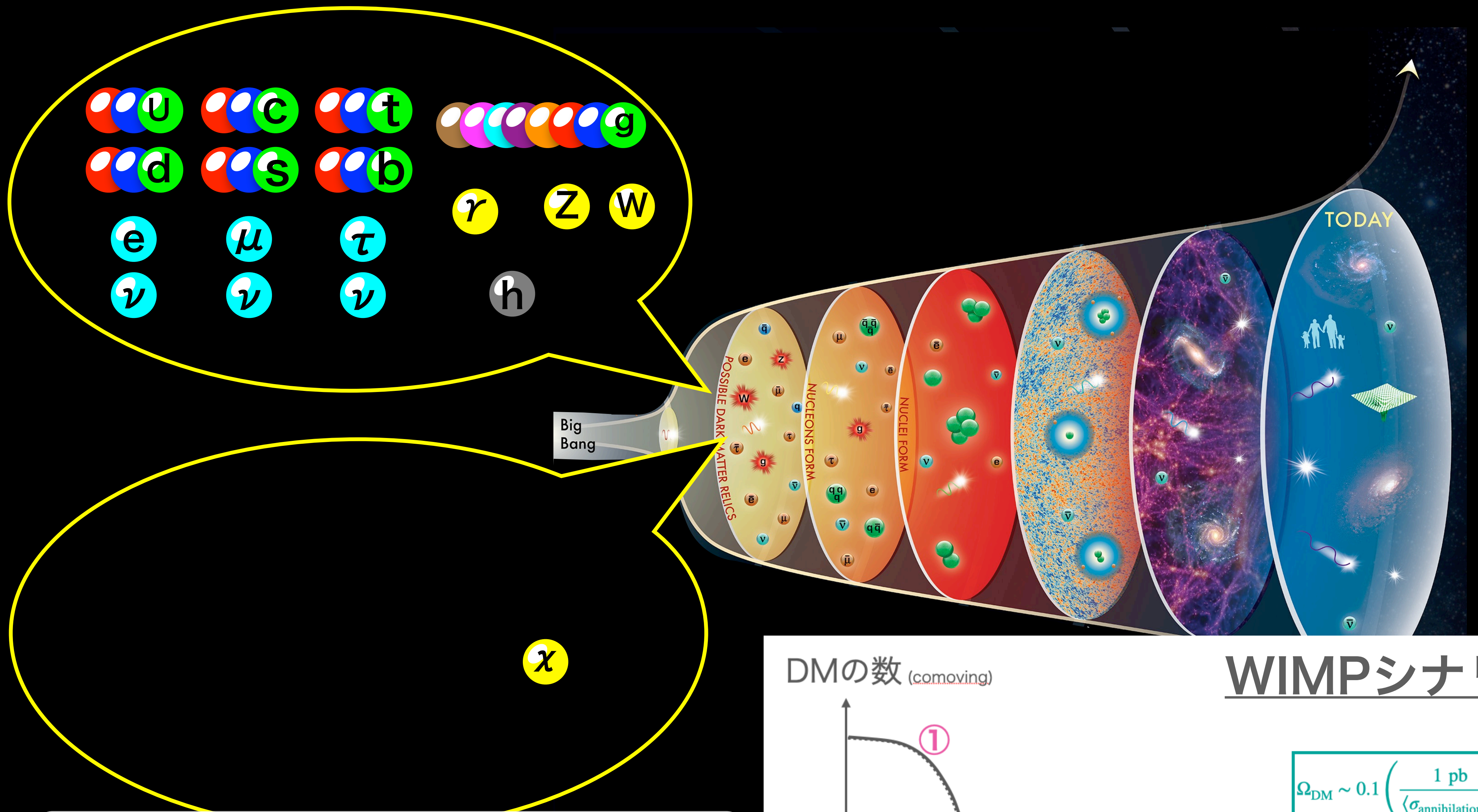
超対称性

SUSY粒子



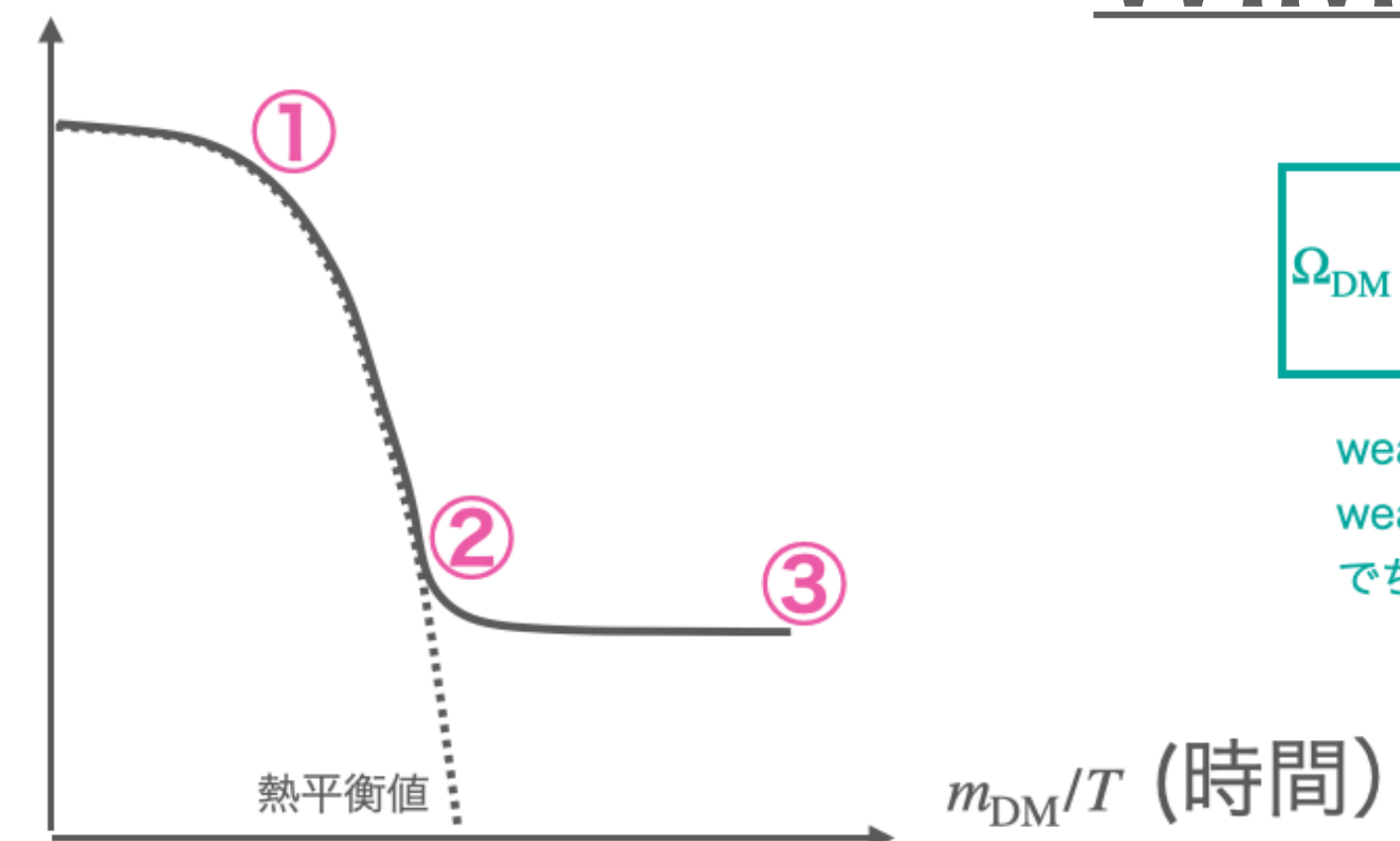


宇宙初期にSUSY粒子も
飛び回っていて・・・



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。

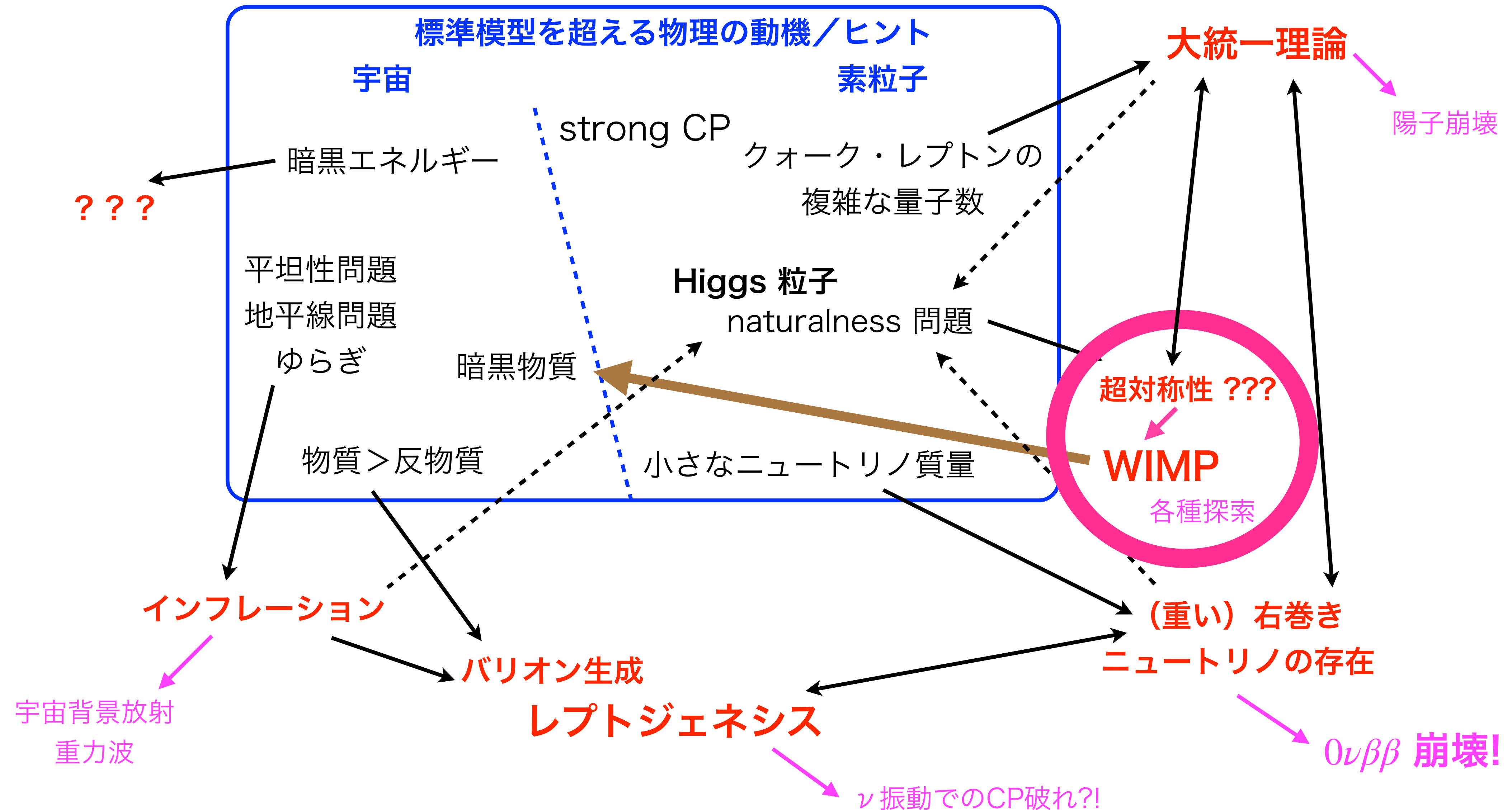
DMの数 (comoving)



WIMPシナリオ

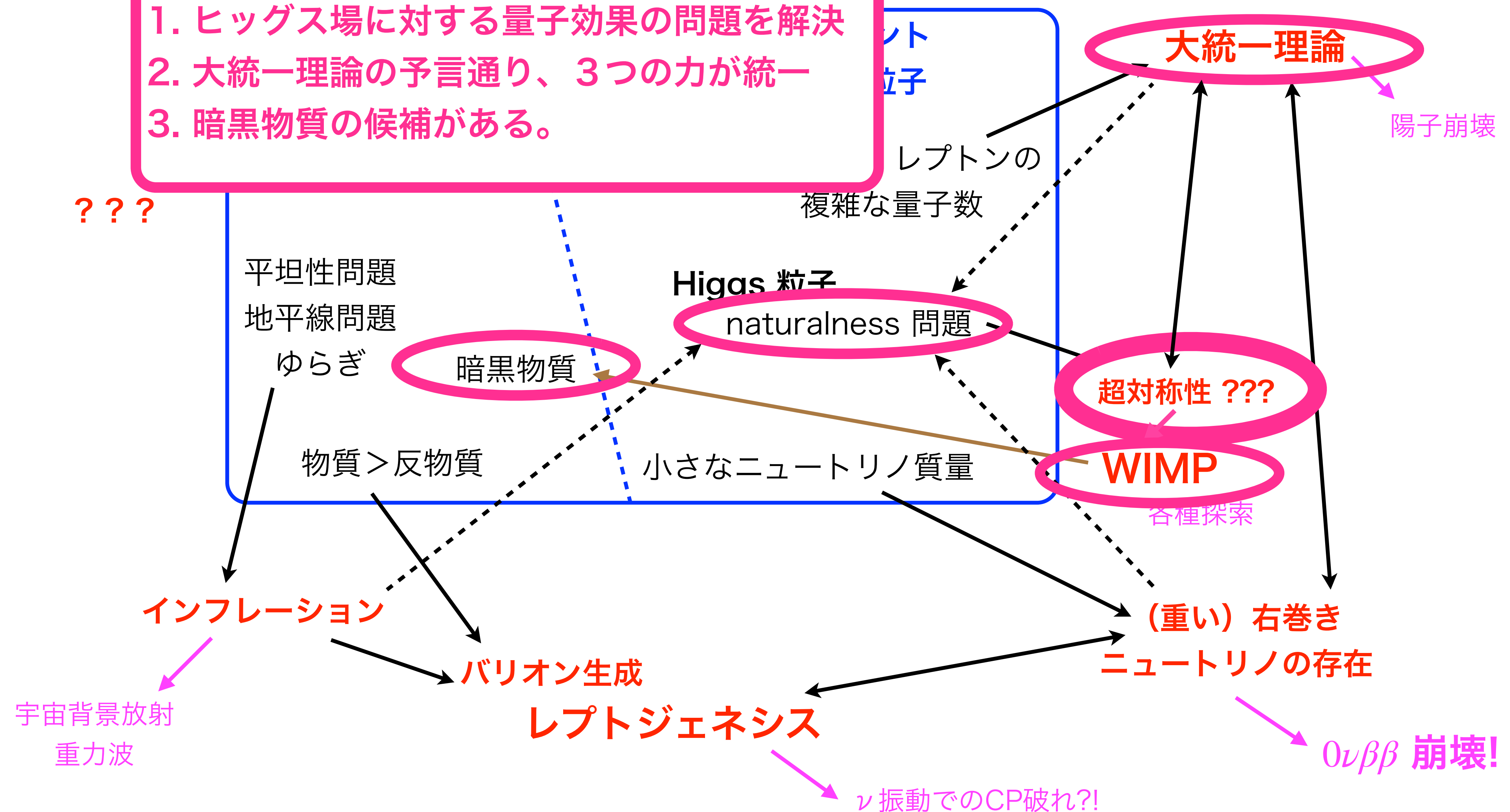
$$\Omega_{\text{DM}} \sim 0.1 \left(\frac{1 \text{ pb}}{\langle \sigma_{\text{annihilation}} \nu \rangle} \right)$$

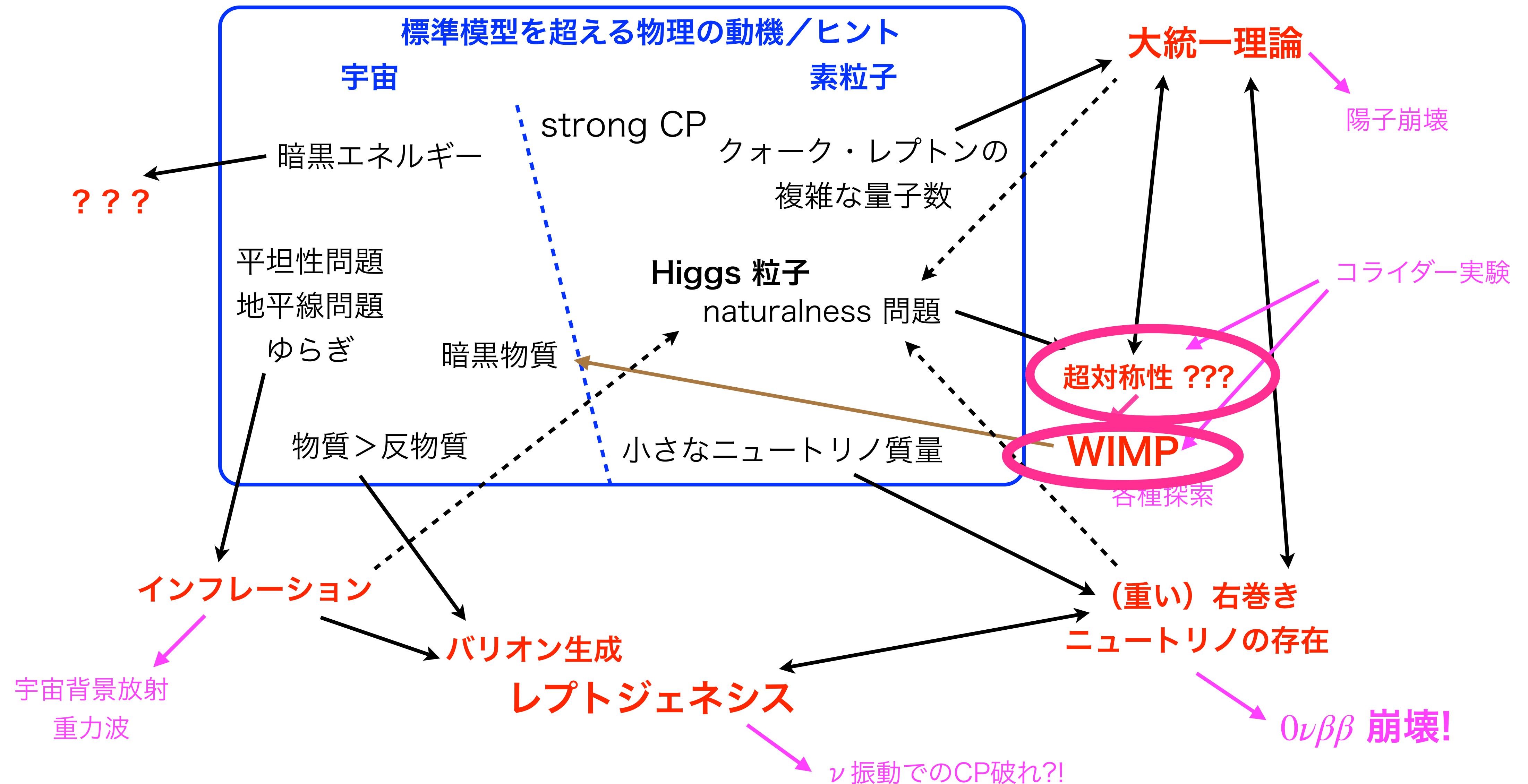
weak scale mass,
weak scale interaction
でちょうど良い。"WIMP miracle"



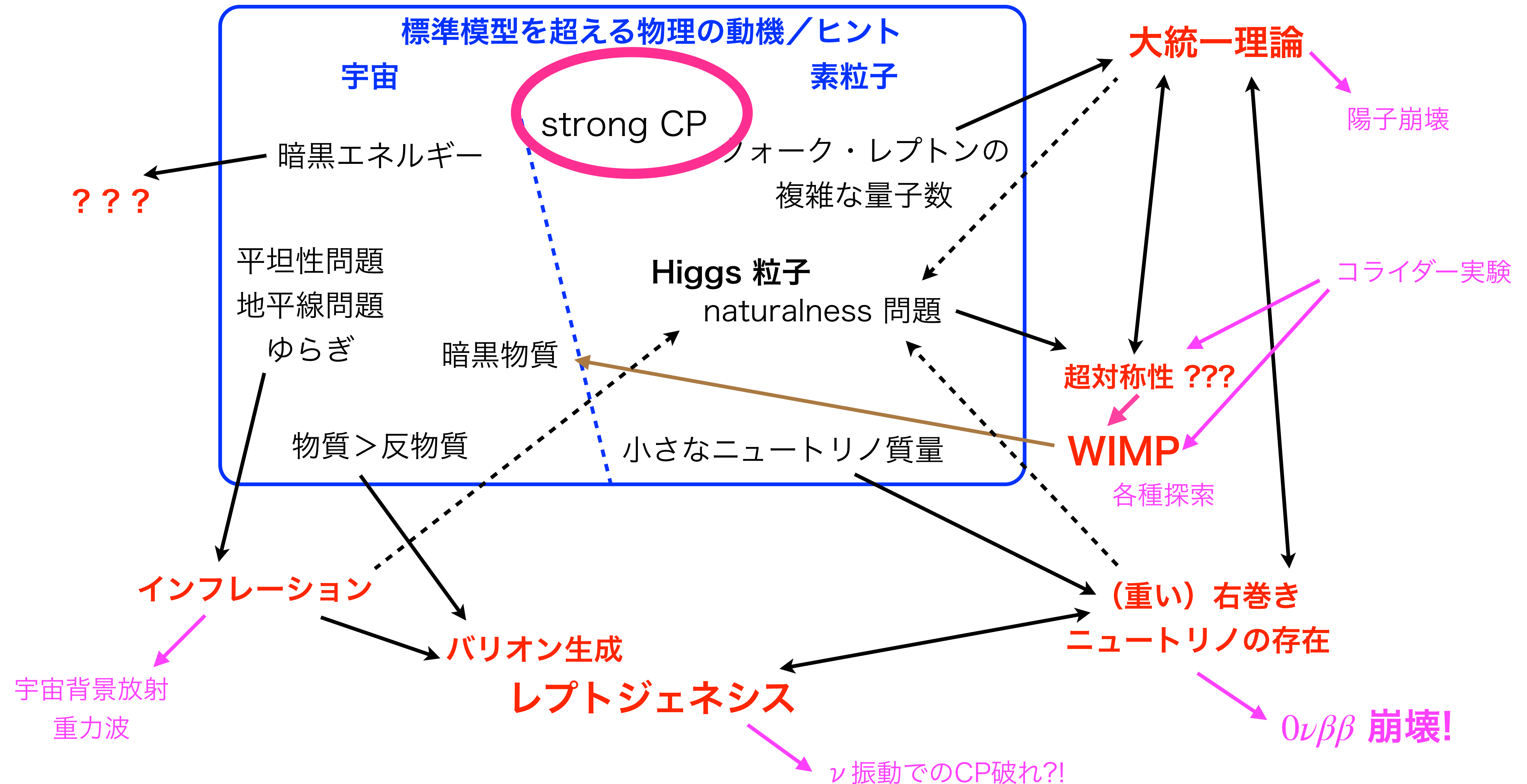
超対称性理論も一人三役

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。





最後に...



アクシオン

- Strong CP 問題

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

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

アクシオン

- Strong CP 問題

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

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

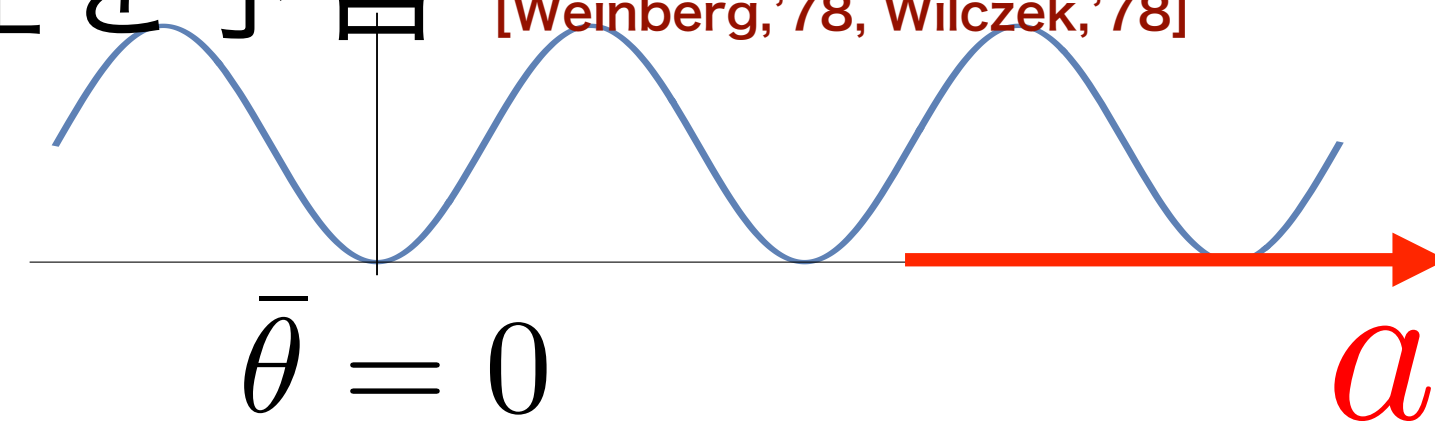
Why?

- 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

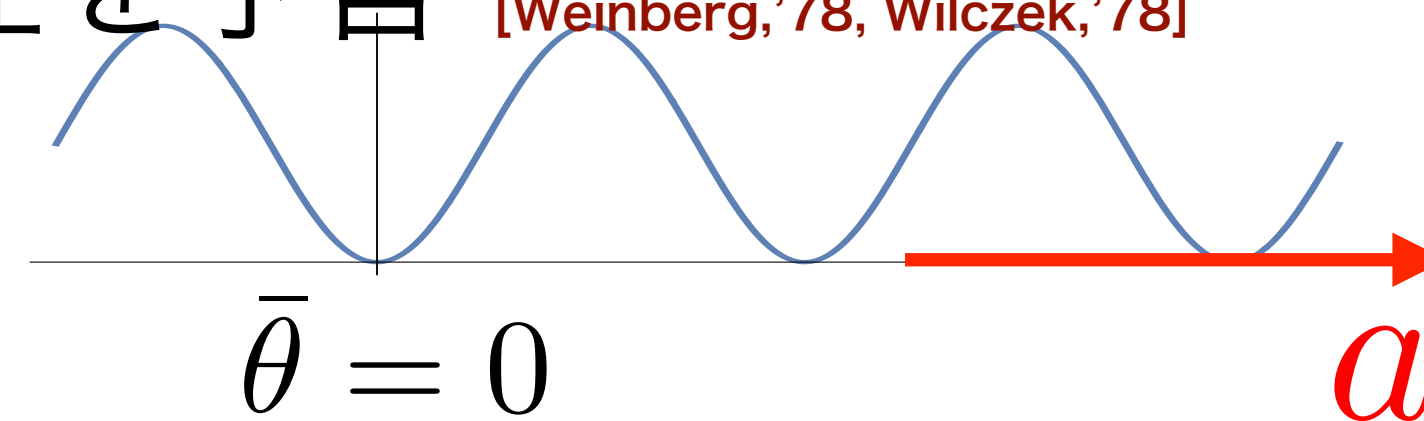
$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

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

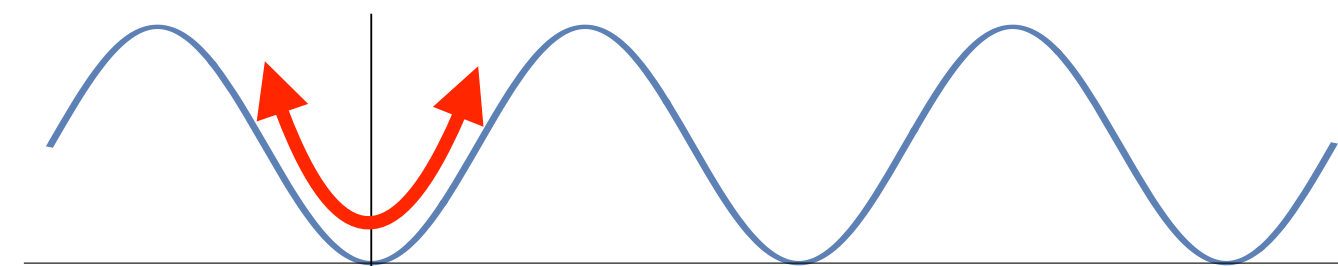
- Peccei-Quinn 機構で解決出来る。 [Peccei, Quinn,'77]

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

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

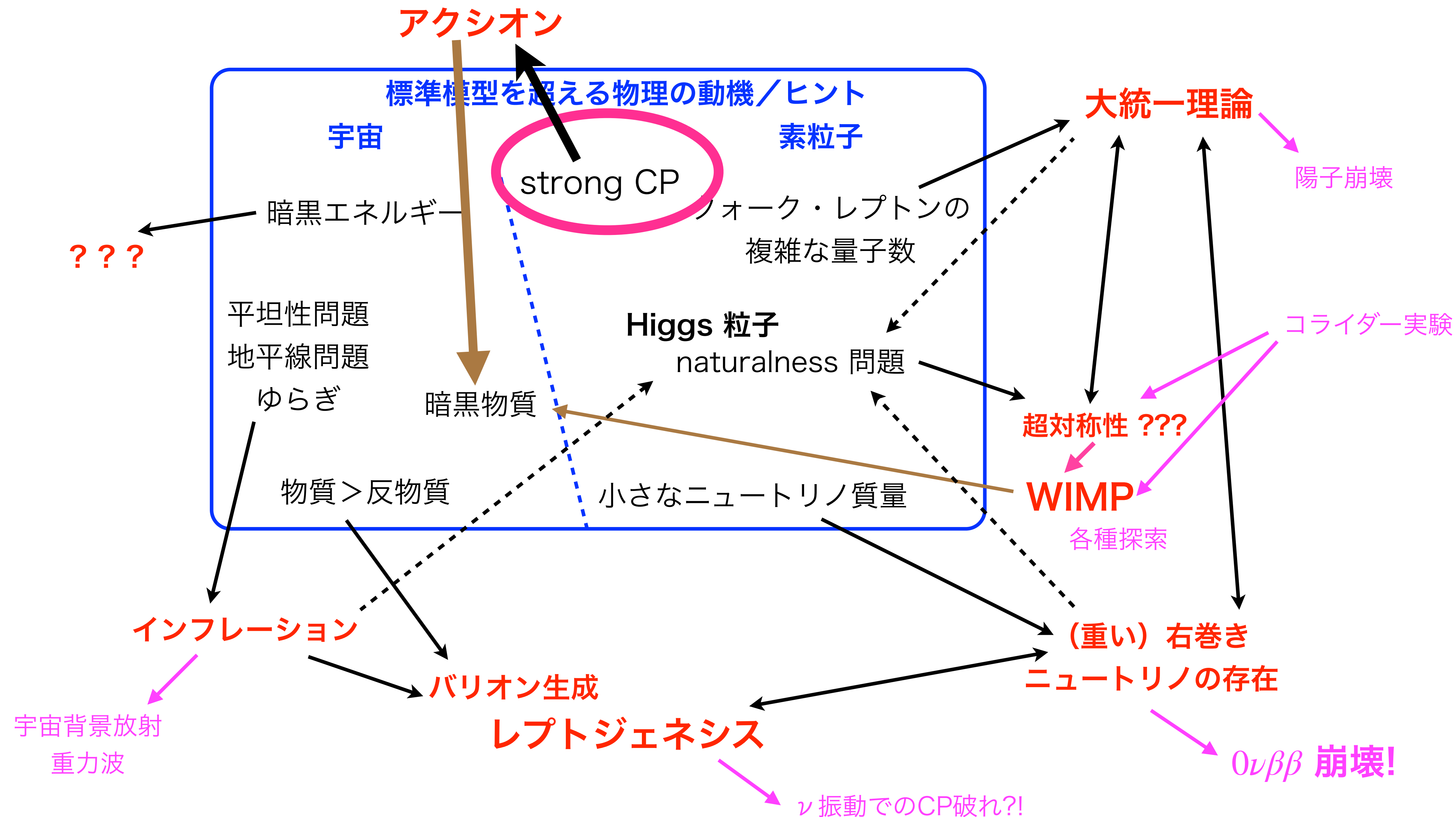


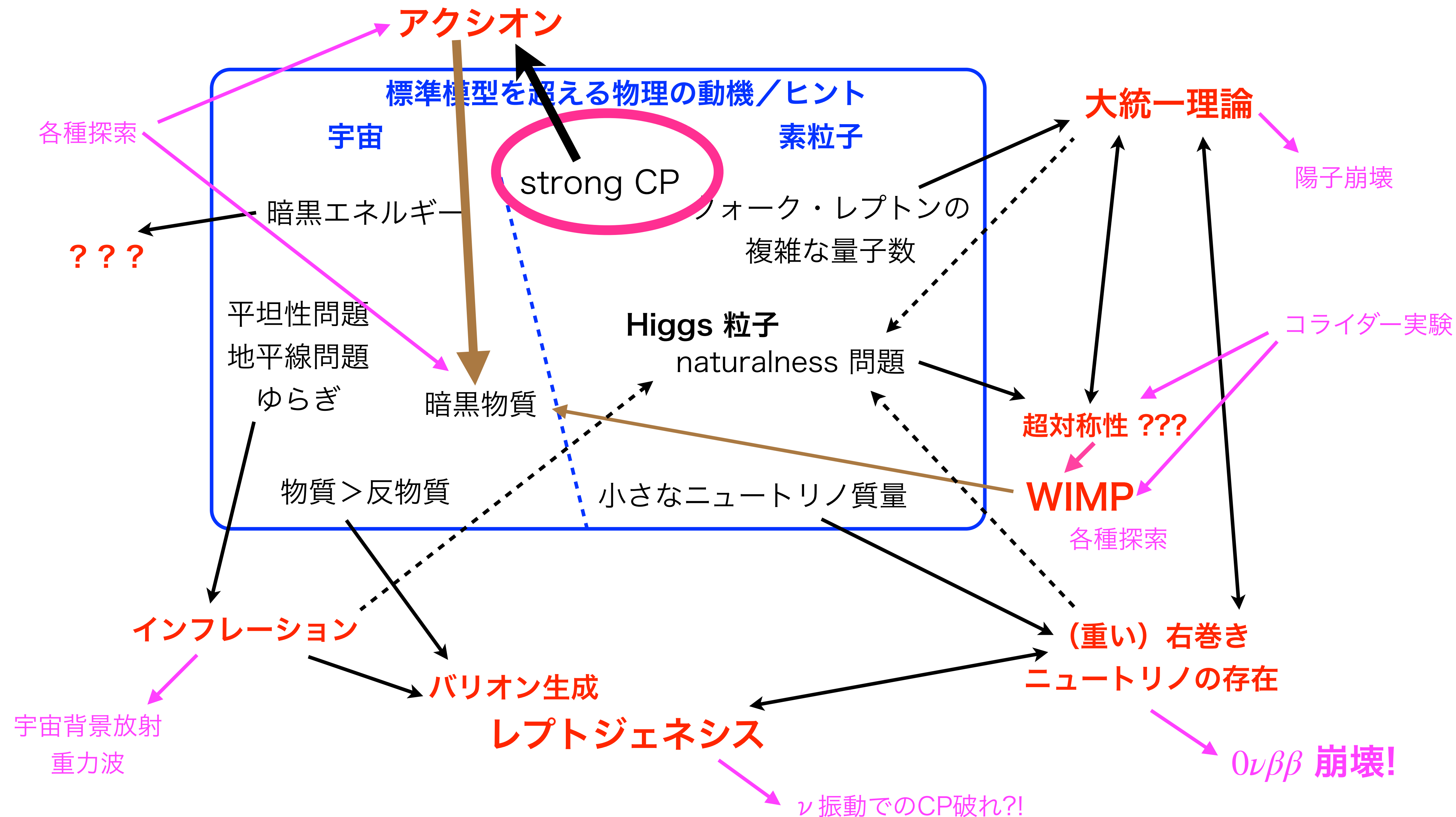
- アクシオン** も **暗黒物質** の候補！



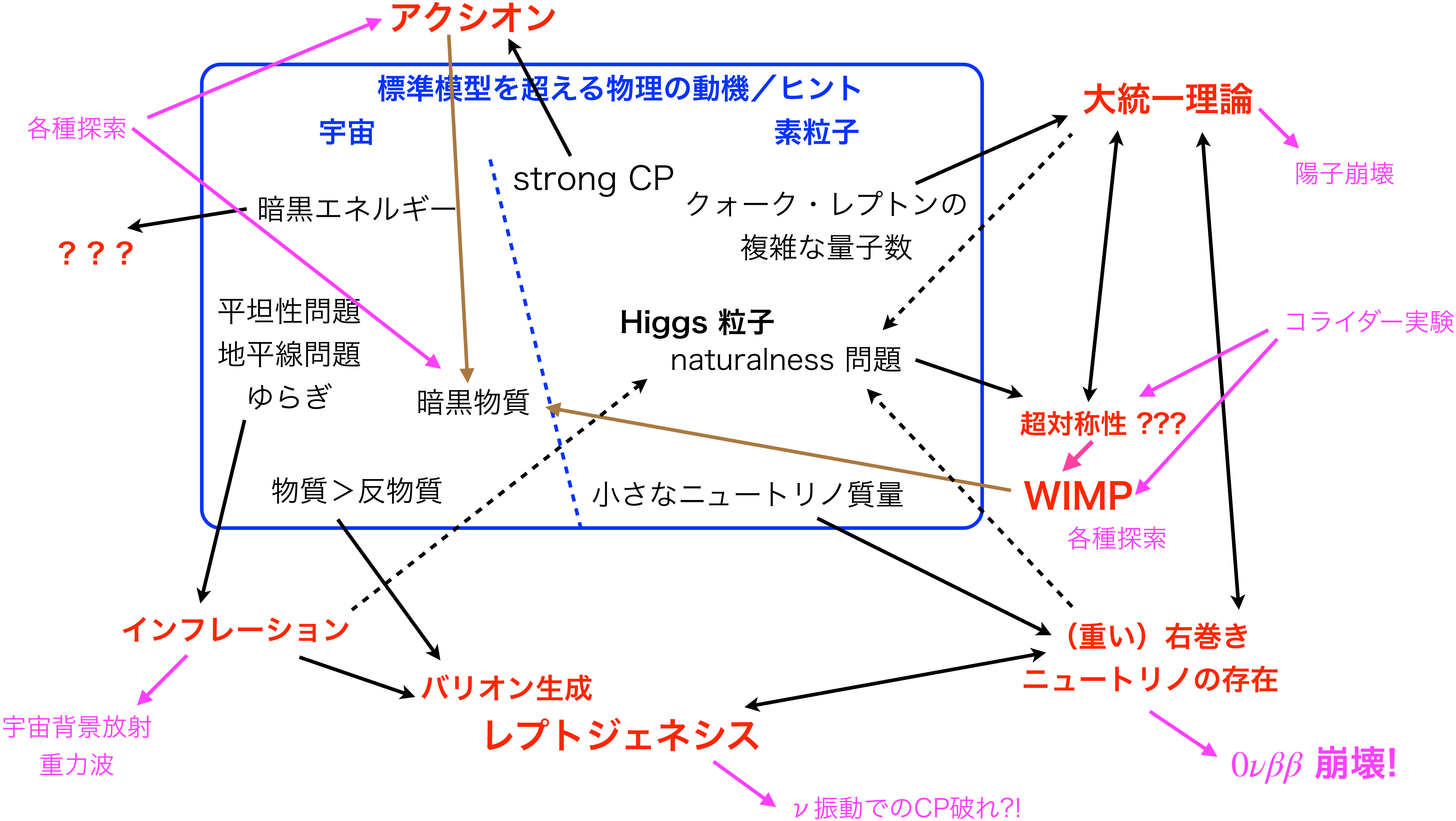
$$\Omega_a h^2 = 0.18 \theta_i^2 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.19} .$$

[Turner,'86]

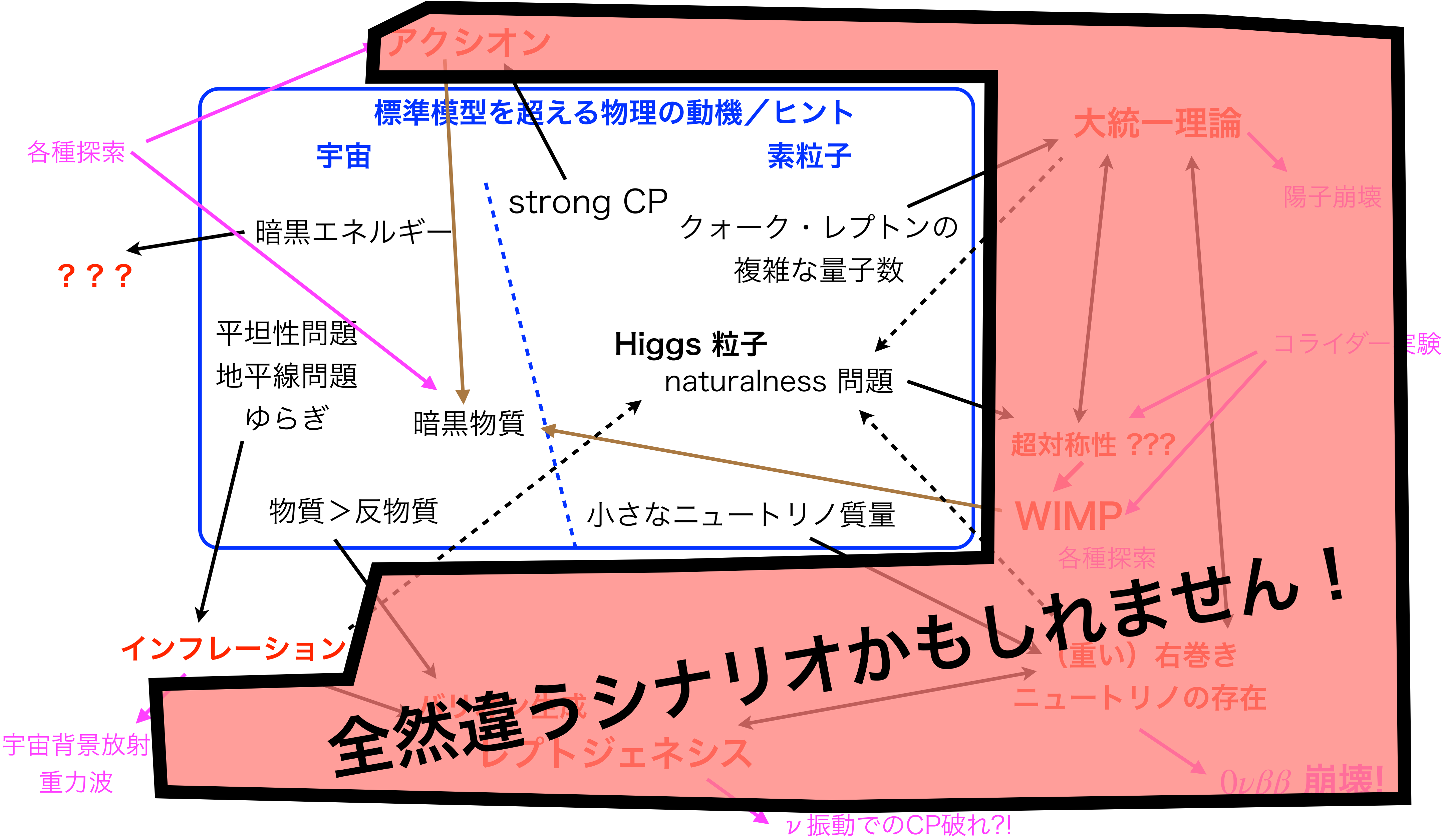




… ということで、先週と今週で、 ↓ これらの概要をお話しました。



… ということで、先週と今週で、↓これらの概要をお話しました。



- ◆ 概要の紹介おしまい。
- ◆ 次回以降は黒板とスライドを使って各論をやります。

先週の Slido 結果

回答ありがとうございました。

[アンケート] 講義で扱ってほしい内容 (最大5つまで) (来週また聞くかもしれません)

場の量子論の基礎的な内容



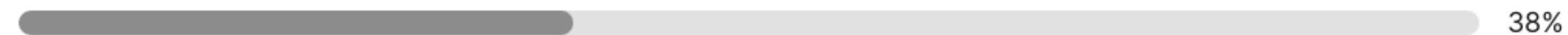
素粒子の標準模型、ヒッグス機構



標準宇宙論入門



インフレーション



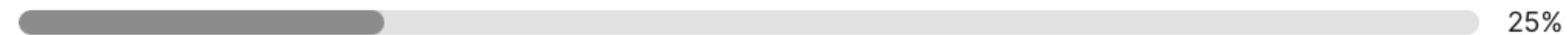
宇宙の物質反物質非対称性



暗黒物質



strong CP 問題とアクシオン



超対称性模型



大統一理論



ニュートリノ質量とその起源



+ Add option

来週から数週間、
上位4つをレビューしつつ
それらを前提とした
「Higgs portal 暗黒物質模型」
について紹介したいと思います。

Multiple choice ▾
15 votes

🗑️ ⚙️ Poll settings

[アンケート] 講義の方針について (来週また聞くかもしれません)

大雑把でいいので、いろんなトピックについて、広く概要を知りたい



カバーできるトピック数が減ってもいいので、ひとつひとつの内容を丁寧に説明してほしい



+ Add option