以下のスライドは、色々な場所での一般講演でお話させて頂いている際に使っているスライドの一例です。(2021年3月現在)

もし、このような内容で一般向け講演を依頼したい、 という方がいらっしゃいましたら、是非ご連絡下さい。

※ 以下の内容を全部お話すると(途中の質問込みで)2時間以上かかりますが、 もっと縮めて1時間くらいにする事も出来ます。

### 浜口幸一

(ホームページ: http://www-hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~hama/)

### 専門家の皆さんへ:

ここ間違ってるよ!とか、こうした方が分かりやすいよ!など、 コメントありましたら是非ご連絡下さい。

# 宇宙誕生最初の1秒の謎と、素粒子の標準模型を超える物理

濱口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 & カブリIPMU)



# もくじ

- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
- (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

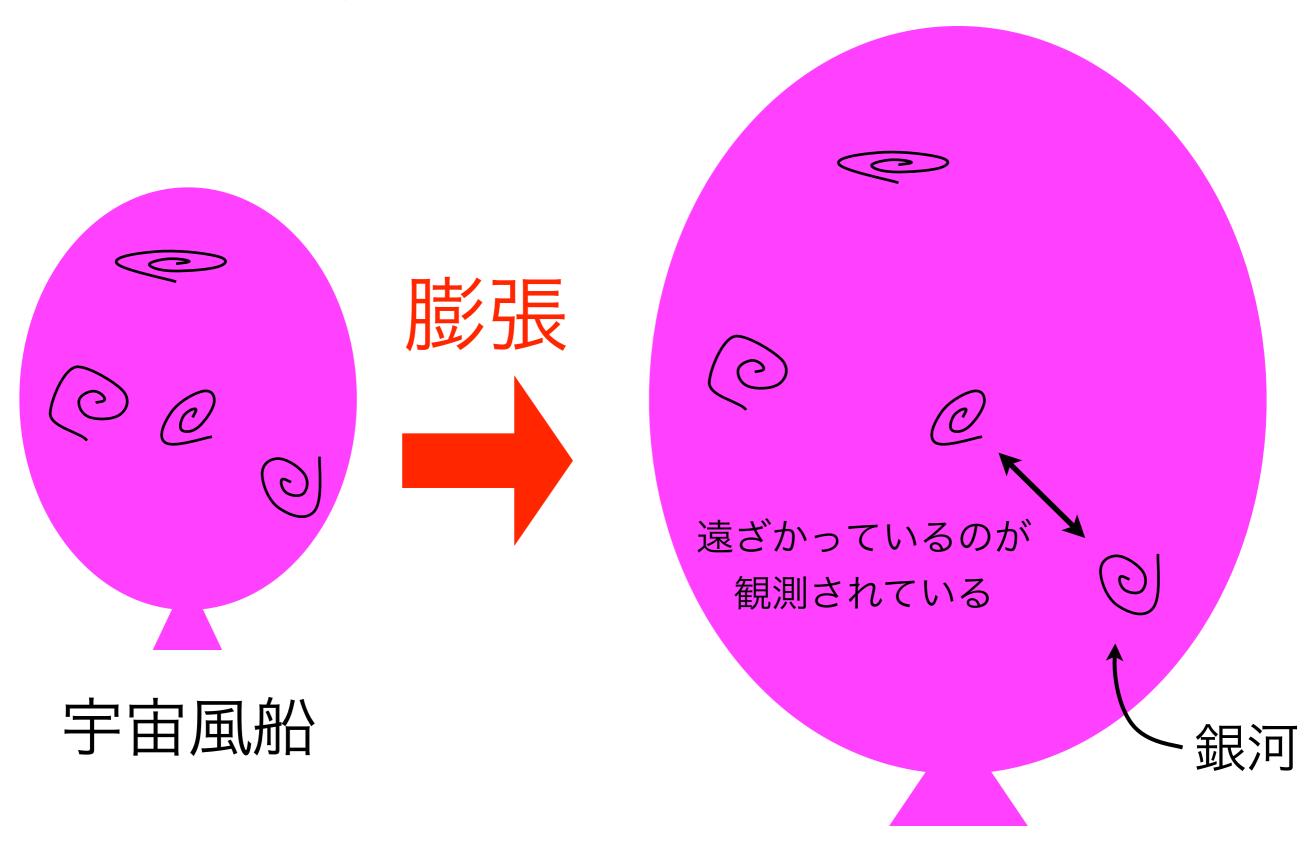
# もくじ

1.宇宙の話

2.素粒子の話

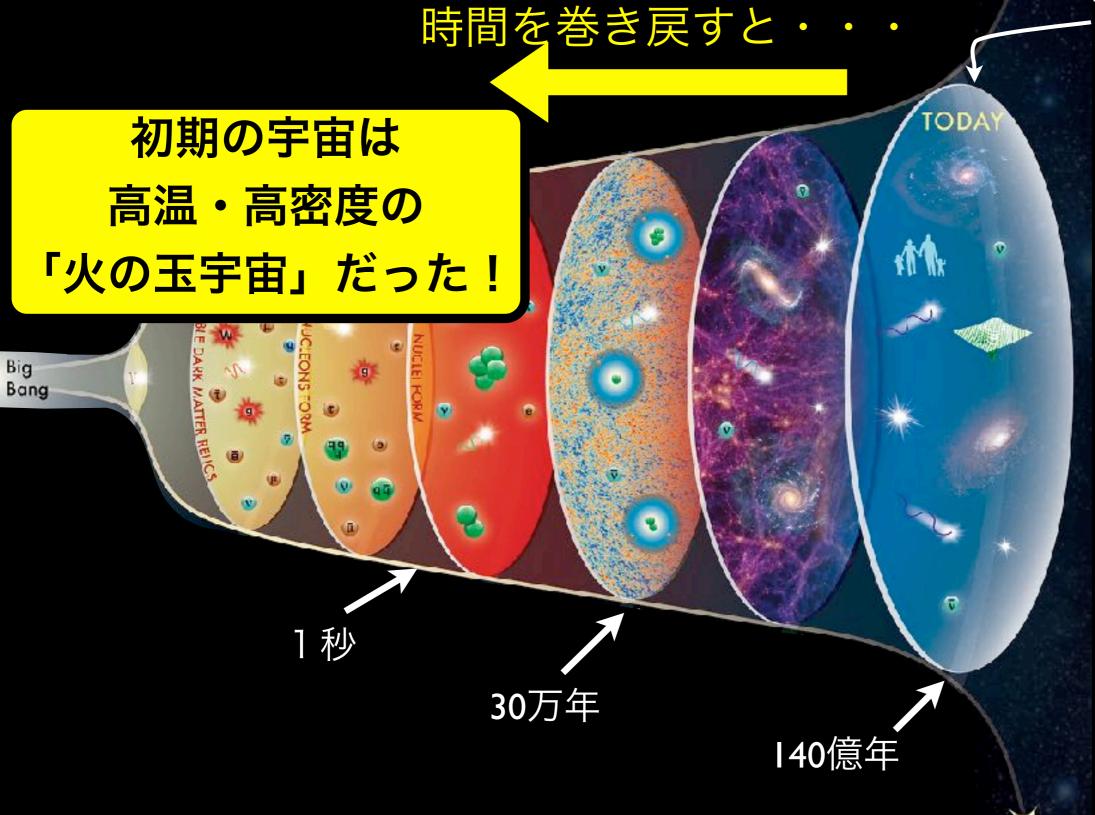
3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理

• (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

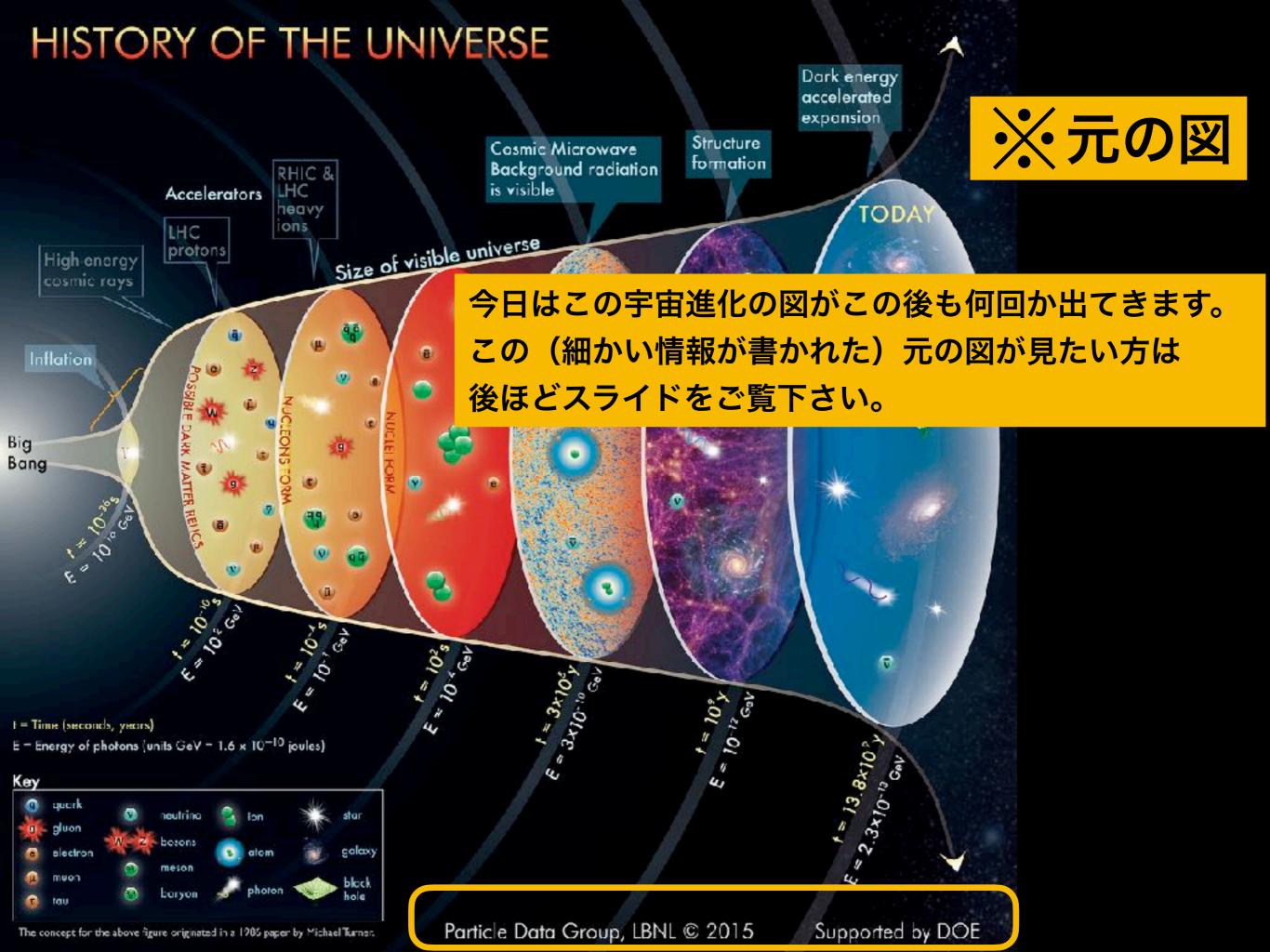


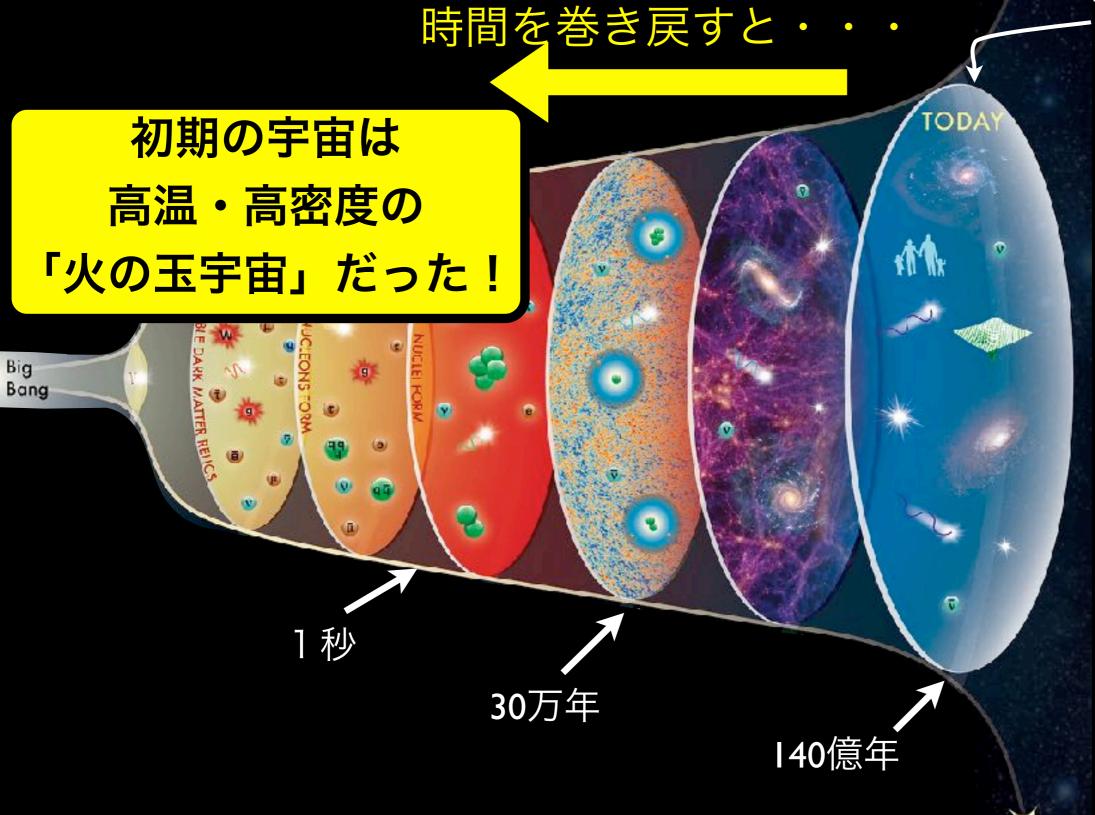


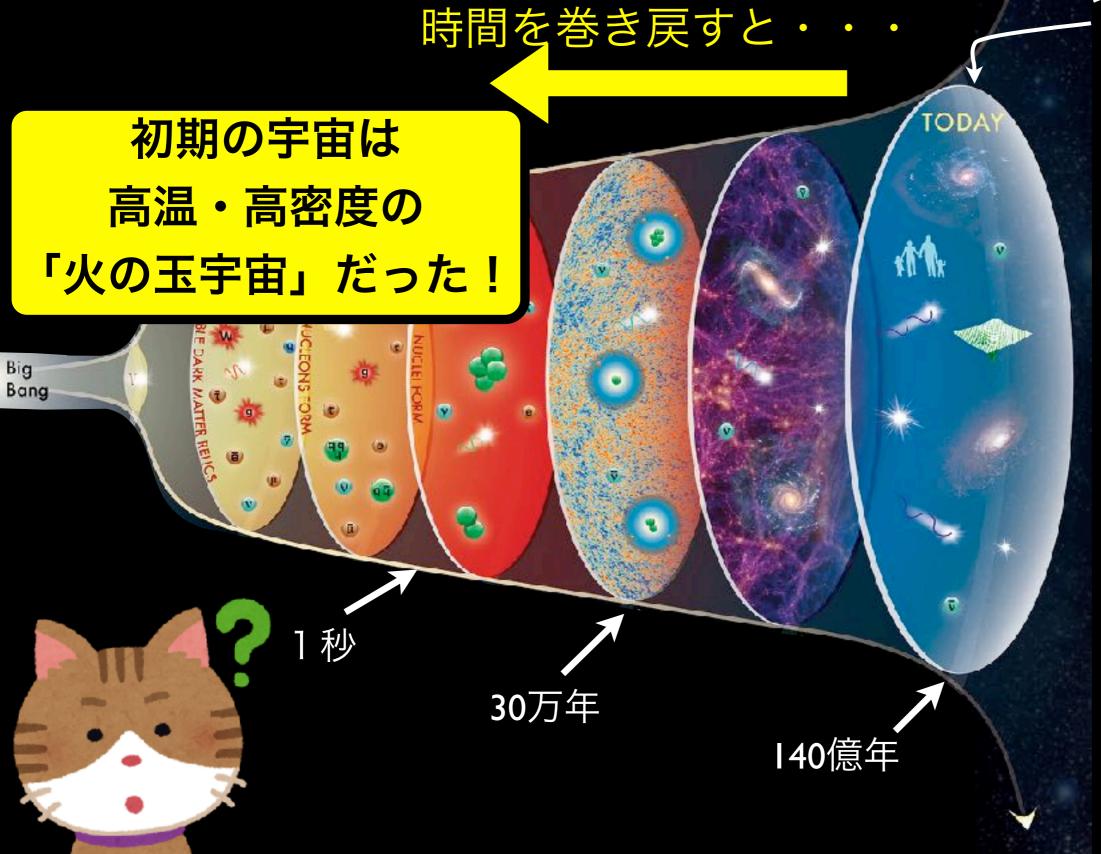
宇宙は膨張している。 時間を巻き戻すと・ TODA Big Bang 1秒 30万年 140億年



#### HISTORY OF THE UNIVERSE Dark energy accelerated ※元の図 expansion Structure Cosmic Microwave formation Background radiation RHIC & is visible Accelerators TODA neavy ons LHC Size of visible universe protons High energy cosmic rays Inflation Big Bang E = 10 - Cay F = 3x10-10 Gov 1 = 3x10°x t = Time (seconds, years) 1 = 13.8×10 " E = Energy of photons (units GeV = 1.6 $\times$ 10<sup>-10</sup> joules) Key querk black Particle Data Group, LBNL © 2015 Supported by DOE The concept for the above figure originated in a 1985 paper by Michael Turner.

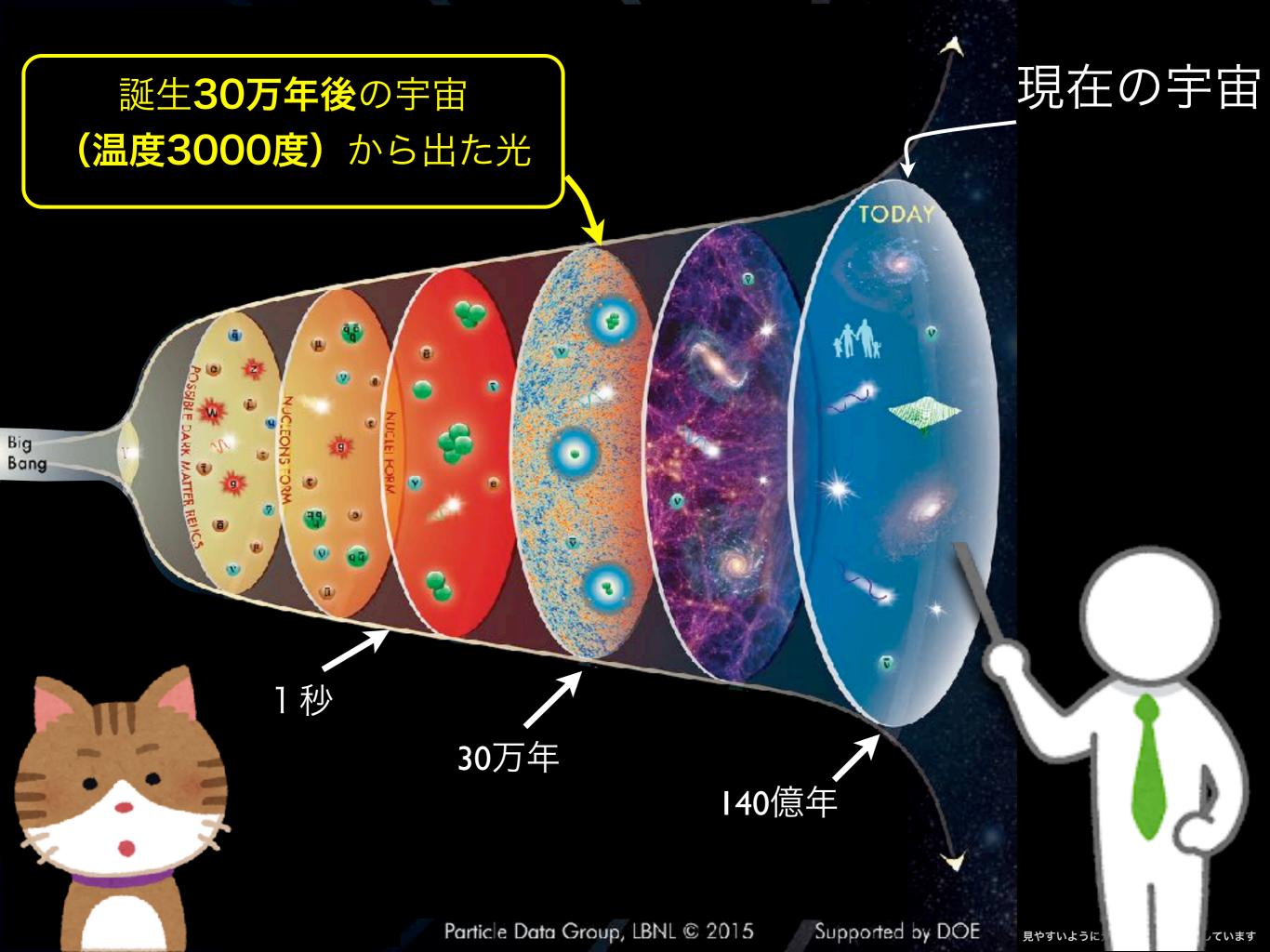


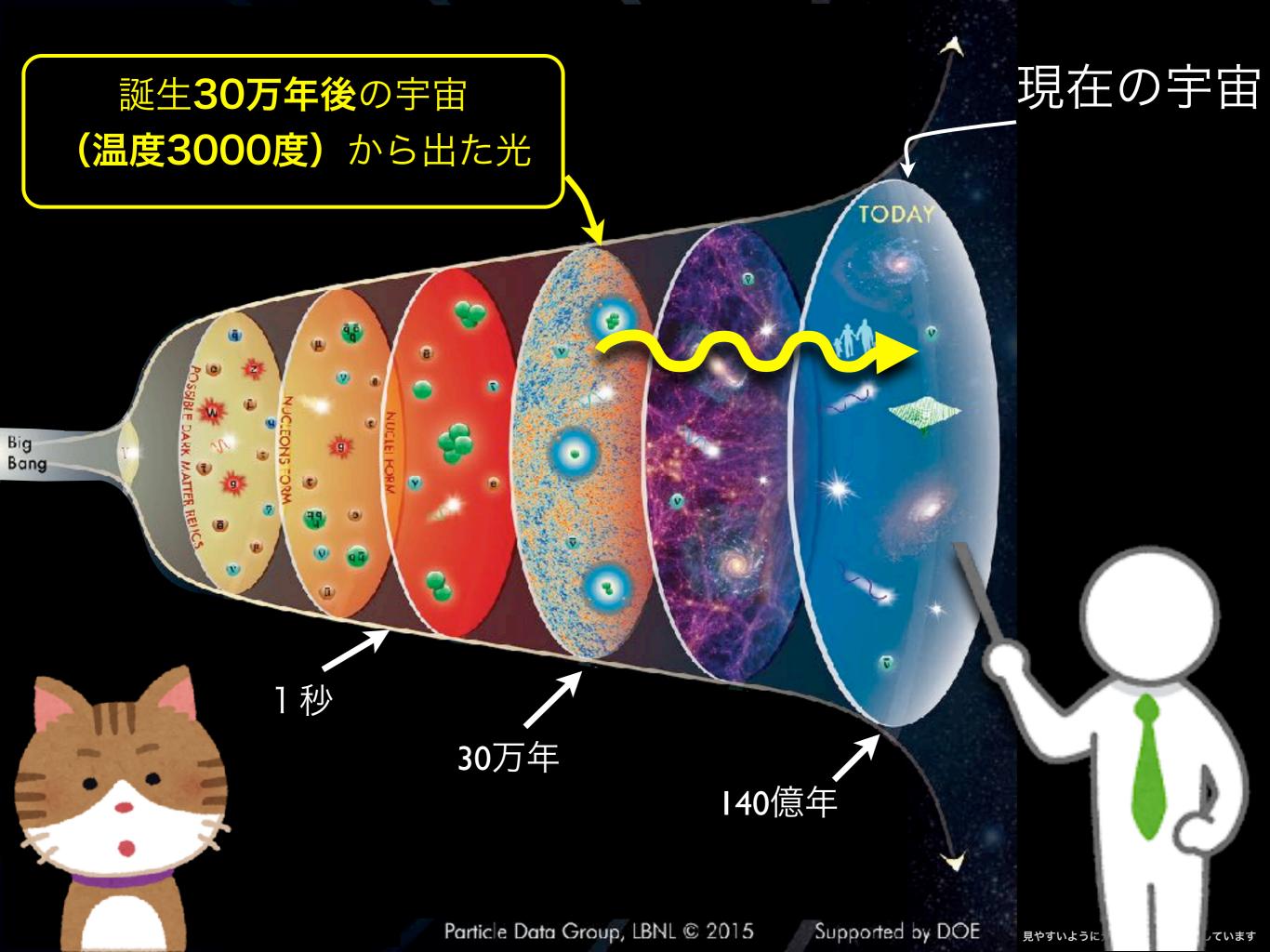


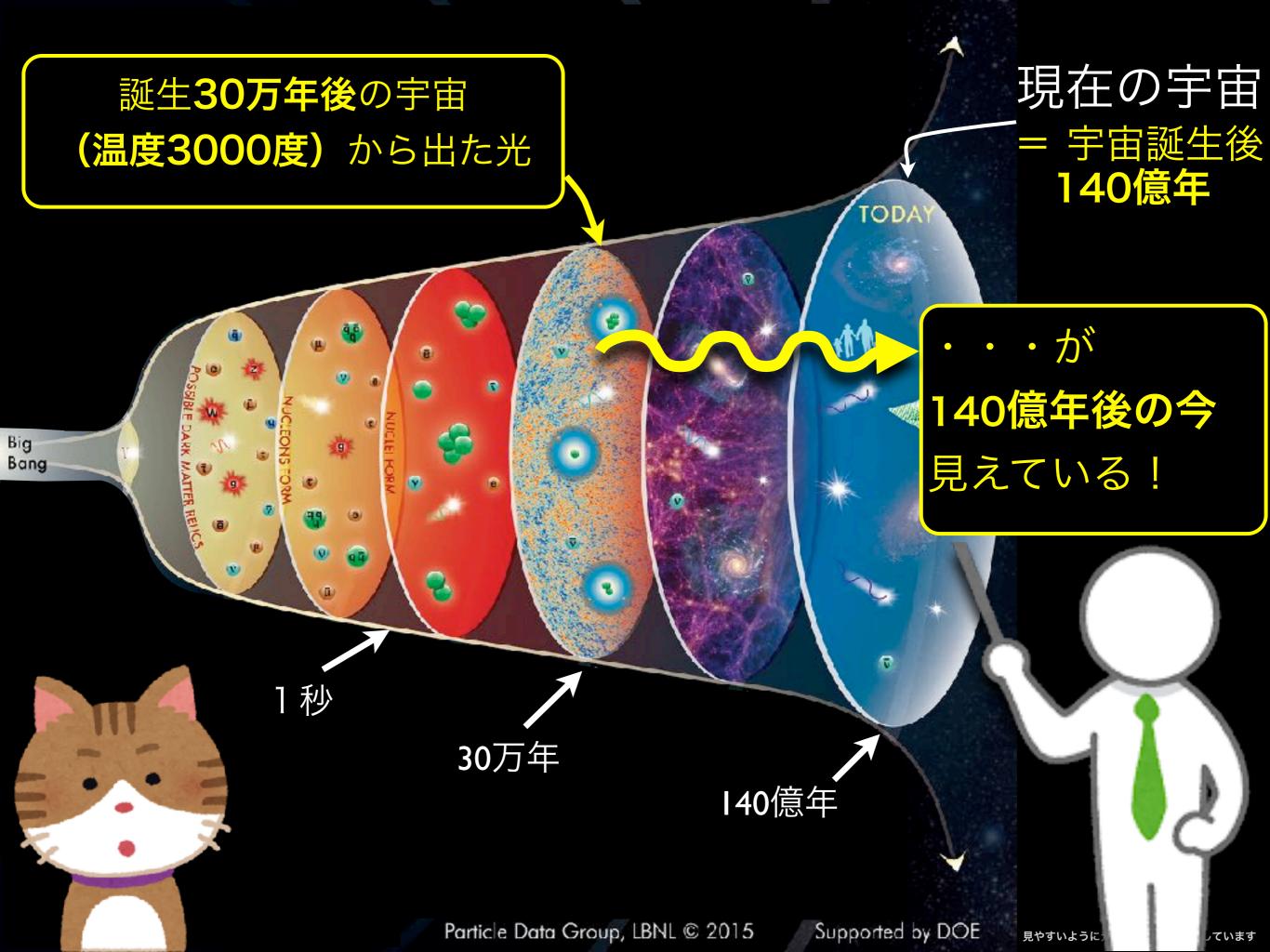


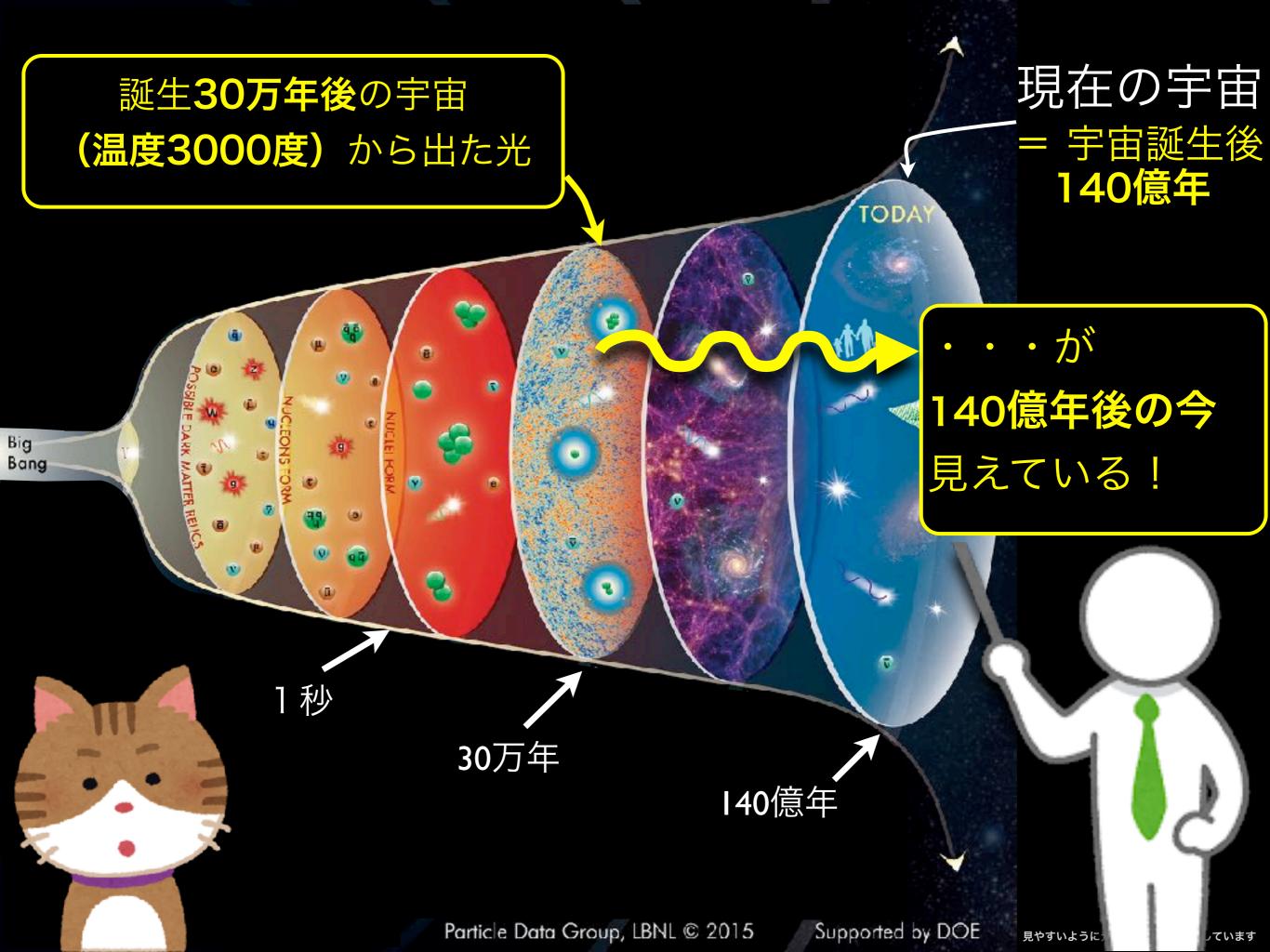








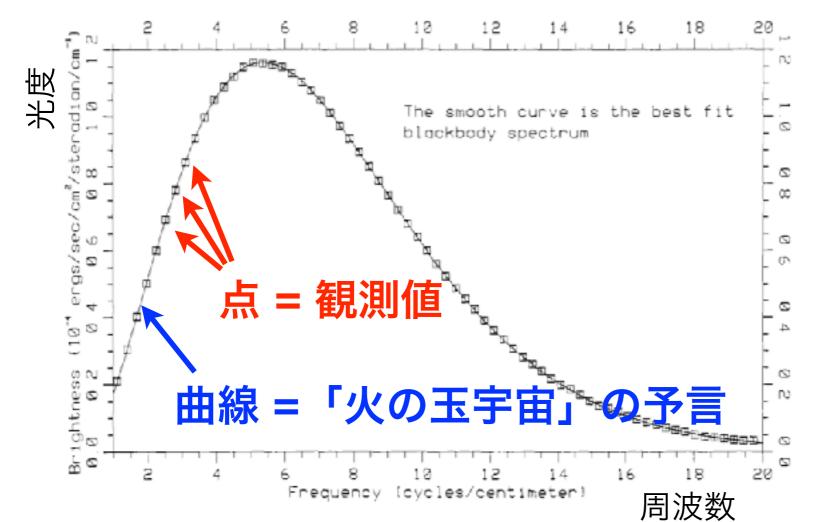




誕生**30万年後**の宇宙 **(温度3000度)** から出た光 現在の宇宙 = 宇宙誕生後

= 宇宙誕生征 **140億年** 

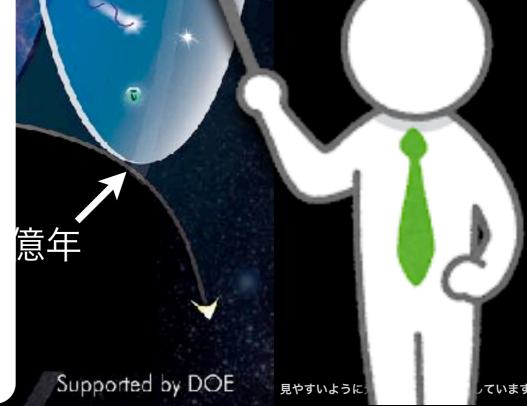
### 宇宙背景放射

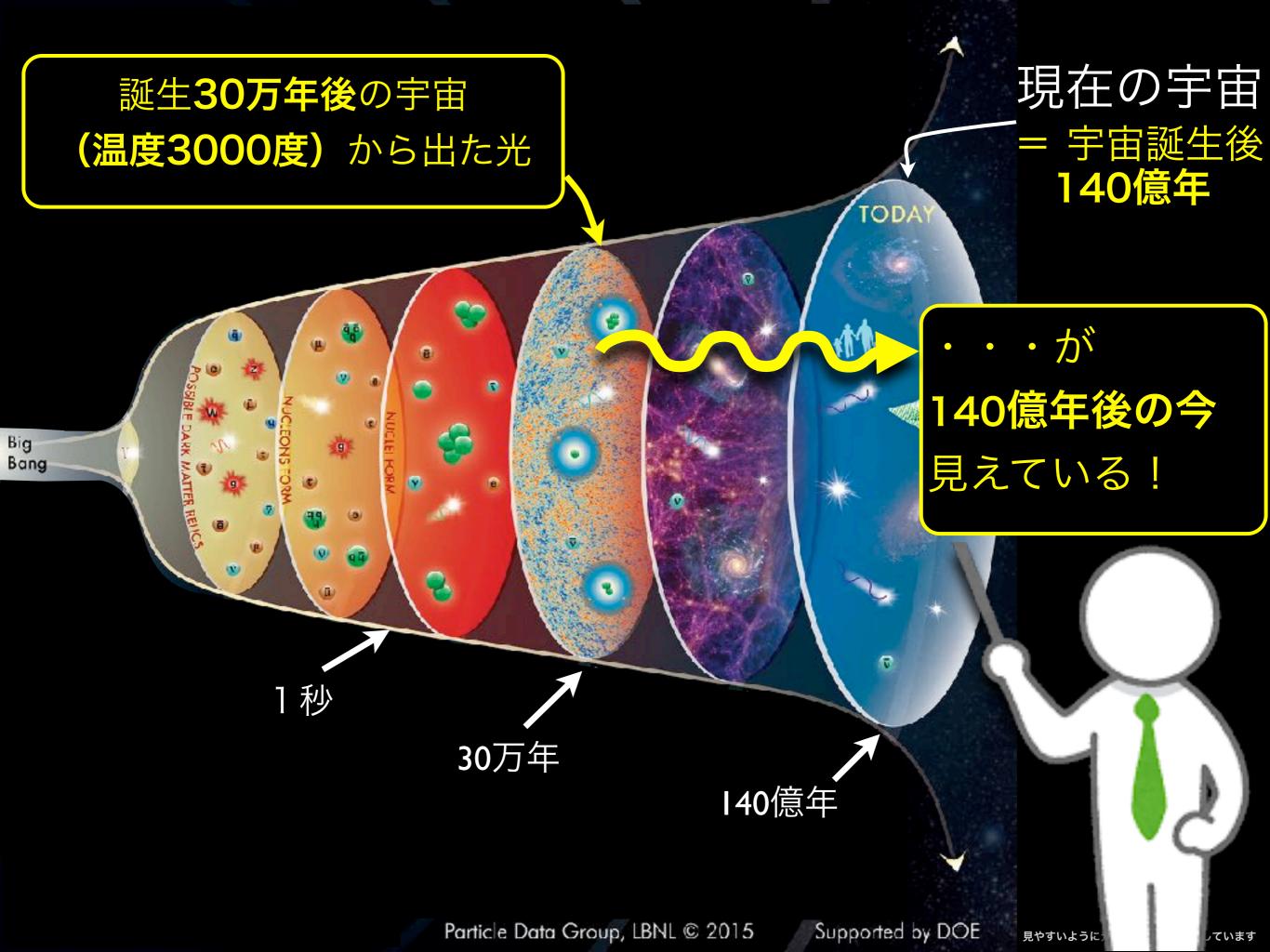


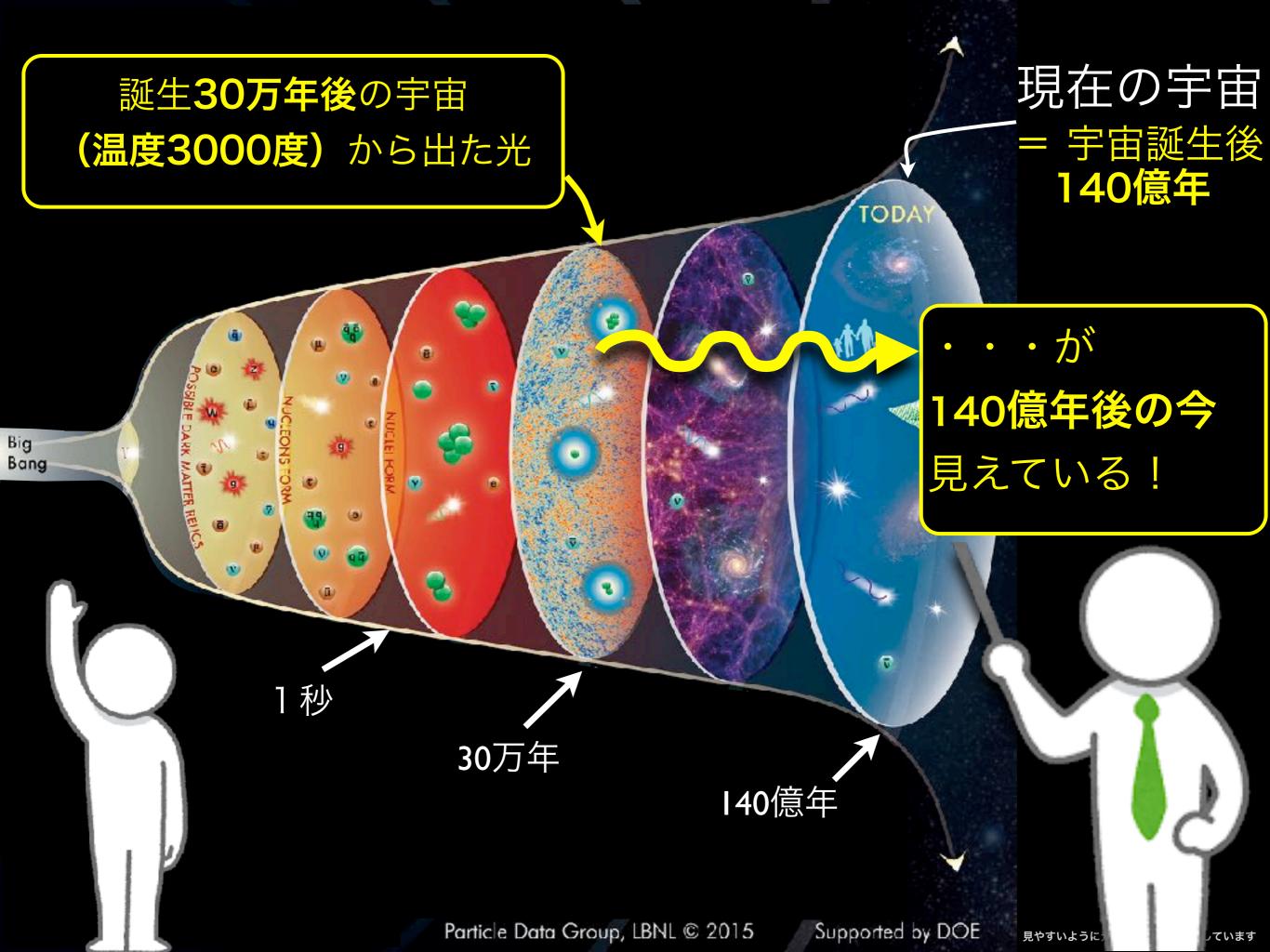
J.C.Mather et al. Astrophys. J. 354: L37-L40, 1990

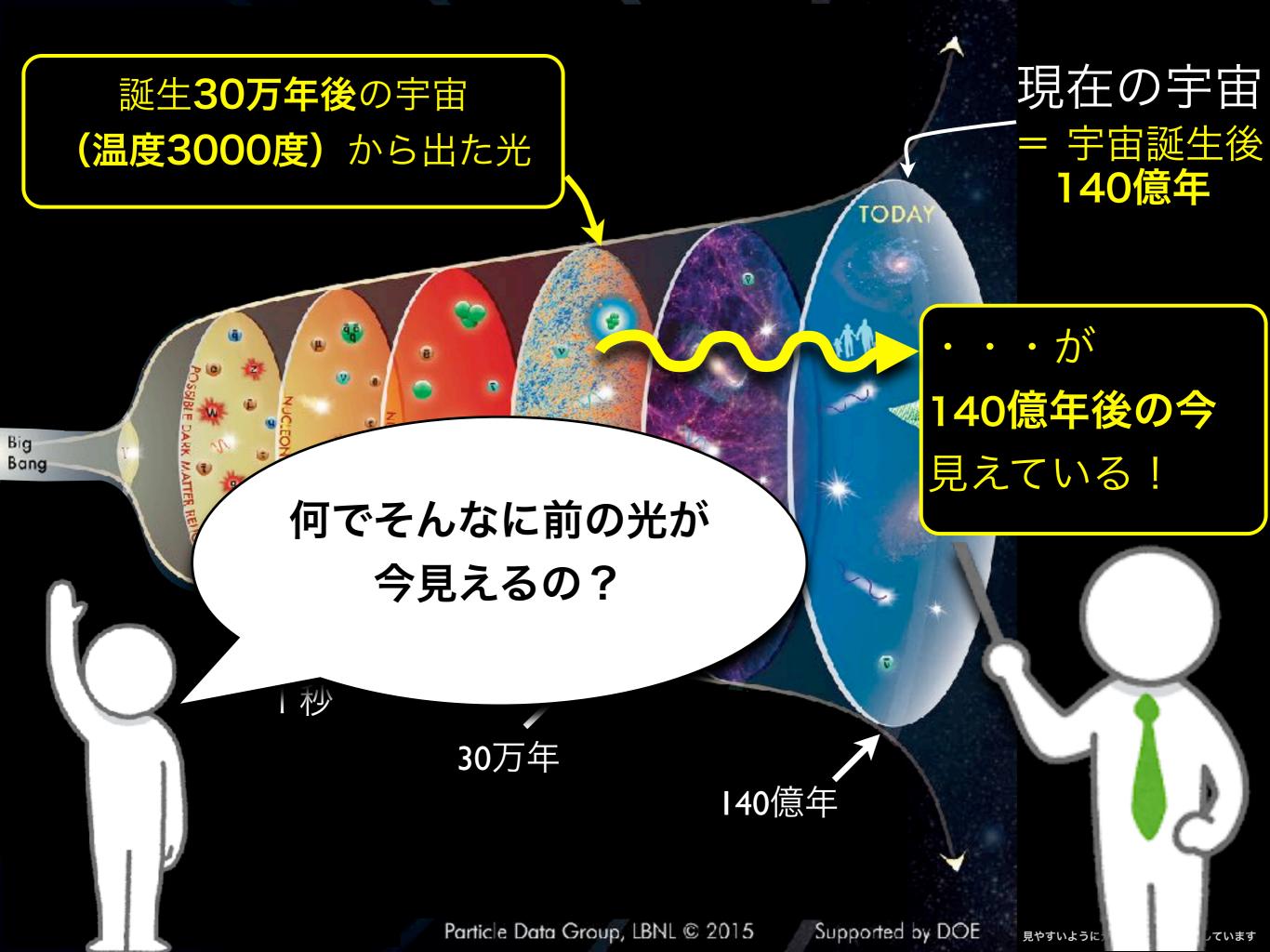
・・・が 140**億年後の今** 見えている!

TODA









光にも速さが あるので・・・

何でそんなに前の光が 今見えるの?

後ほど地球が 出来る場所

光の出発地点



光にも速さが あるので・・・

後ほど地球が

出来る場所

光の出発地点



後ほど地球が

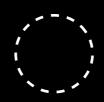
出来る場所

光の出発地点









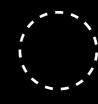


後ほど地球が 出来る場所

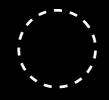
光の出発地点







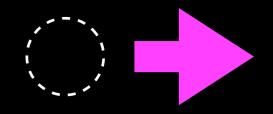






90億年後

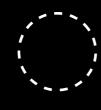
地球誕生



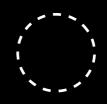
後ほど地球が出来る場所

光の出発地点





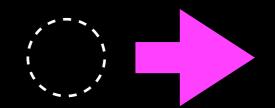






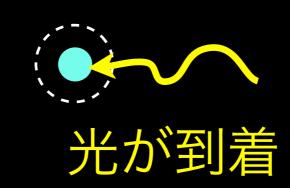
90億年後

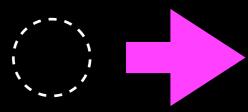
地球誕生

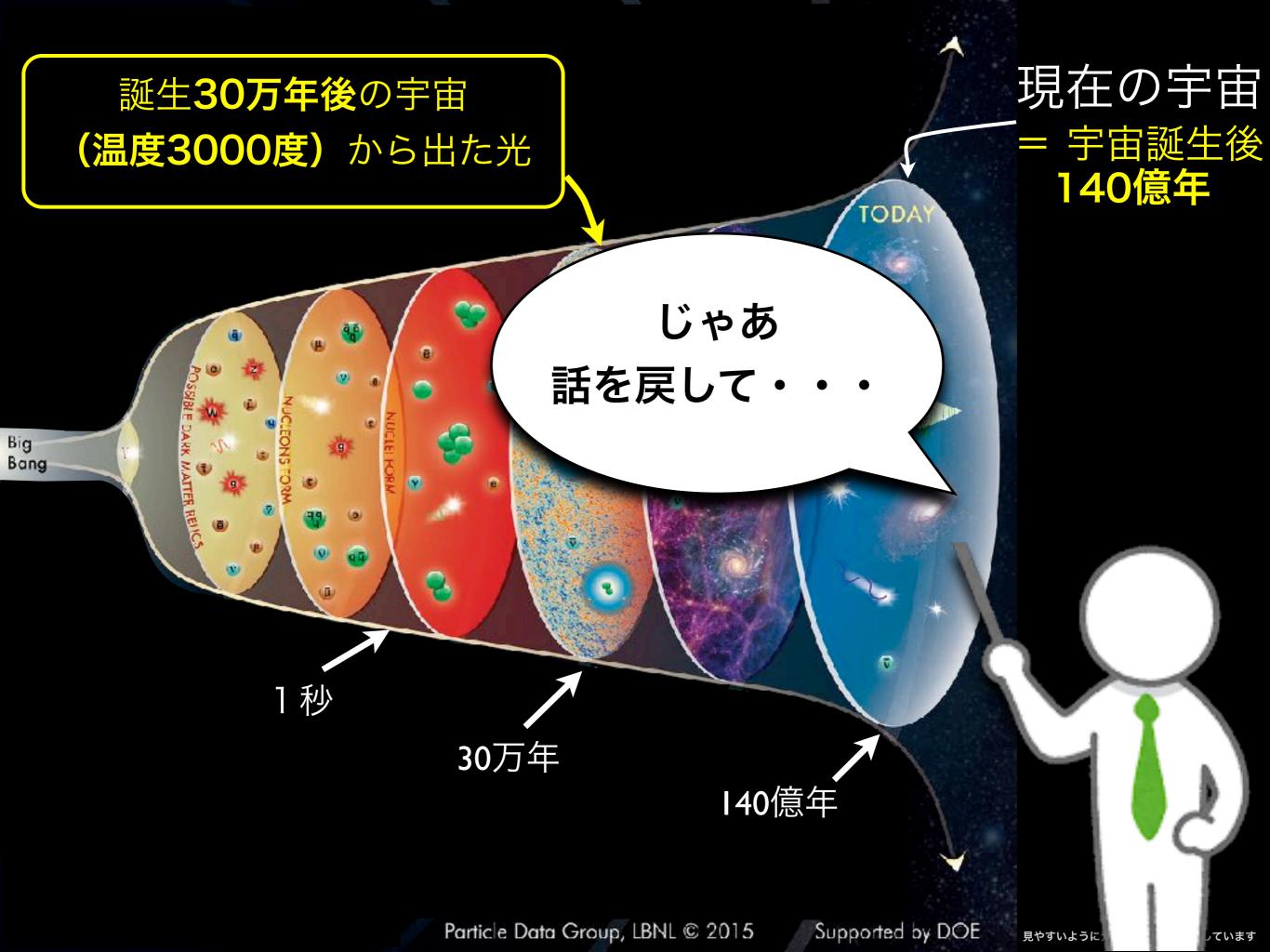


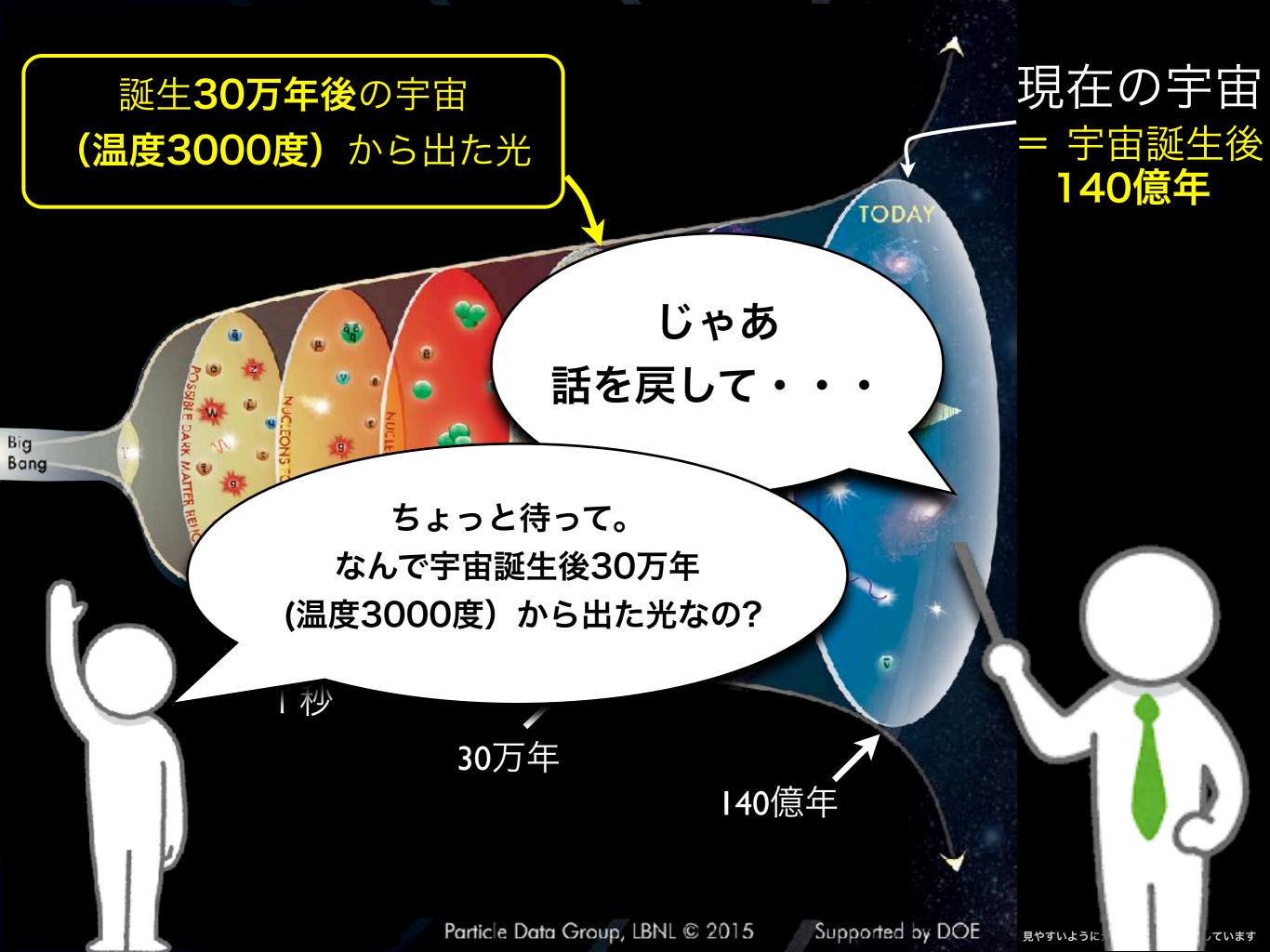
140億年後

= 現在

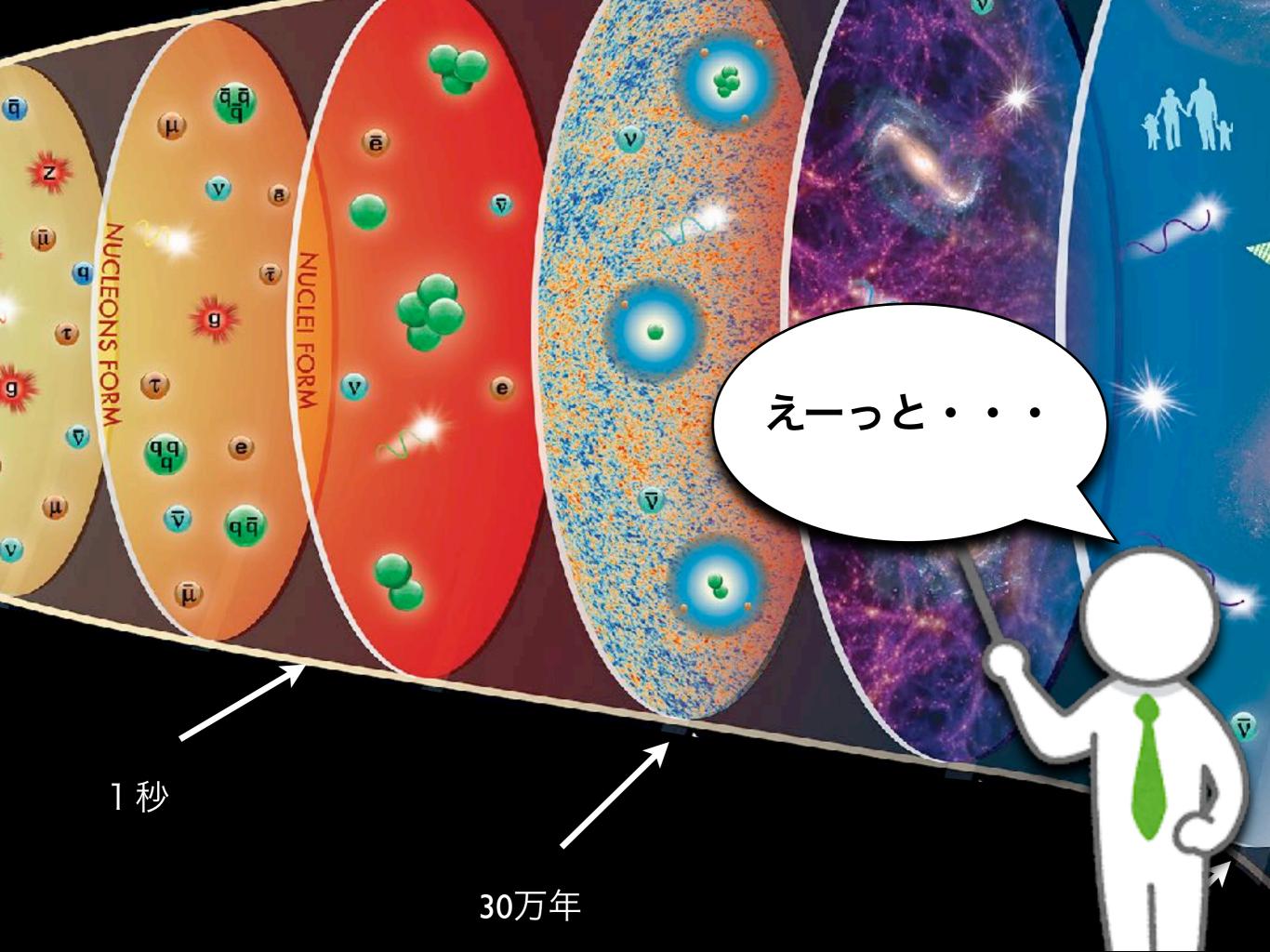


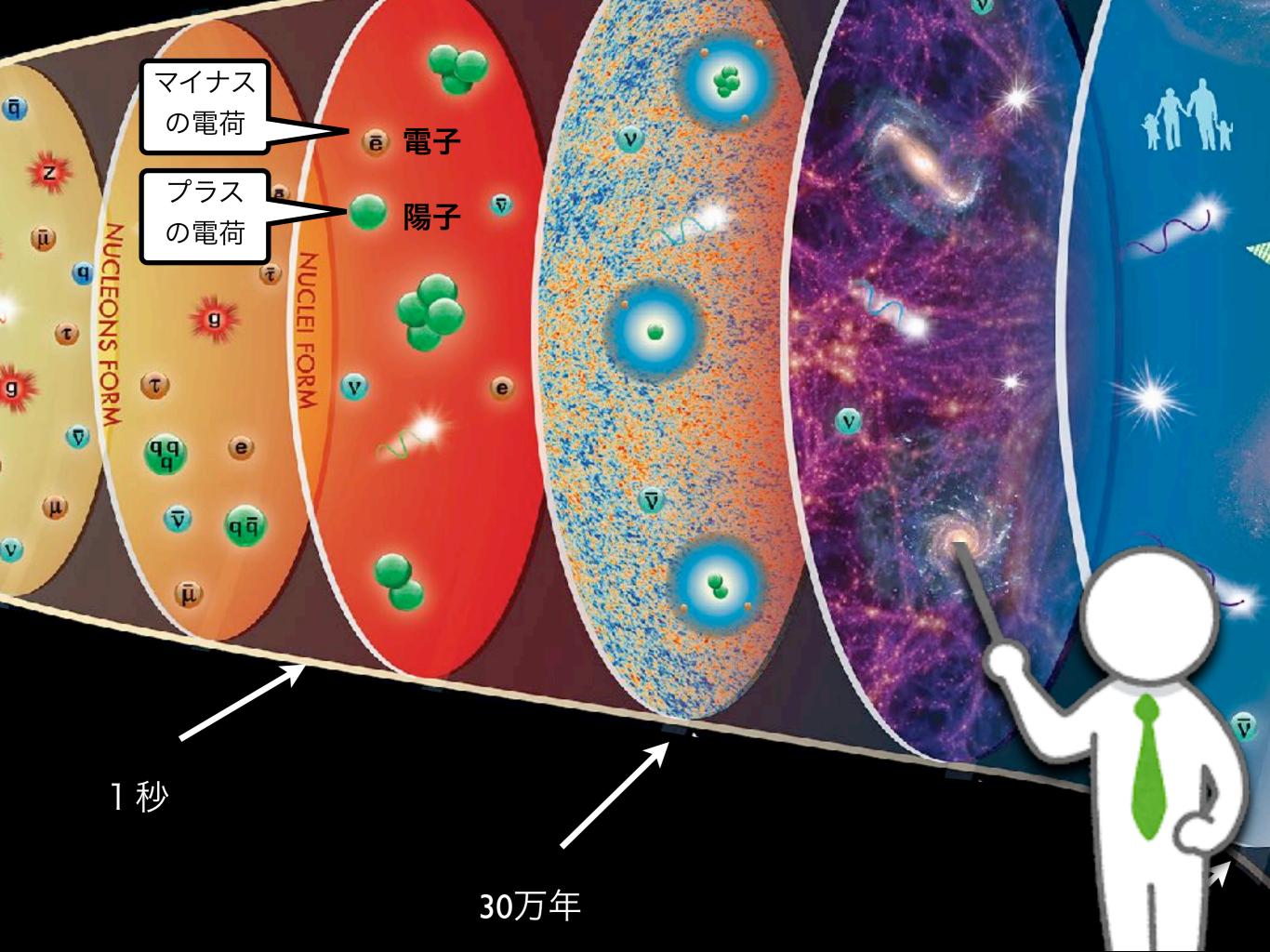


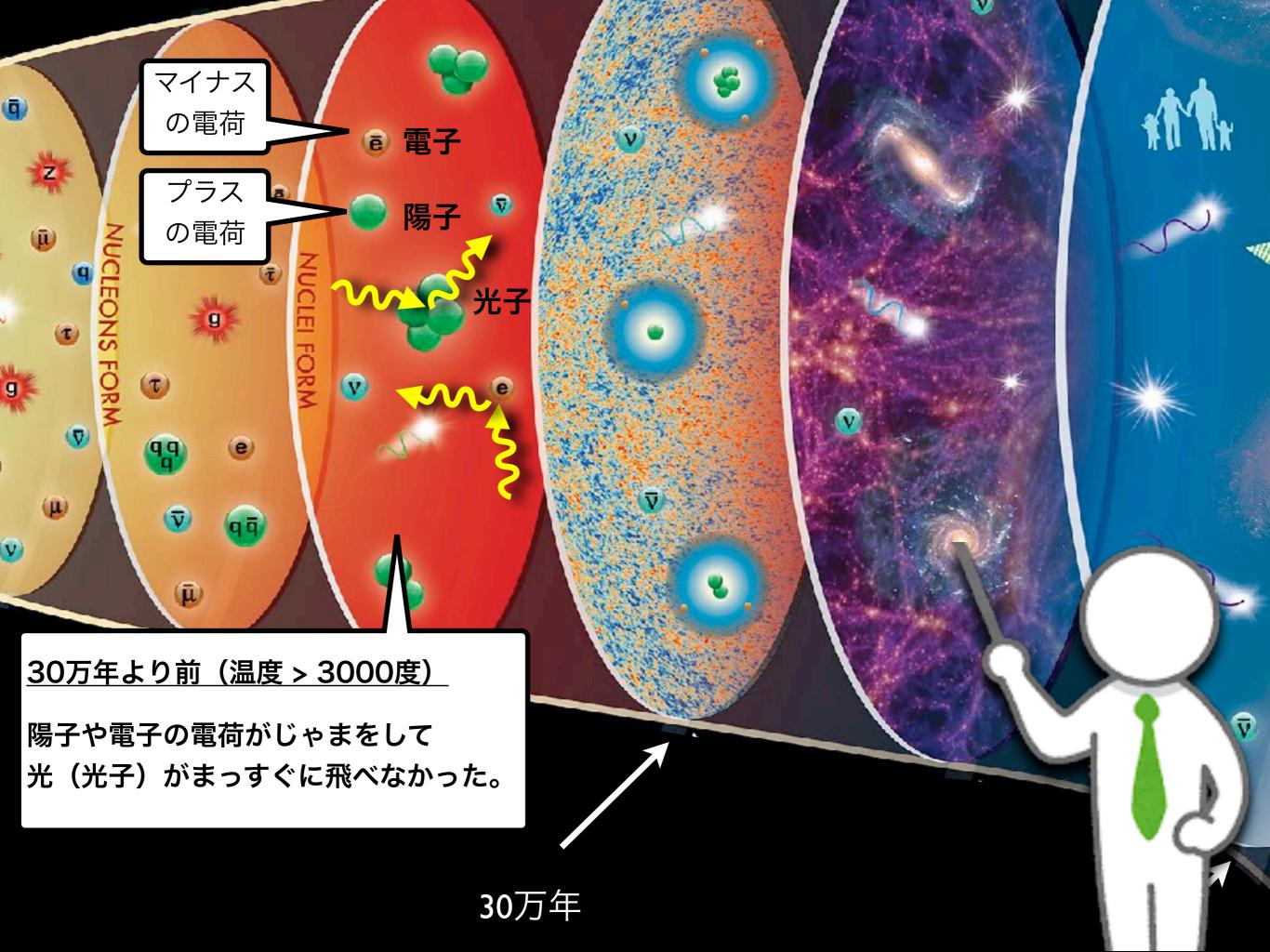


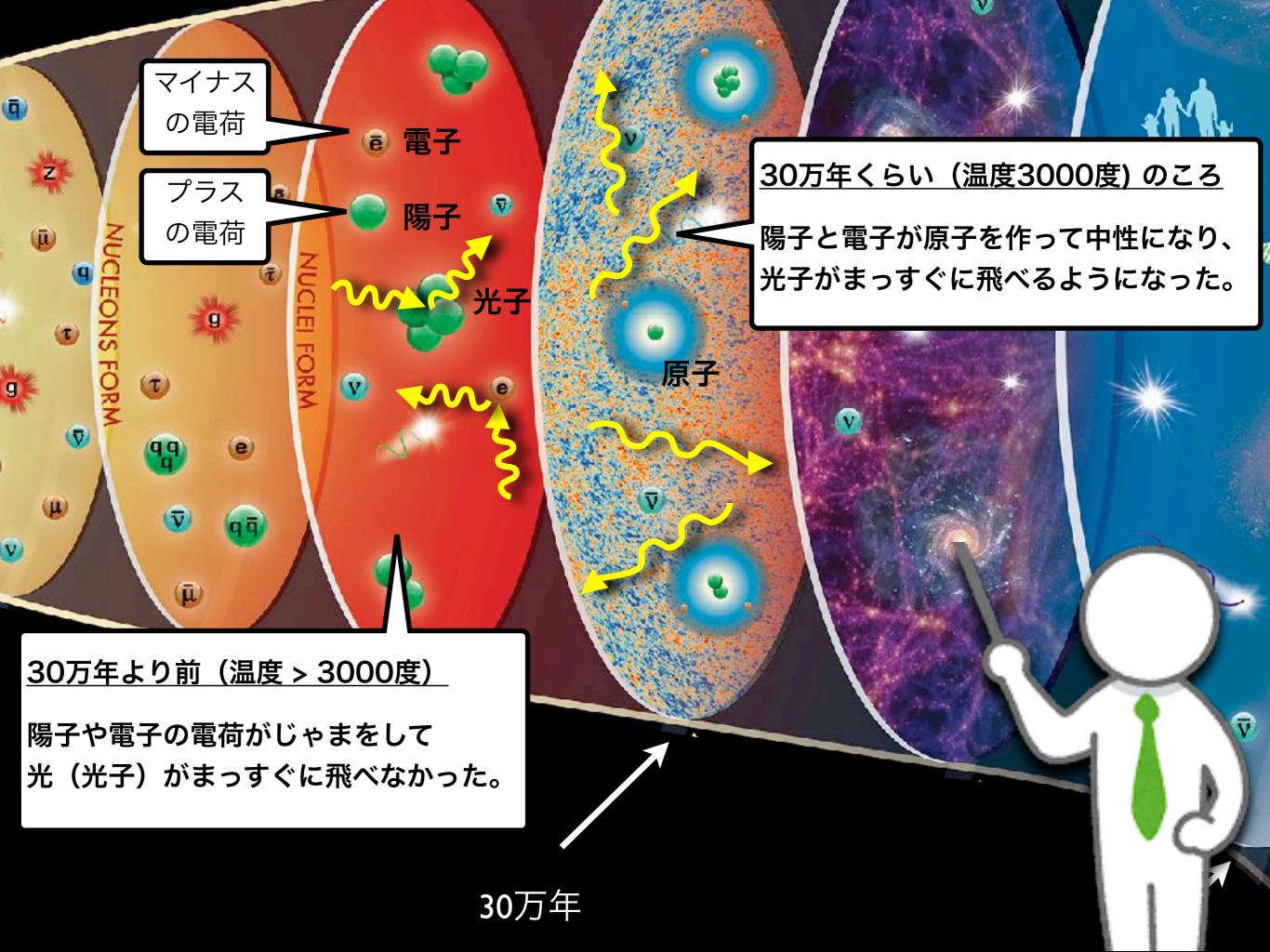


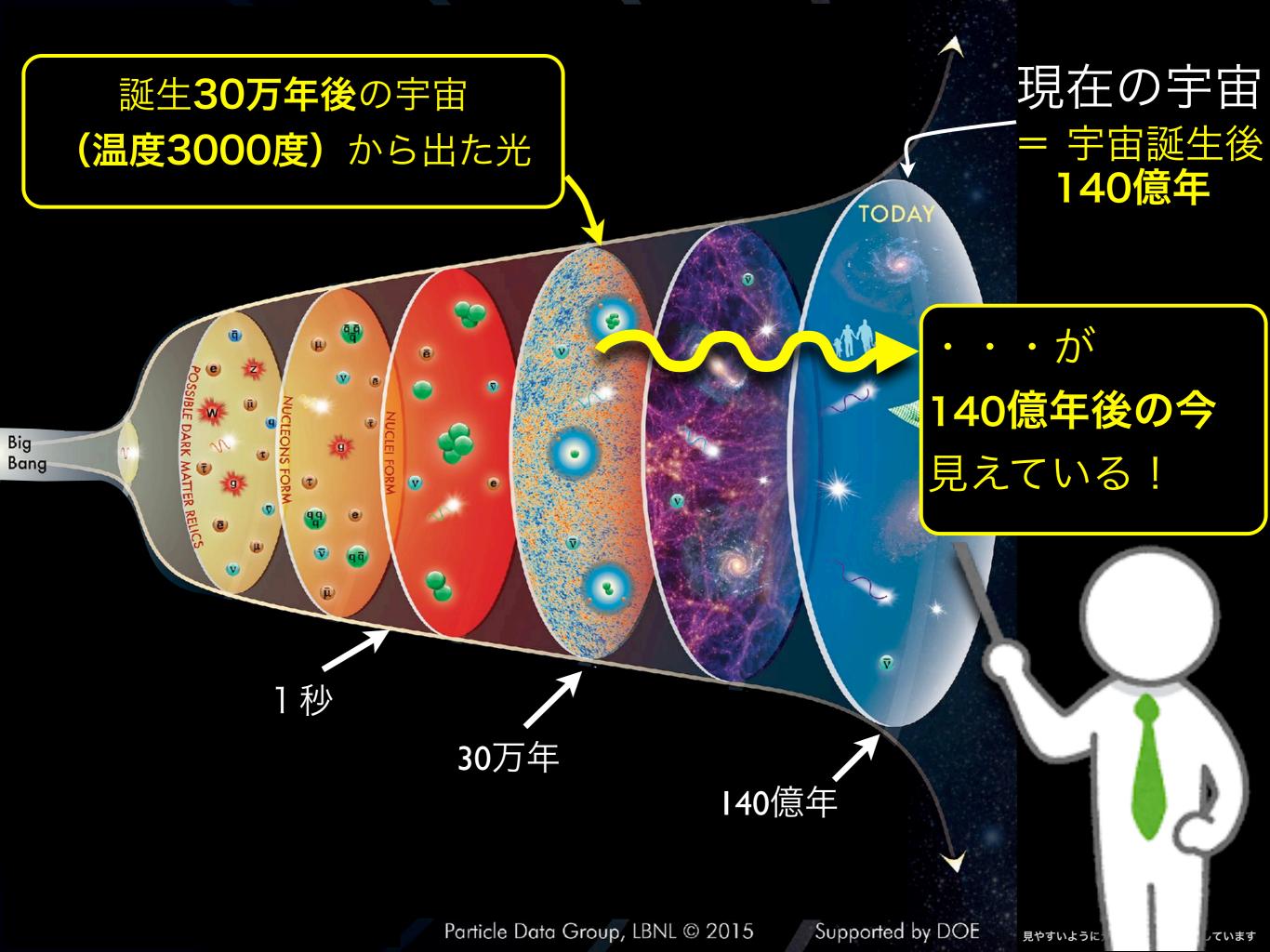


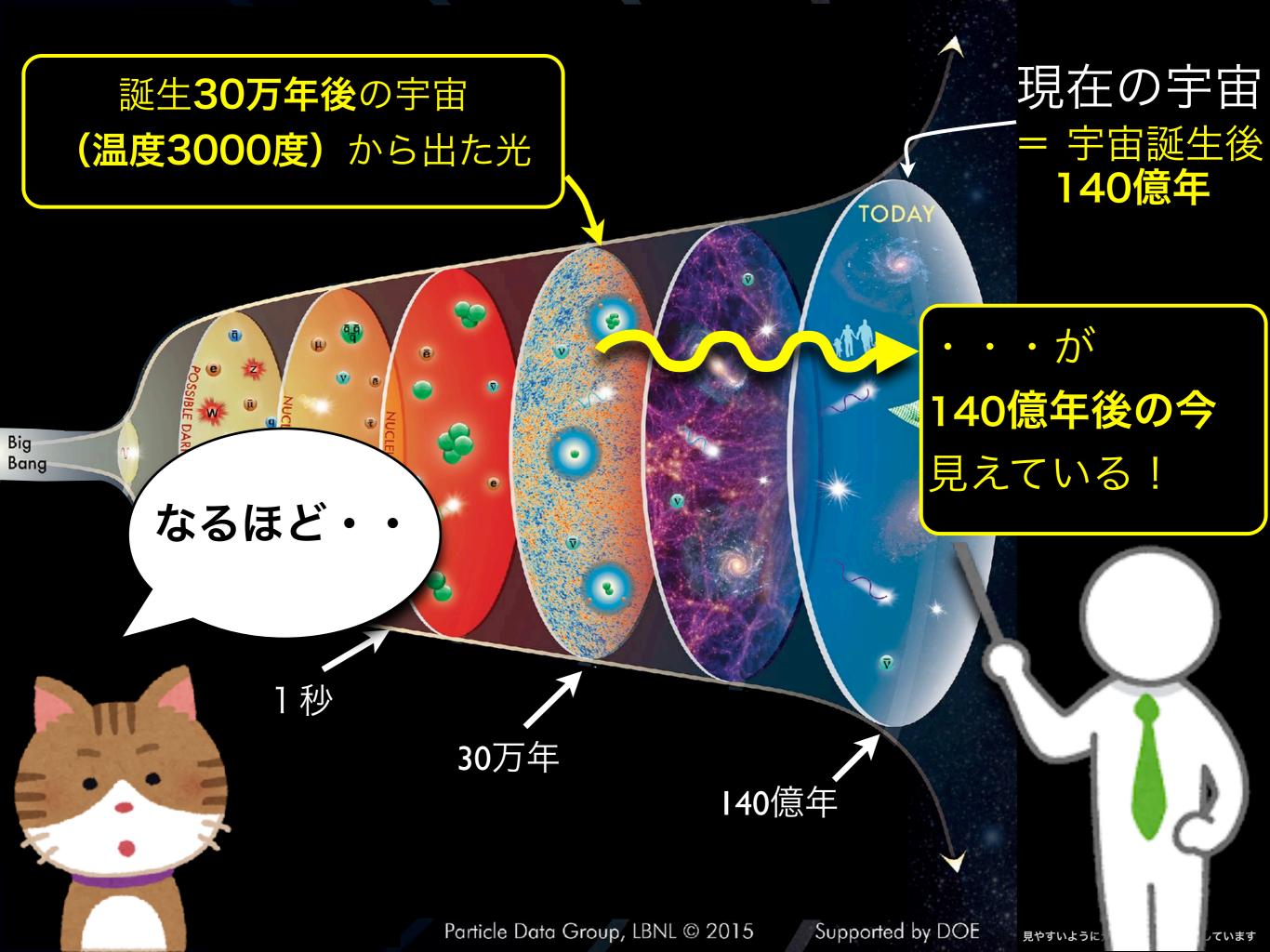




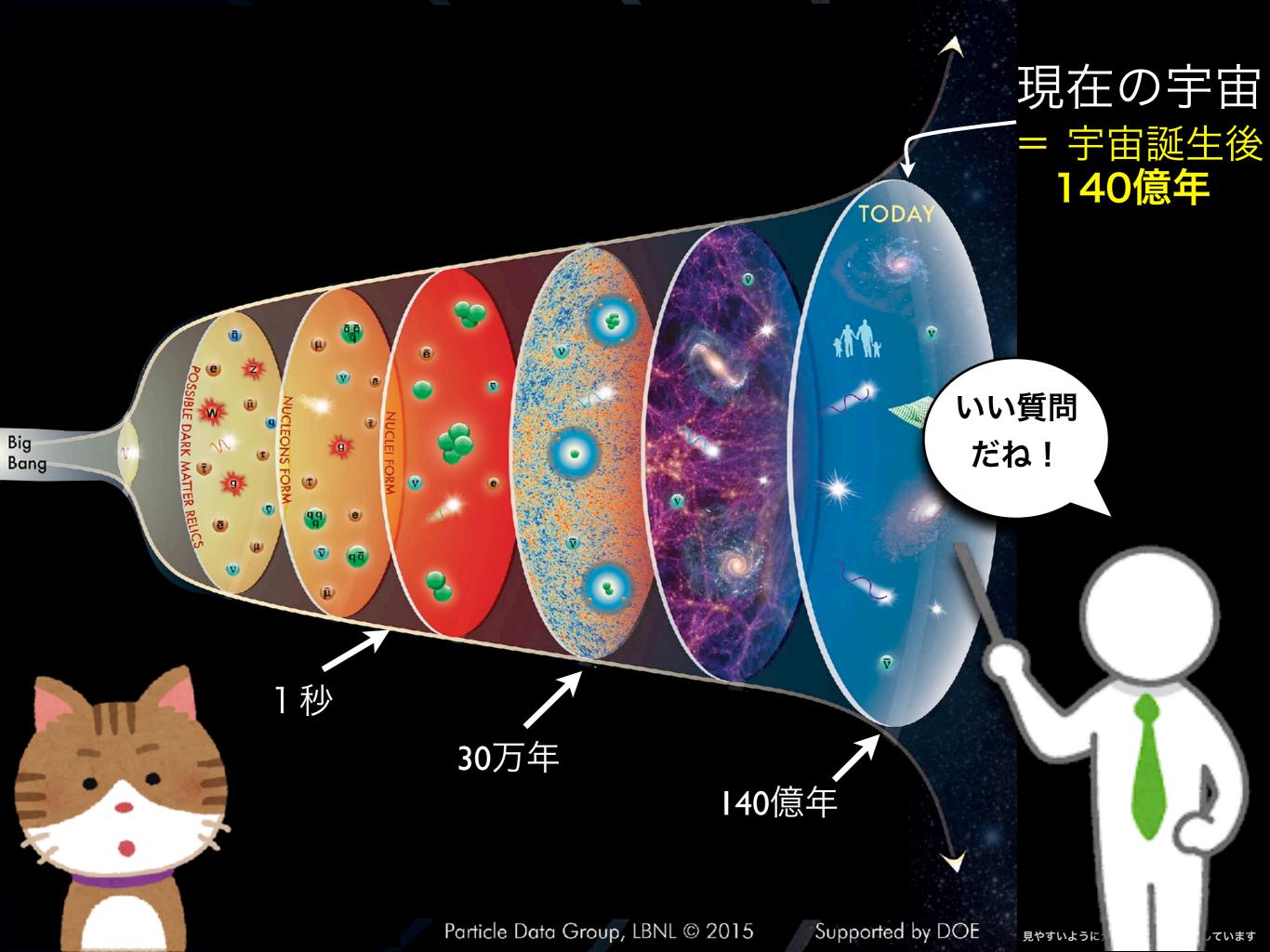


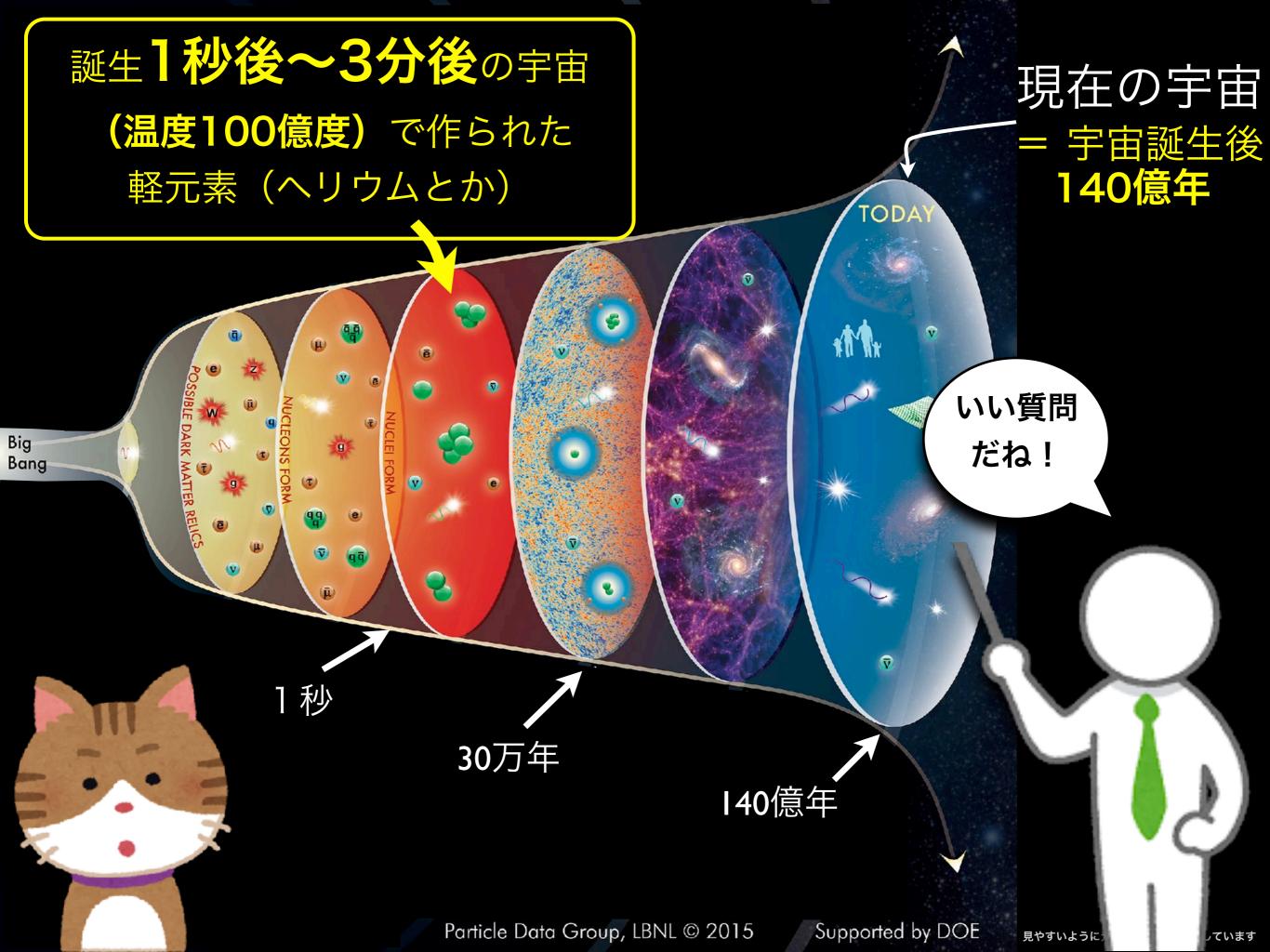


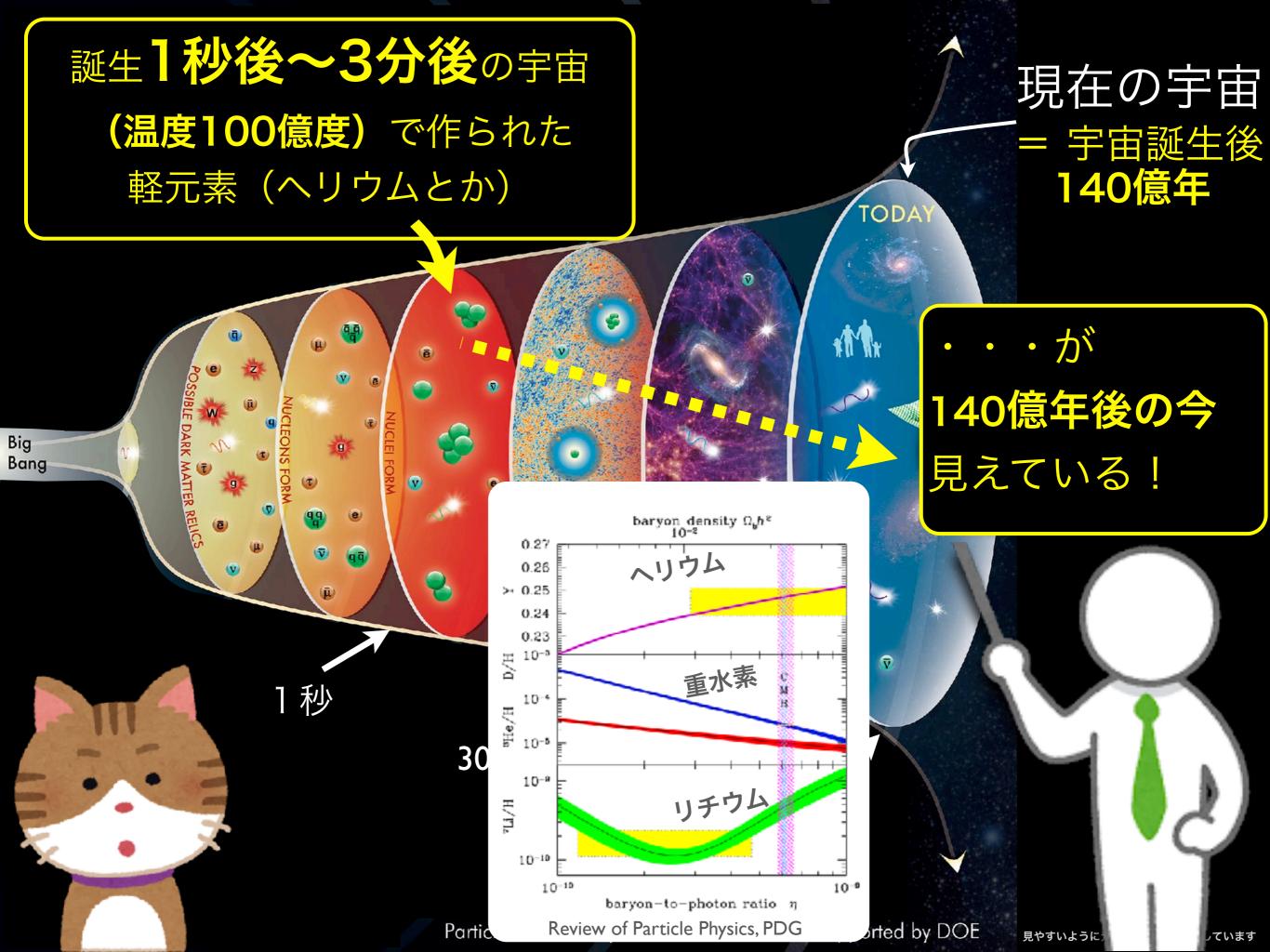


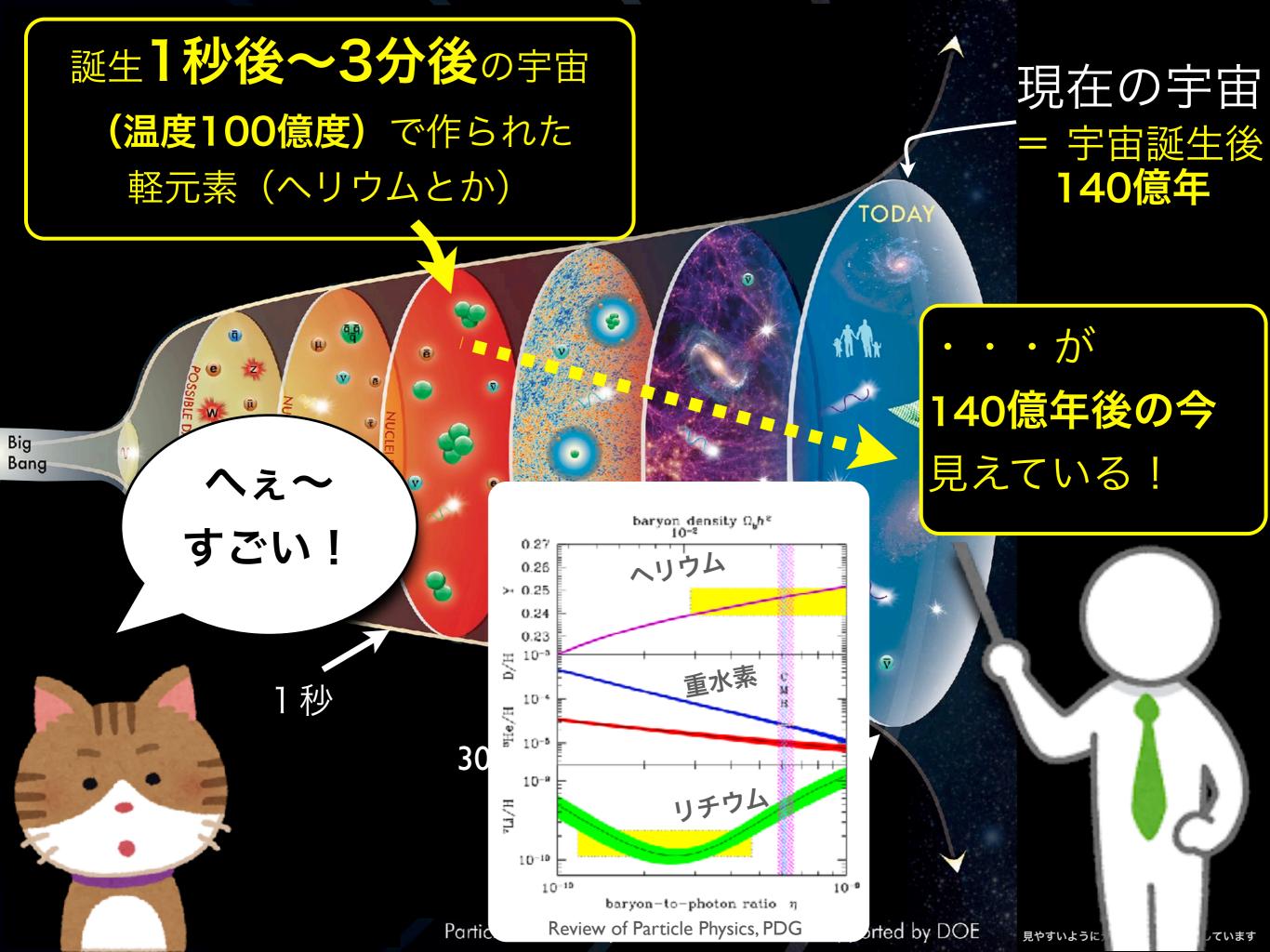


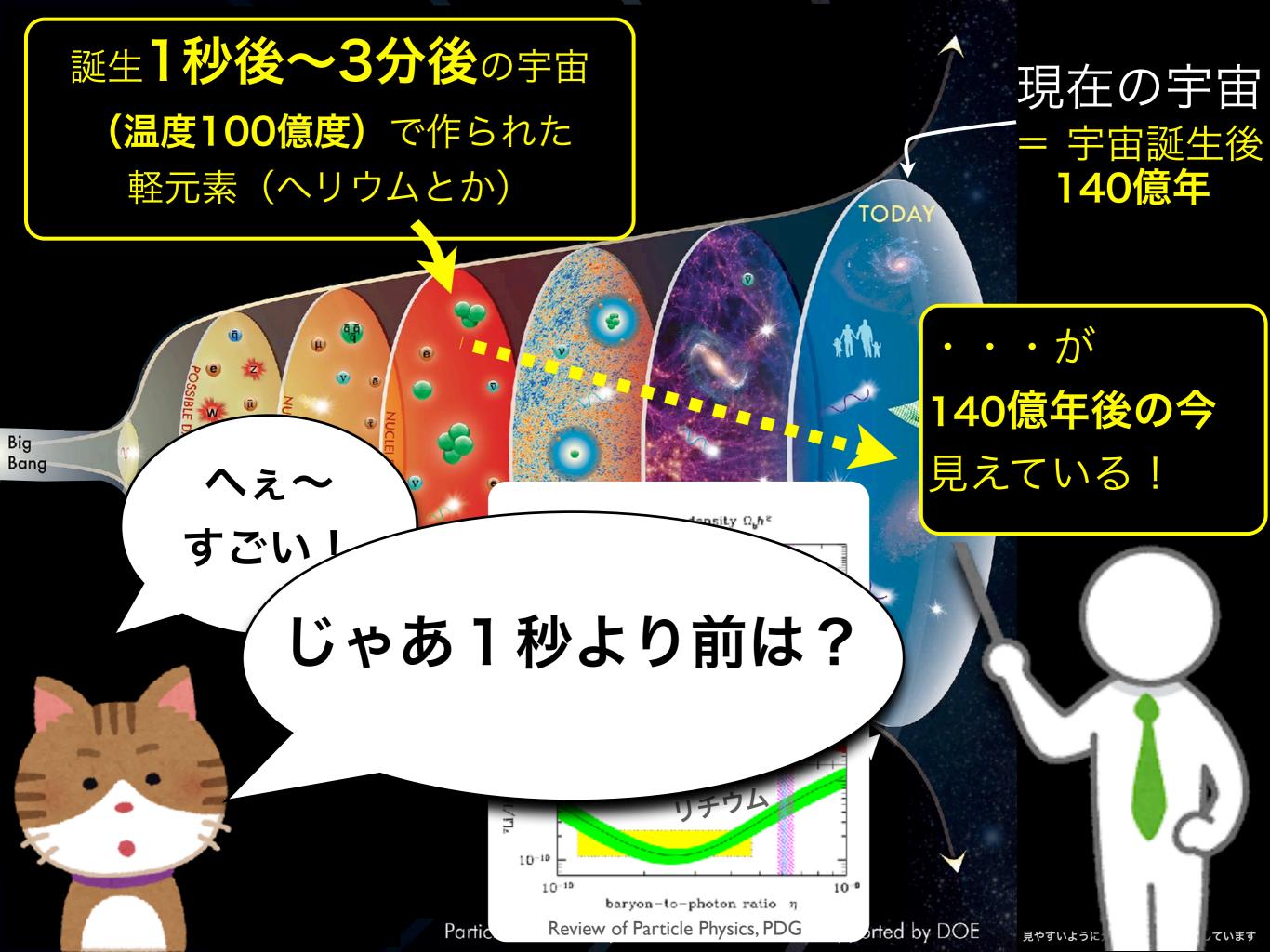








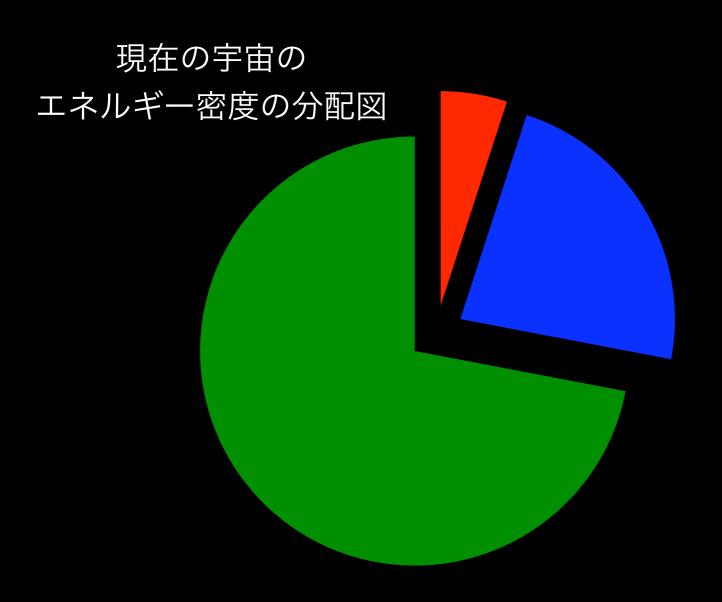




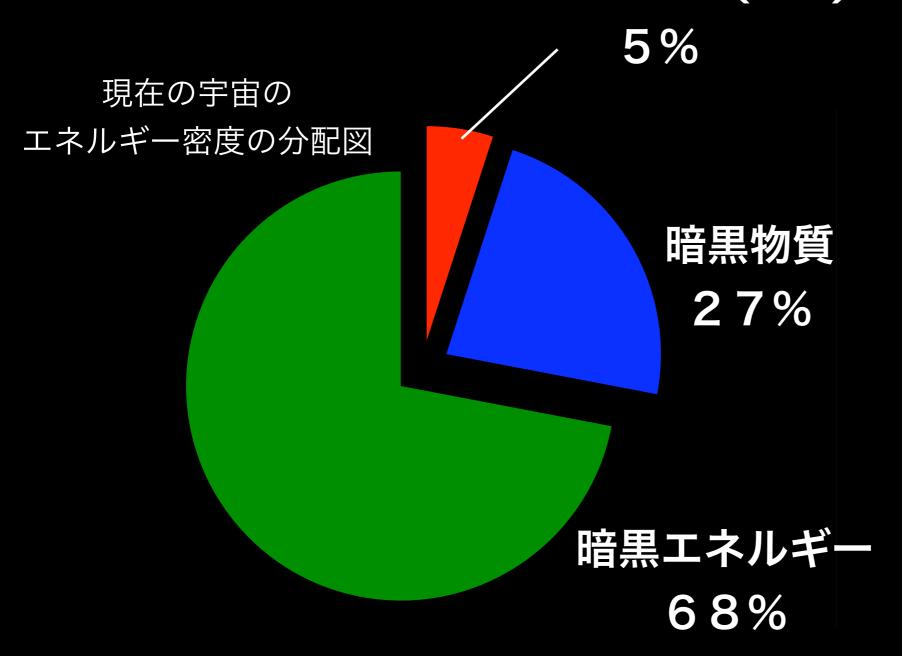
# 宇宙誕生後はじめの1秒に何が起きたか直接的な証拠はない。

# 宇宙誕生後はじめの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・・。



知ってる物質 (原子)



知ってる物質 (原子)

5%

消えた
反物質の謎

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

> 暗黒物質 27%

暗黒エネルギー 68%

知ってる物質 (原子)

5%

消えた
反物質の謎

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

> 暗黒物質 27%

暗黒物質 の正体は?

暗黒エネルギー 68%

知ってる物質 (原子)

5%

消えた
反物質の謎

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

> 暗黒物質 27%

暗黒物質の正体は?

暗黒エネルギー 68% 暗黒エネルギー の正体は?

知ってる物質 (原子)

5%

消えた
反物質の謎

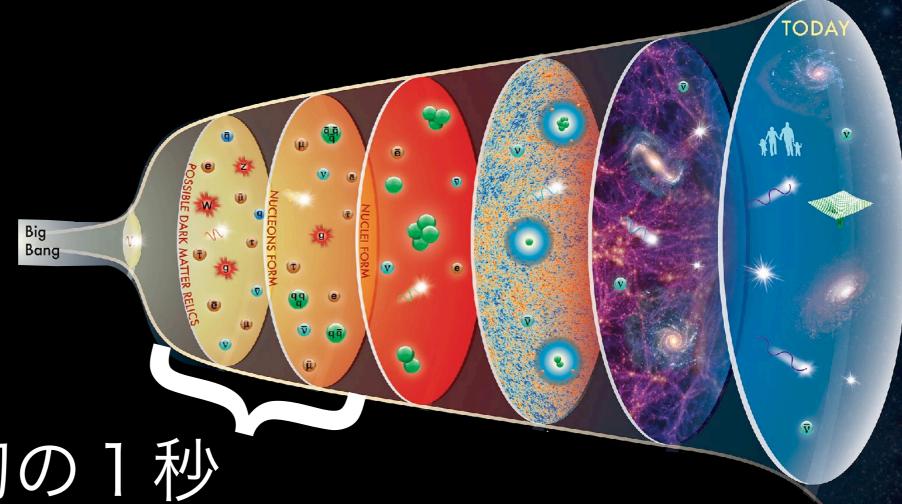
現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

暗黒物質 **27%**  暗黒物質の正体は?

暗黒エネルギー 68% 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<mark>素粒子</mark>になって 激しくぶつかりあっている世界。

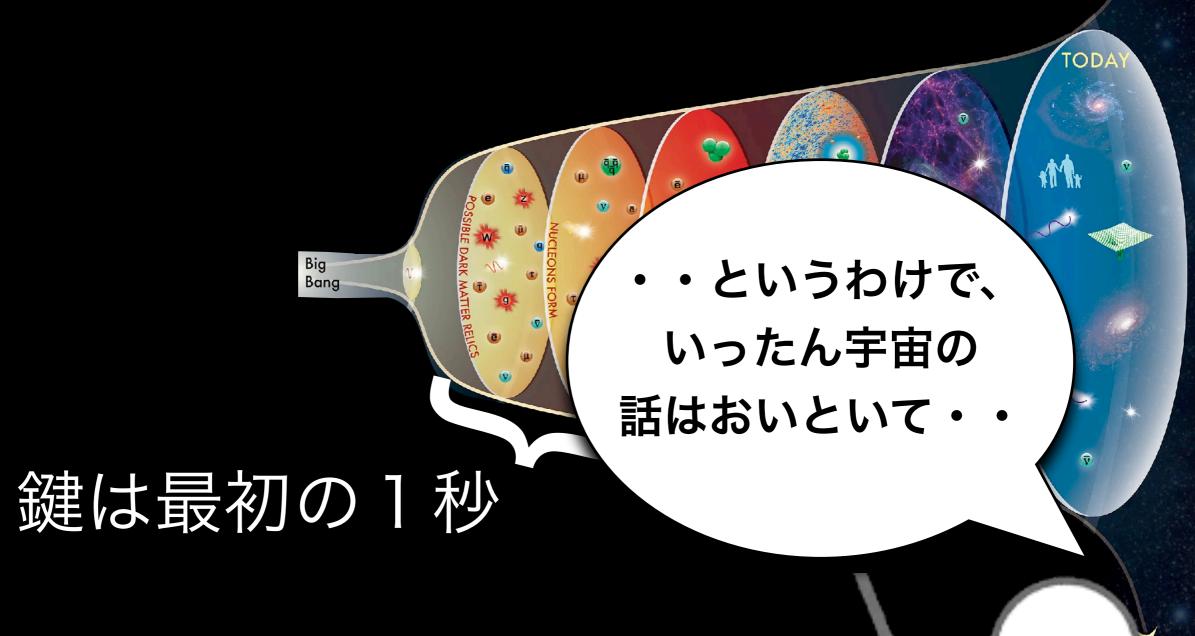
・・・・理解するには素粒子物理が必要。



超高温·超高密度。

全ての物質がバラバラの<mark>素粒子</mark>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。



超高温・超高密度。

全ての物質がバラバラの<mark>素粒子</mark>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。

# もくじ

- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
- (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

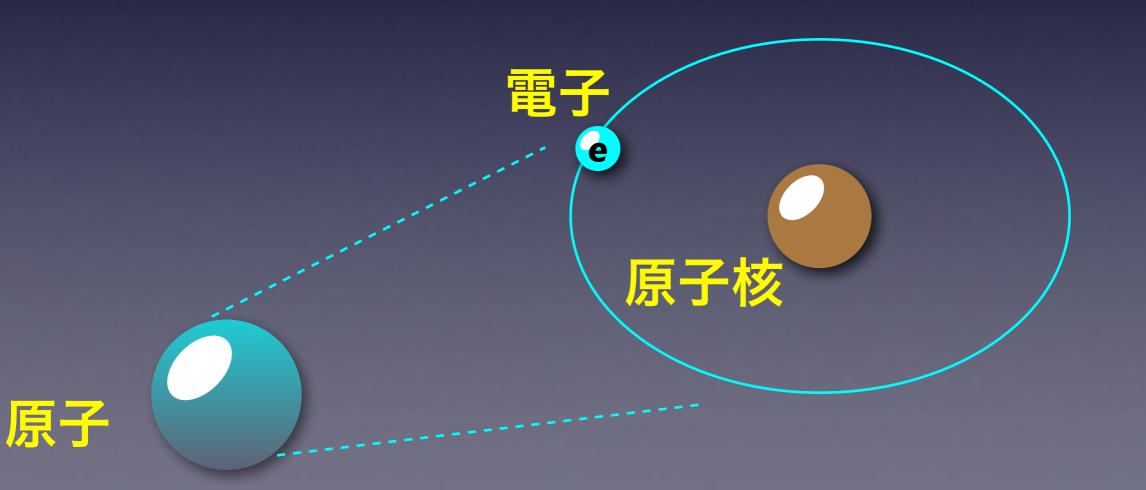
# もくじ

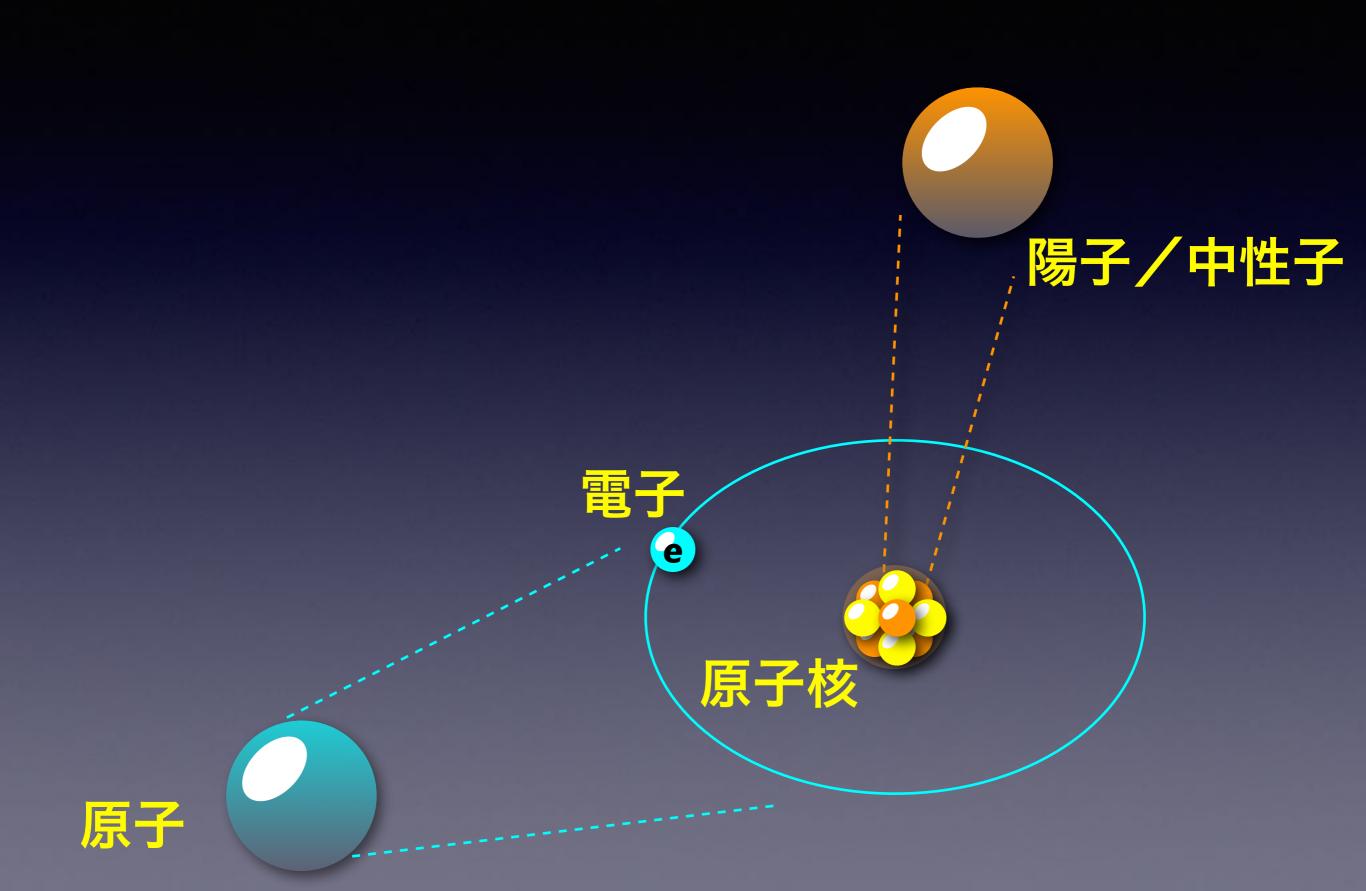
1.宇宙の話

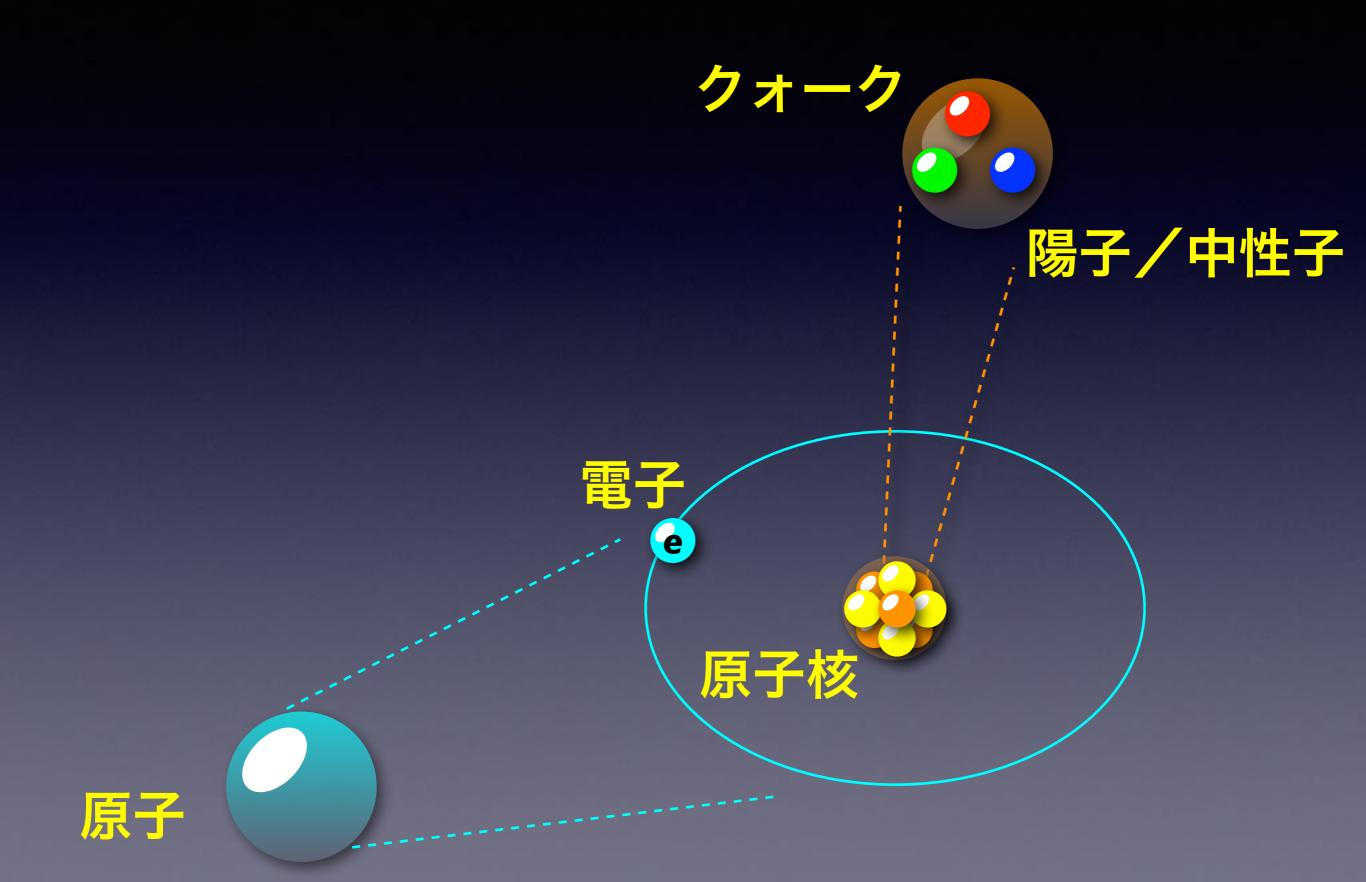
2.素粒子の話

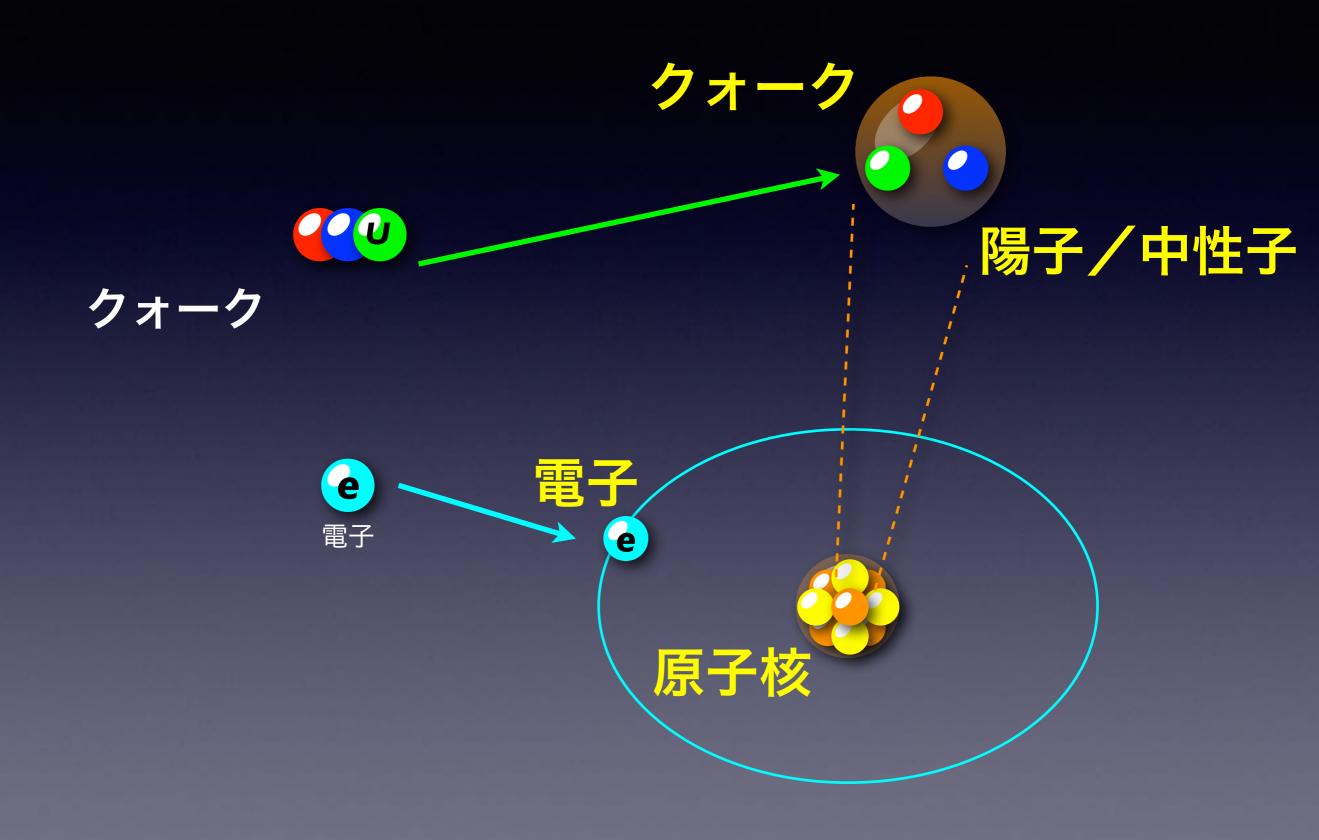
3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理

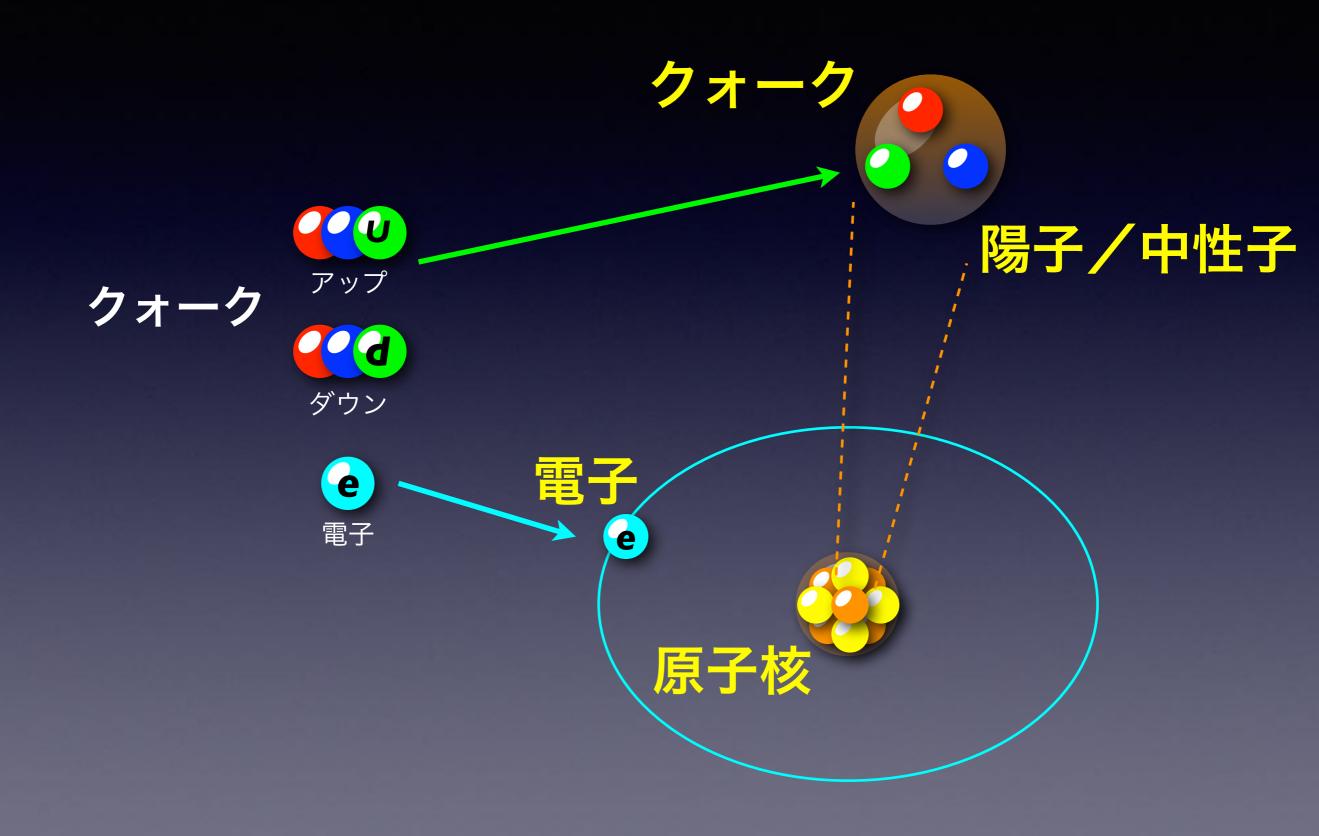
• (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

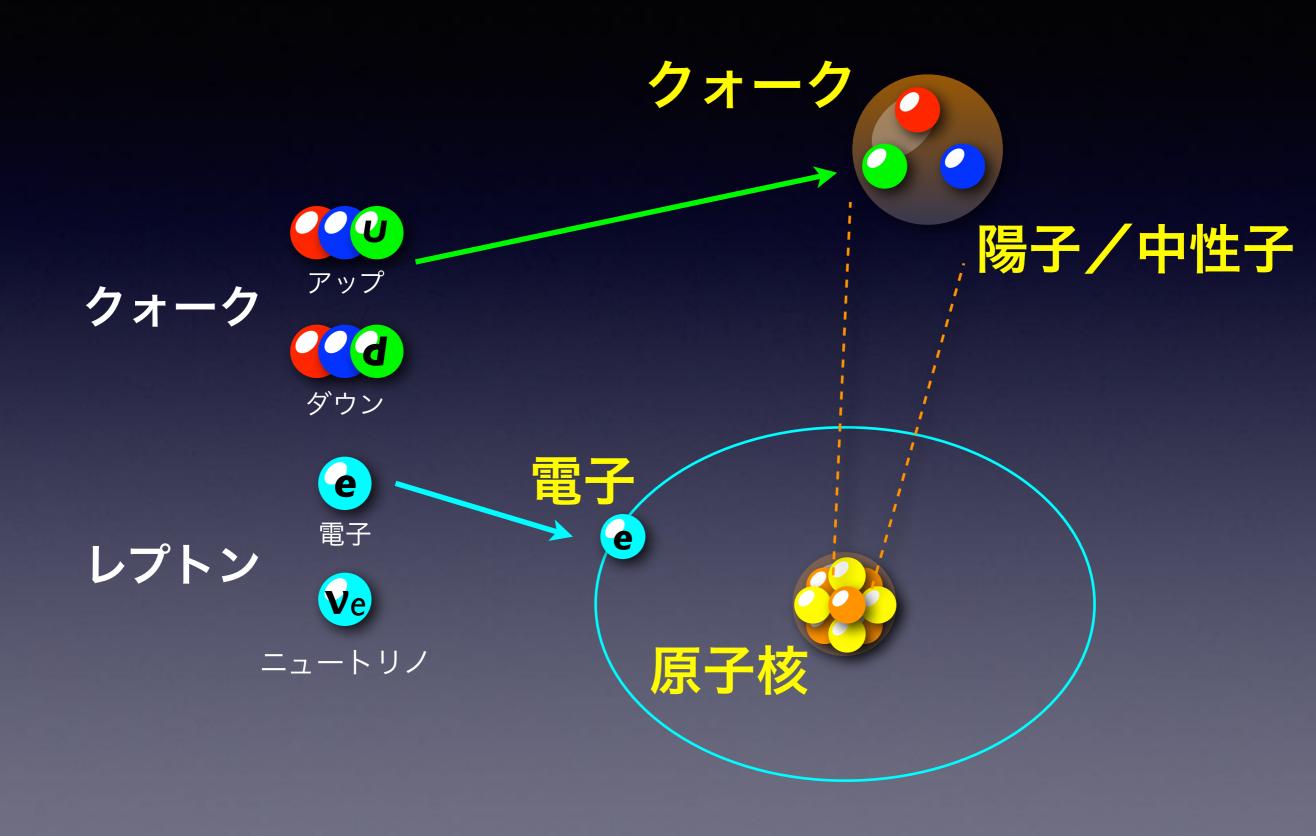




















第1世代 第2世代 第3世代

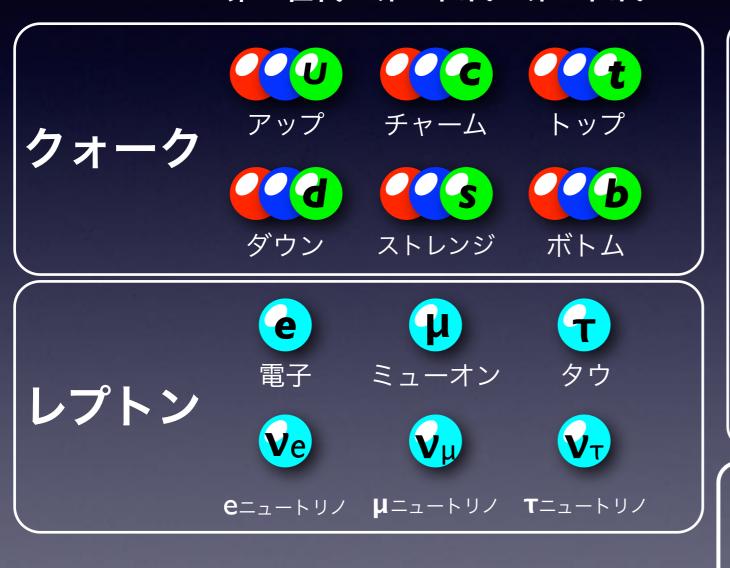


第1世代 第2世代 第3世代





第1世代 第2世代 第3世代

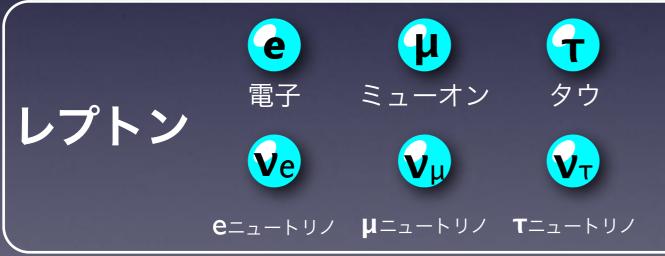


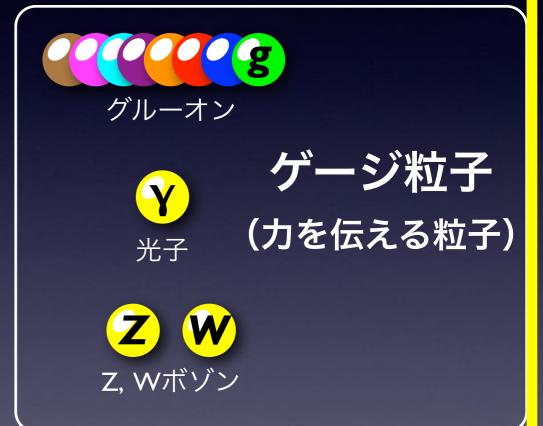


h ヒッグス粒子









f ヒッグス粒子

現在までに確立している素粒子理論=「標準模型」



e= $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ +







標準模型タピオカ



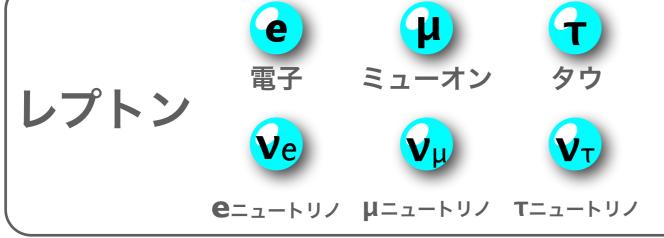
e= $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ - $_{\text{-}}$ + $_{\text{-}}$ +









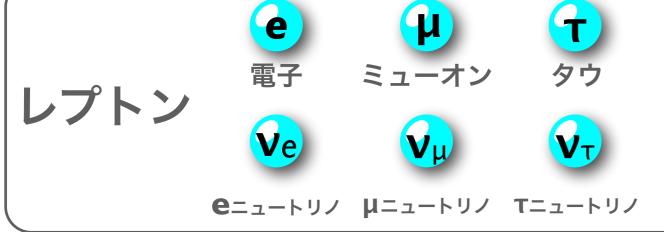








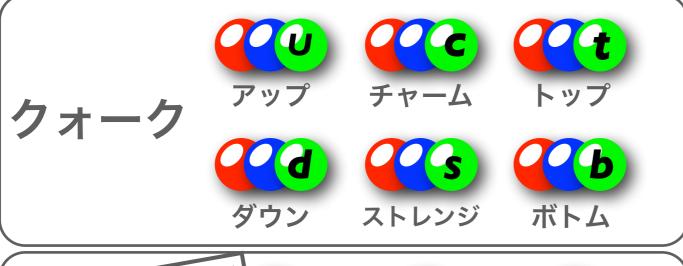


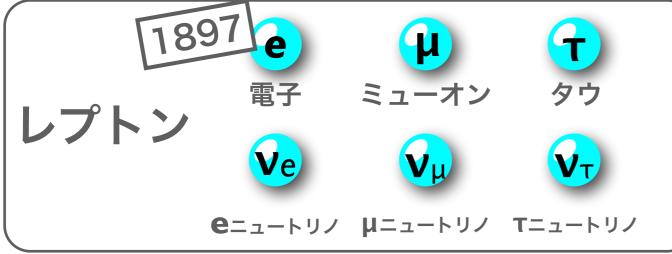




h ヒッグス粒子



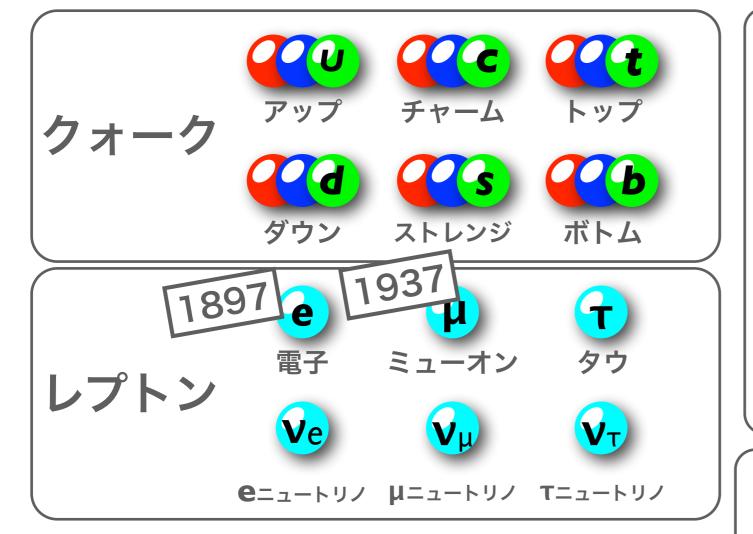






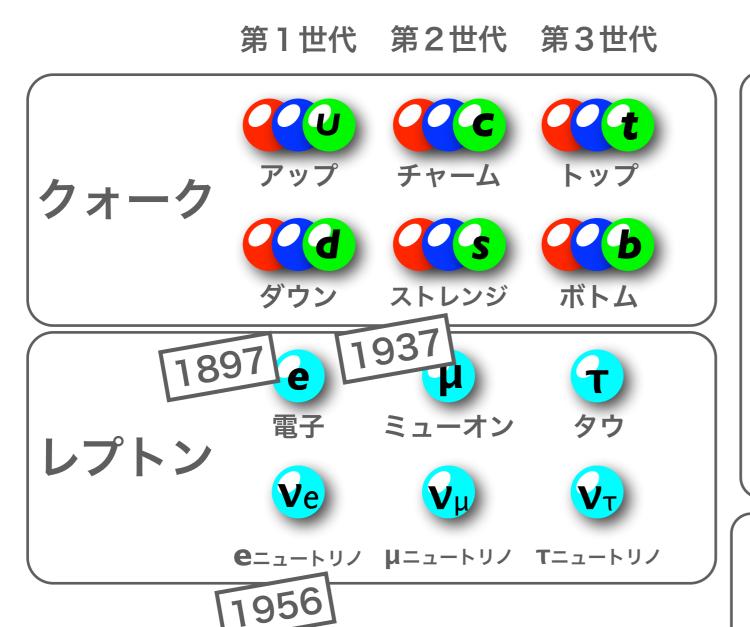
トッグス粒子





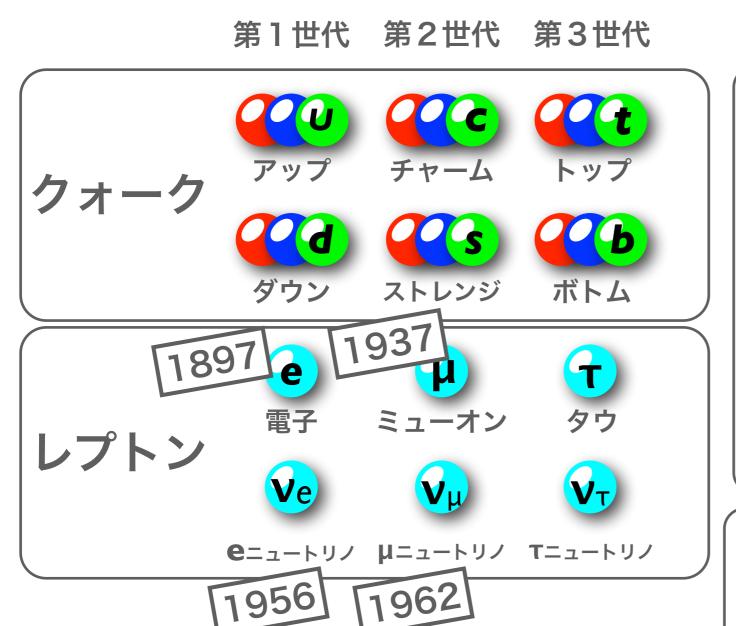


トッグス粒子





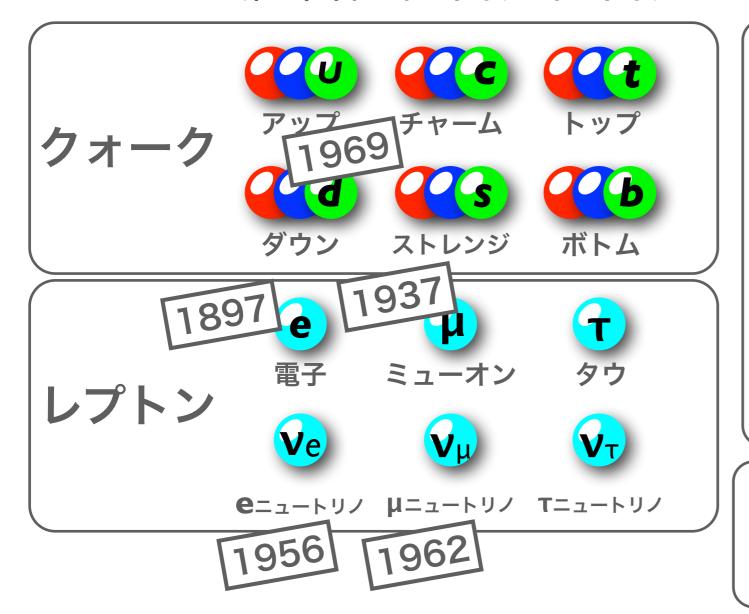
ヒッグス粒子





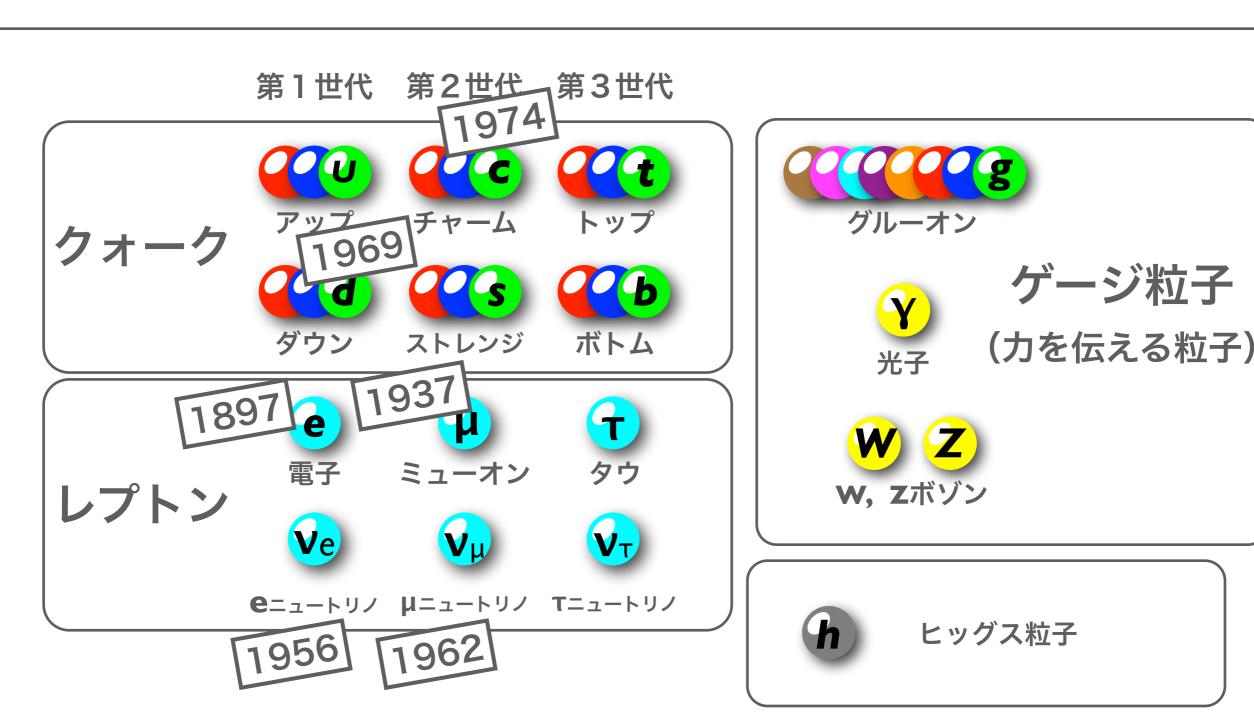
ヒッグス粒子

第1世代 第2世代 第3世代

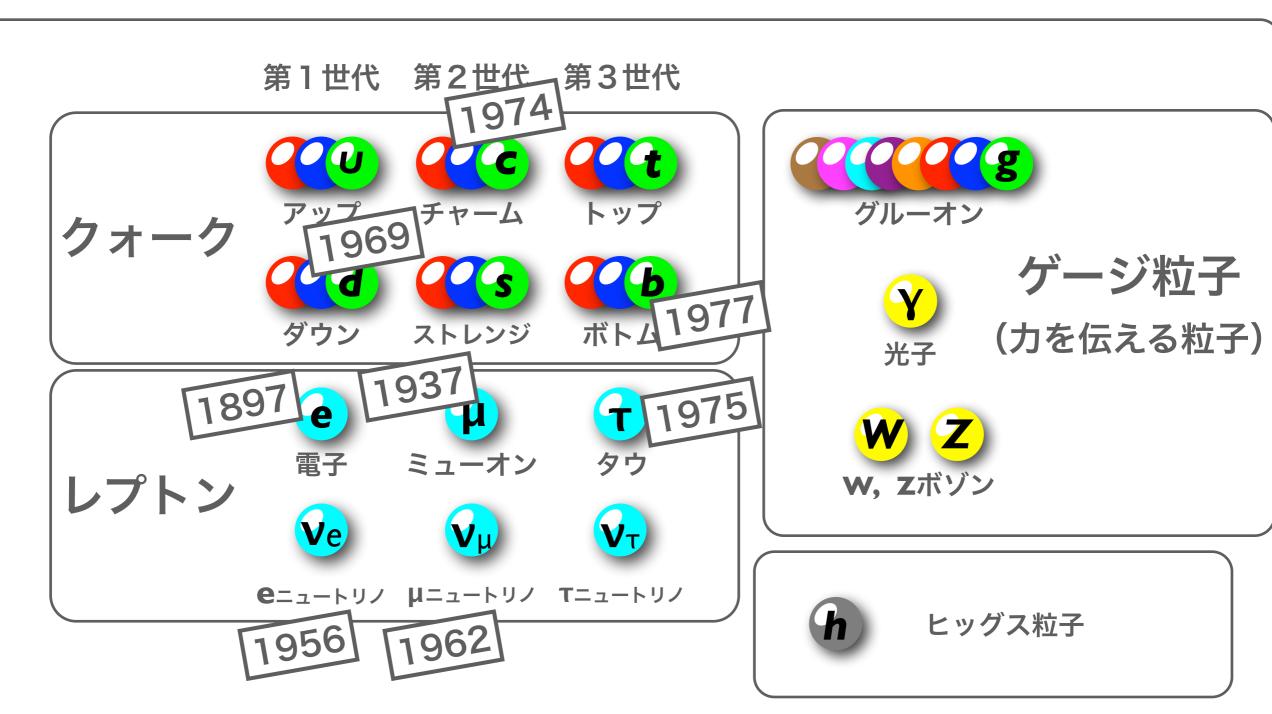


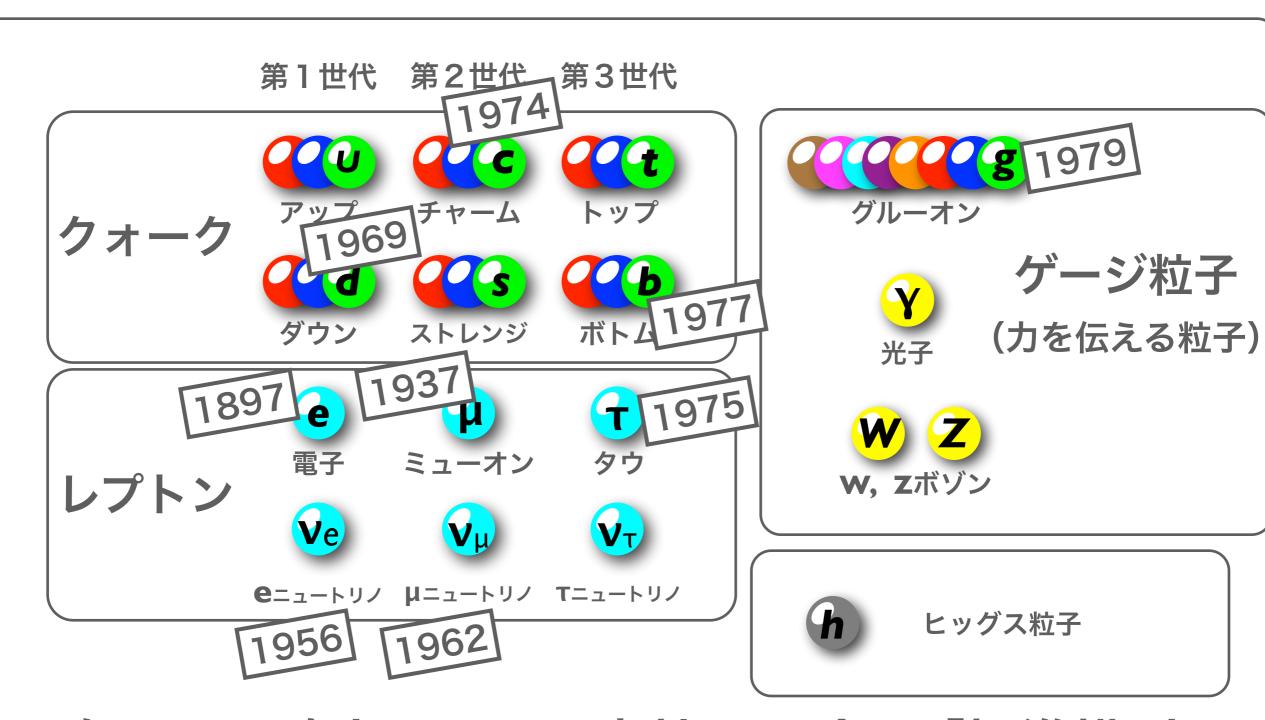


トッグス粒子

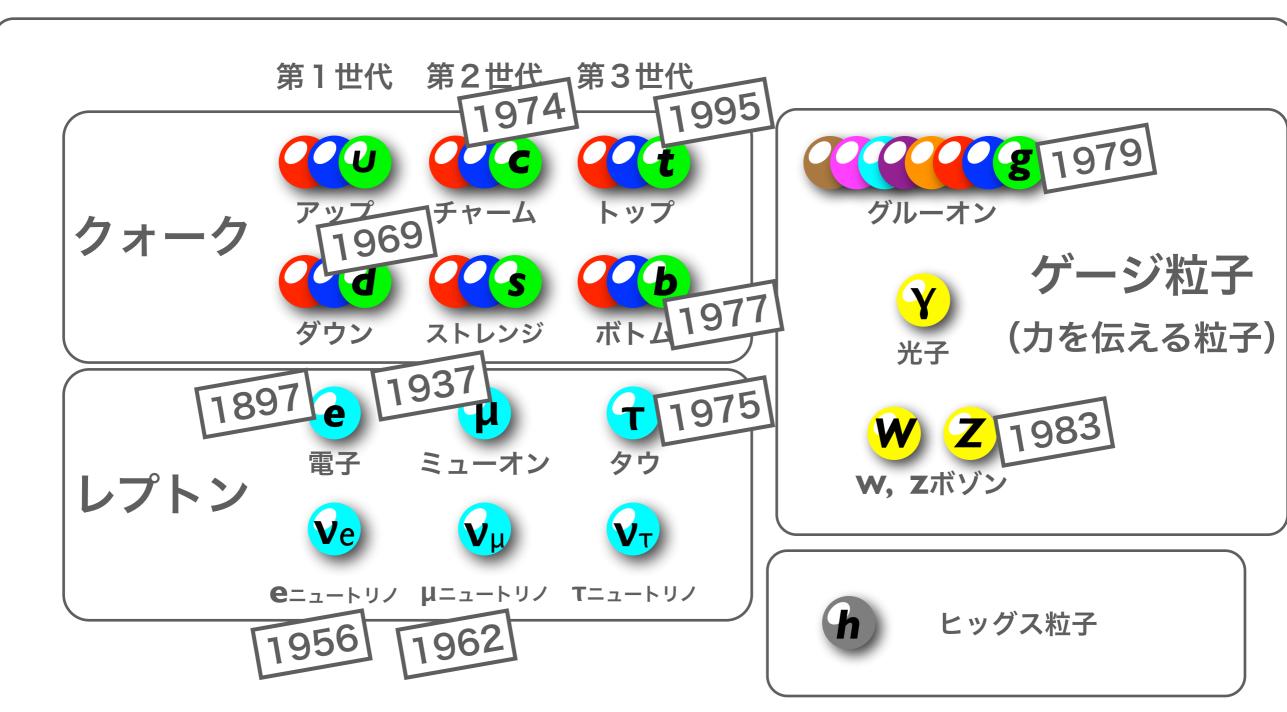


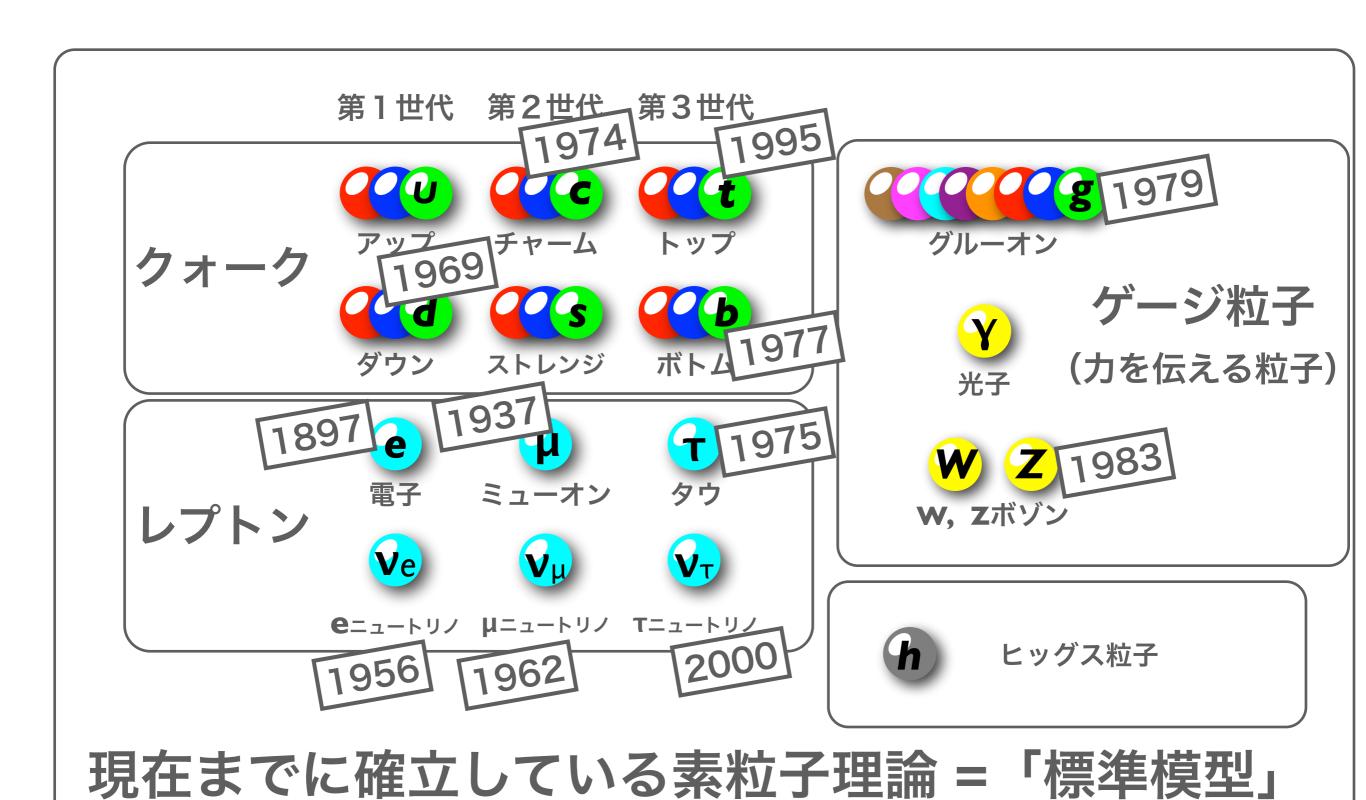


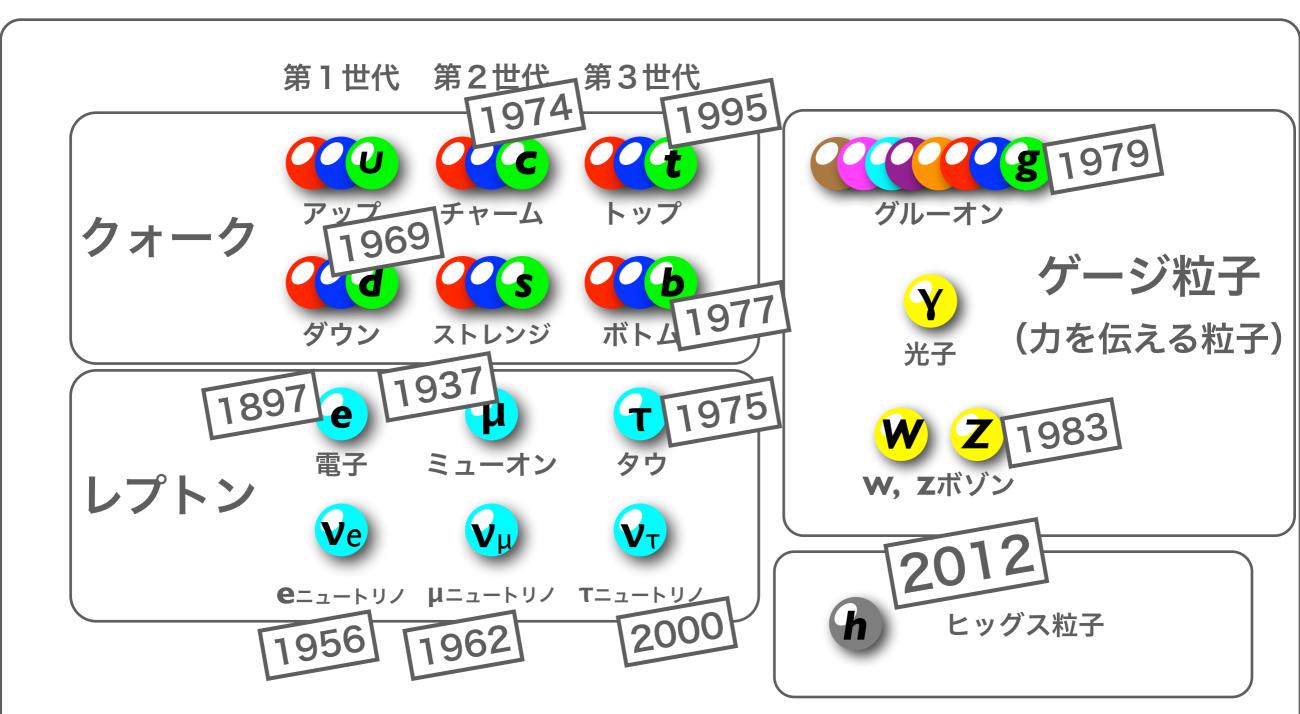






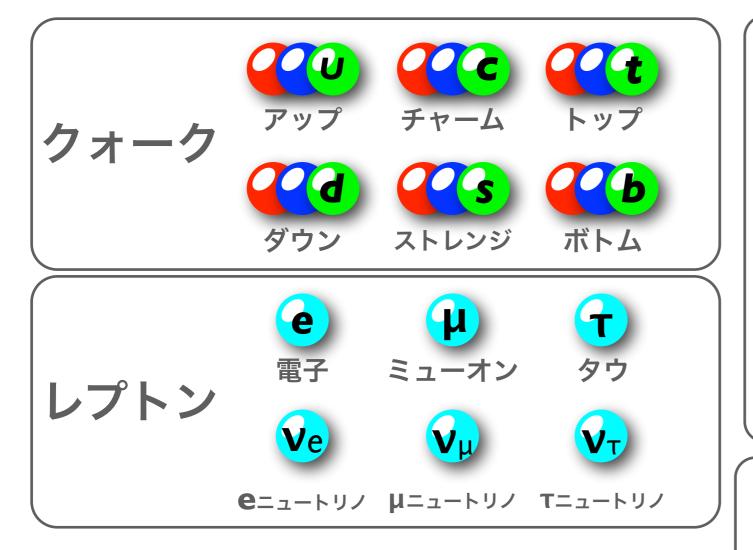






# 素粒子の重さ比べ

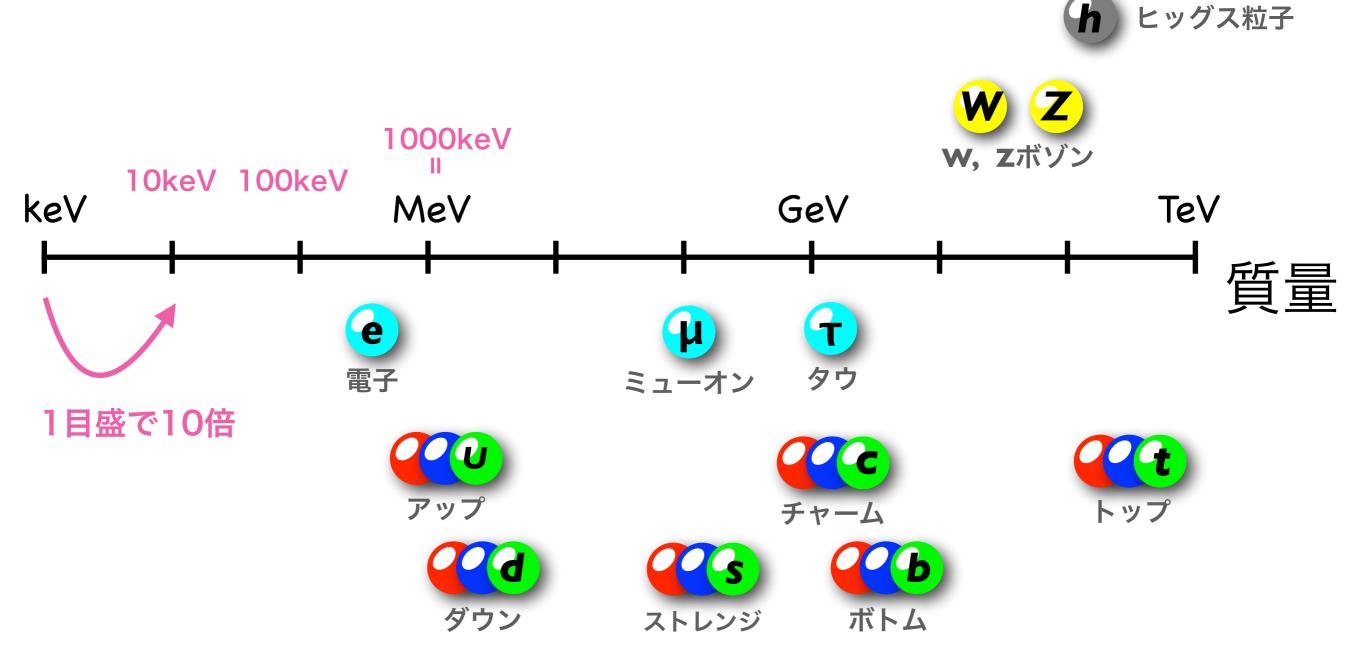
第1世代 第2世代 第3世代





ト ヒッグス粒子

# 素粒子の重さ比べ



### 電子の質量は $511 \text{ keV} \simeq 0.9 \times 10^{-28} \text{ g}$ ヒッグス粒子 1000keV w, zボゾン 10keV 100keV GeV keV MeV TeV ミューオン 1目盛で10倍 チャーム ボトム

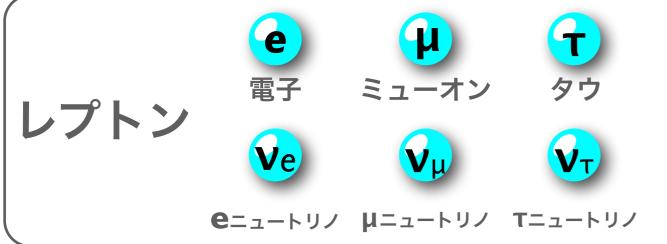
### 電子の質量は $511 \text{ keV} \simeq 0.9 \times 10^{-28} \text{ g}$ ヒッグス粒子 電子の200倍 1000keV w, zボゾン 10keV 100keV GeV keV MeV TeV ミューオン 1目盛で10倍 チャーム ボトム ストレンジ

#### 素粒子の 電子の質量は $511 \text{ keV} \simeq 0.9 \times 10^{-28} \text{ g}$ 重さ比べ ヒッグス粒子 電子の200倍 1000keV w, zボゾン 10keV 100keV GeV keV MeV TeV 電子の3500倍 ミューオン 1目盛で10倍 チャーム ボトム ストレンジ

#### 素粒子の 電子の質量は $511 \text{ keV} \simeq 0.9 \times 10^{-28} \text{ g}$ 重さ比べ ヒッグス粒子 電子の200倍 1000keV w, zボゾン 10keV 100keV GeV keV MeV TeV 電子の3500倍 ミューオン 1目盛で10倍 チャーム トップ 電子の340000倍 ボトム ダウン

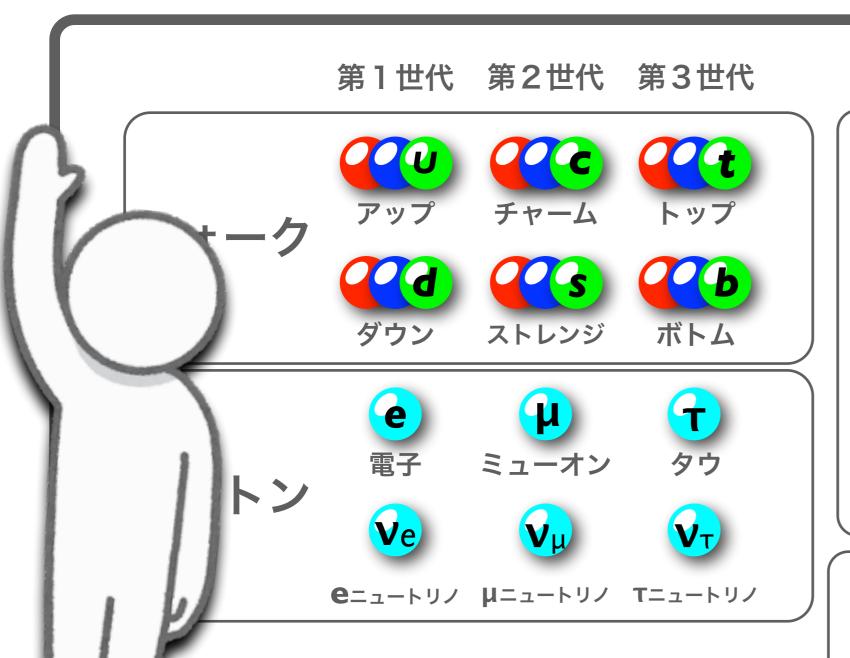








h ヒッグス粒子





**h** ヒッグス粒子



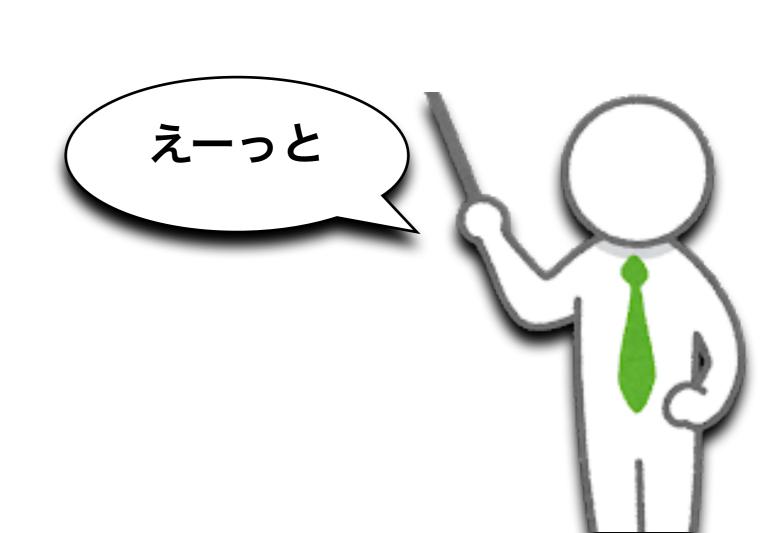


·電磁相互作用(電磁気力)

・弱い相互作用(弱い力)

・強い相互作用(強い力)

· 重力相互作用(重力)



·電磁相互作用(電磁気力)



例えば、マイナスどうしは反発

・弱い相互作用 (弱い力)

・強い相互作用(強い力)

· 重力相互作用(重力)

· 電磁相互作用 (電磁気力)

・弱い相互作用 (弱い力)

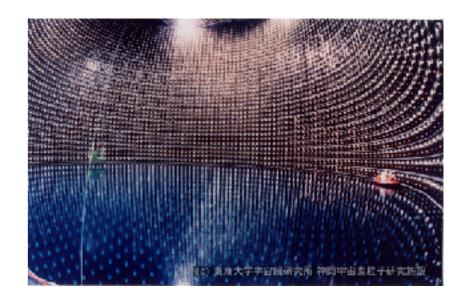
ニュートリノ電子

ニュートリノは 電荷を持っていないけど 「弱い相互作用」によって 電子を弾き飛ばせる。

・強い相互作用(強い力)

カミオカンデなどのニュートリノ実験は、 この「弱い相互作用」による散乱を用いて ニュートリノを検出している。

· 重力相互作用(重力)



· 電磁相互作用 (電磁気力)



- 弱い相互作用 (弱い力)



・強い相互作用(強い力)

陽子 中性子

原子核

· 重力相互作用(重力)

陽子はプラスの電荷なのに 何故バラバラにならない?

-> 「強い力」でくっついている。



クォークが陽子や中性子の中に 閉じ込められているのも「強い力」 (力が強すぎて外に出てこれない!)

· 電磁相互作用 (電磁気力)



- 弱い相互作用 (弱い力)

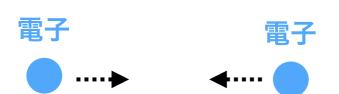


・強い相互作用 (強い力)





·重力相互作用(重力)



一番なじみのある力だと思いますが、 素粒子に働く力としては、とんでもなく弱い!

· 電磁相互作用(電磁気力)



- 弱い相互作用 (弱い力)



・強い相互作用 (強い力)





·重力相互作用(重力)

電子

電子





一番なじみのある力だと思いますが、素粒子に働く力としては、とんでもなく弱い!

しかも、他の相互作用と違って量子論的な記述が未完。 (・・・今日は重力についてはこれ以上は触れません・・・。)

·電磁相互作用(電磁気力)



・弱い相互作用 (弱い力)



・強い相互作用(強い力)





·電磁相互作用(電磁気力)



・弱い相互作用 (弱い力)



・強い相互作用(強い力)





実は素粒子どうしの相互作用(力)も、素粒子によって媒介されている。

#### 実は素粒子どうしの相互作用(力)も、素粒子によって媒介されている。

· 電磁相互作用(電磁気力)



・弱い相互作用 (弱い力)



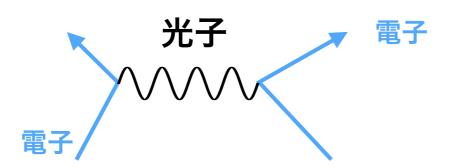
・強い相互作用(強い力)



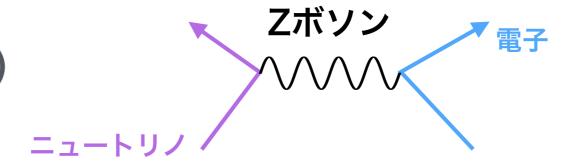


#### 実は素粒子どうしの相互作用(力)も、素粒子によって媒介されている。

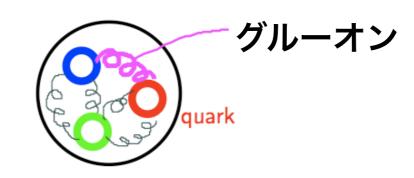
·電磁相互作用(電磁気力)



・弱い相互作用 (弱い力)



・強い相互作用 (強い力)



#### 実は素粒子どうしの相互作用(力)も、素粒子によって媒介されている。

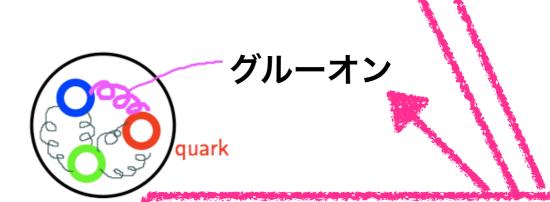
· 電磁相互作用(電磁気力)

光子 電子 (1) 電子

Zボソン

・弱い相互作用 (弱い力)

・強い相互作用 (強い力)

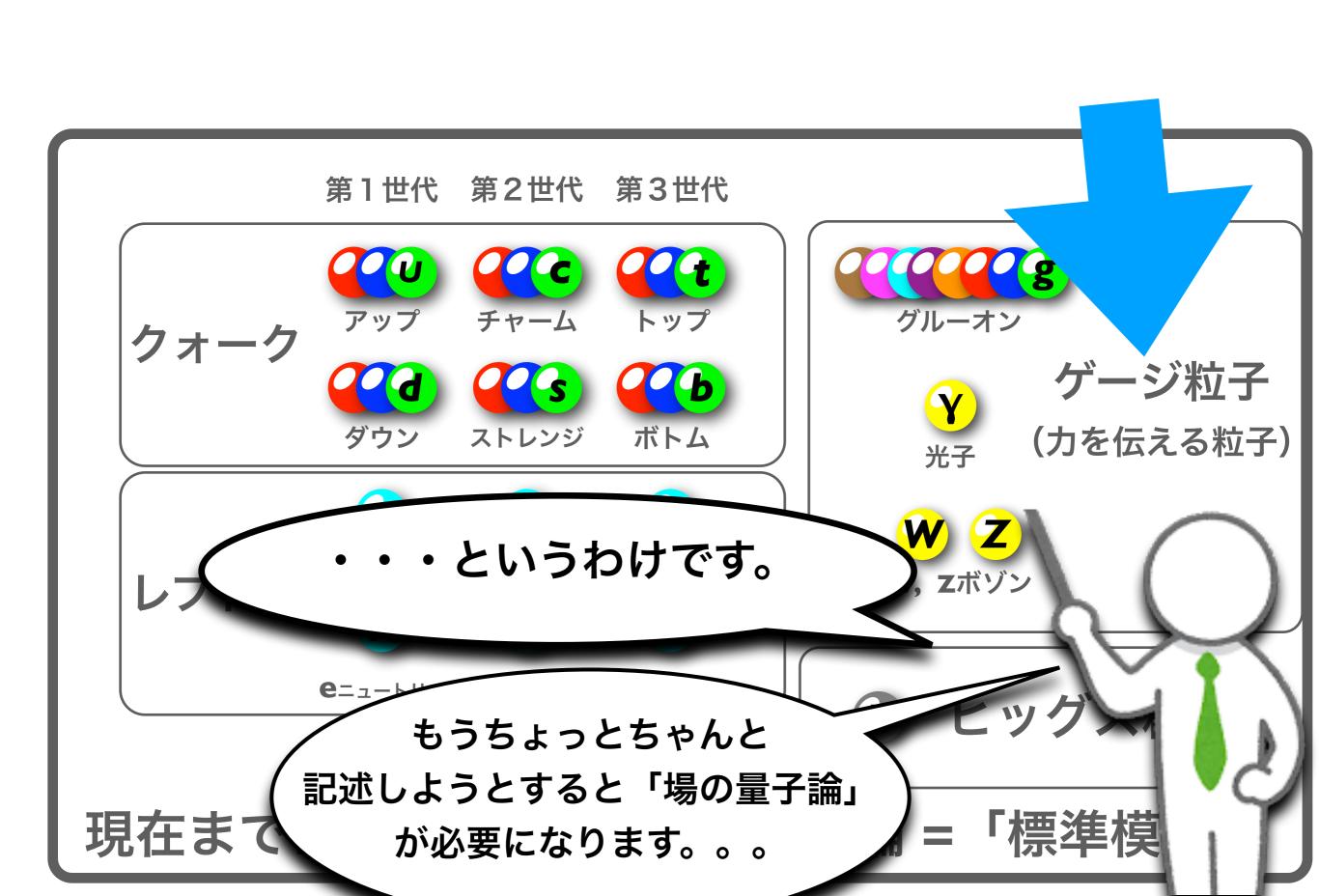


ゲージ粒子 (ゲージボゾン)

「3つの相互作用(力)」の正体は、

ゲージ粒子 (ゲージボゾン) が媒介する「ゲージ相互作用」。





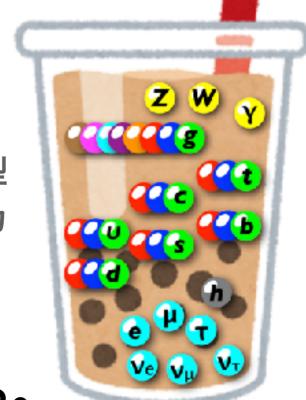
標準模型 タピオカ



▶ 標準模型:「場の量子論」で記述されている。



標準模型 タピオカ



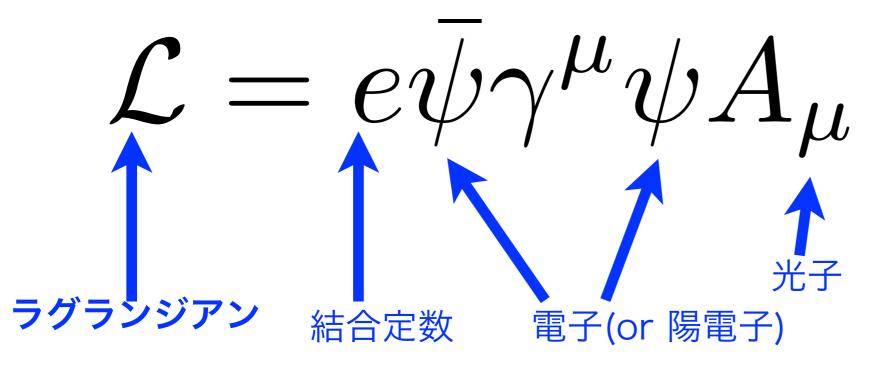
▶標準模型:「場の量子論」で記述されている。

▶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。

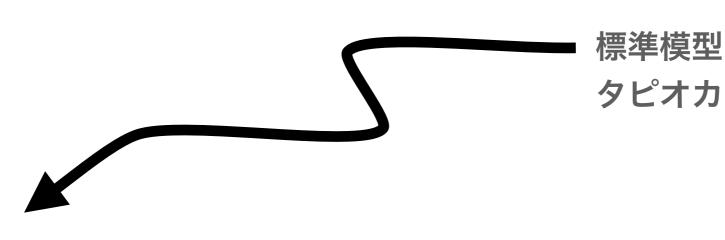
標準模型 タピオカ

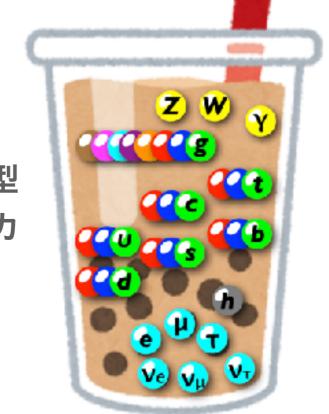


- ▶ 標準模型:「場の量子論」で記述されている。
- ▶場の量子論では「ラグランジアン」が 素粒子の性質や素粒子の間に働く力を記述している。
- ▶ 例えば電子と光子の相互作用は・・・

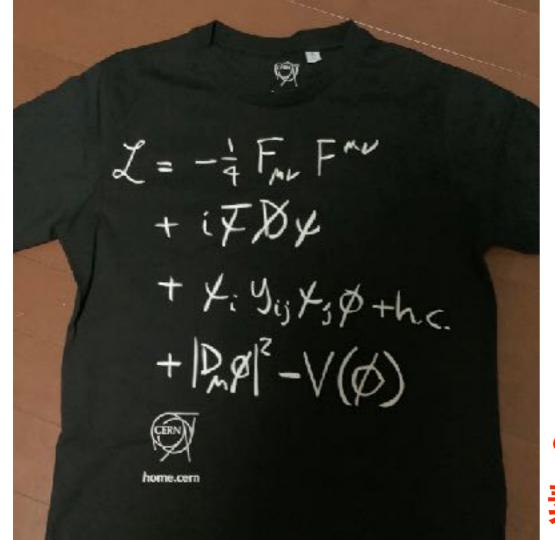


光子  $\gamma$   $\gamma$  e 電子 e

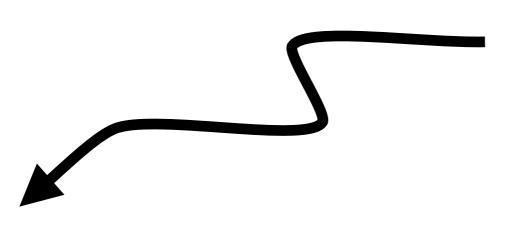




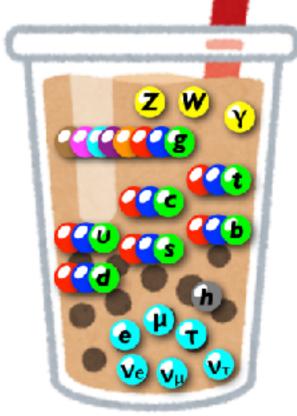
▶ 標準模型の「ラグランジアン」



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!!



標準模型タピオカ



#### ▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\mathcal{L} = \sum_{i} \overline{\psi}_{i} \left( i \not \partial - m_{i} - \frac{g m_{i} H}{2 M_{W}} \right) \psi_{i}$$

$$- \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{i} \overline{\Psi}_{i} \gamma^{\mu} (1 - \gamma^{5}) (T^{+} W_{\mu}^{+} + T^{-} W_{\mu}^{-}) \Psi_{i}$$

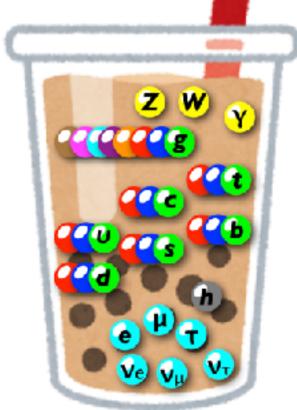
$$- e \sum_{i} q_{i} \overline{\psi}_{i} \gamma^{\mu} \psi_{i} A_{\mu} - \sum_{q} \overline{\psi}_{q,a} g_{s} \gamma^{\mu} t_{ab}^{C} \mathcal{A}_{\mu}^{C} \psi_{q,b}$$

$$- \frac{g}{2 \cos \theta_{W}} \sum_{i} \overline{\psi}_{i} \gamma^{\mu} (g_{V}^{i} - g_{A}^{i} \gamma^{5}) \psi_{i} Z_{\mu} .$$

$$-\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^AF^{A\,\mu\nu}+\mathcal{L}_{\text{Higgs}}$$

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 タピオカ



#### ▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$-rac{1}{4}F_{\mu
u}^{A}F^{A\,\mu
u}+\mathcal{L}_{\mathrm{Higgs}}$$

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!!



ここでちょっと ヒッグスについて お話させて下さい

- ▶ ヒッグスについて
  - ・全ての素粒子の質量の起源





- **標準模型** タピオカ
- 型力

- ▶ 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 タピオカ

- ▶ 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



(弱い相互作用しない)

標準模型 タピオカ

- ▶ 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 タピオカ

- ▶ 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 CR

左巻き電子 eL

別々の粒子 しかもそれぞれ質量ゼロ

(質量ゼロ:常に光速)

(弱い相互作用する)

標準模型 タピオカ

右巻きと左巻きがつながる

-----ヒッグス

- ▶ 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 **C**R

左巻き電子 CL

Yukawa 相互作用

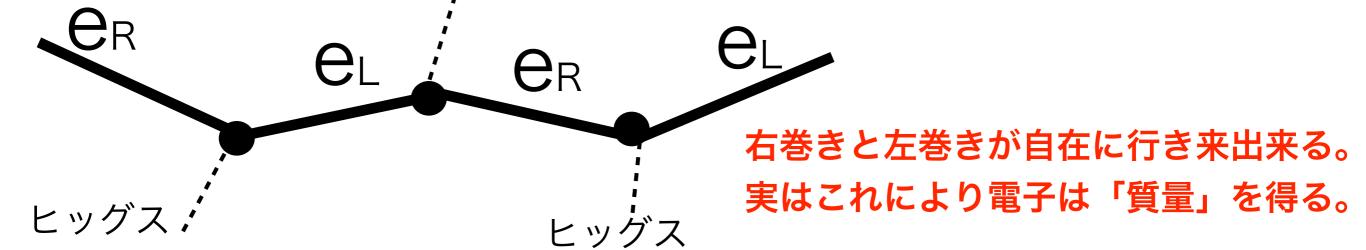
(弱い相互作用する)

- 標準模型 タピオカ

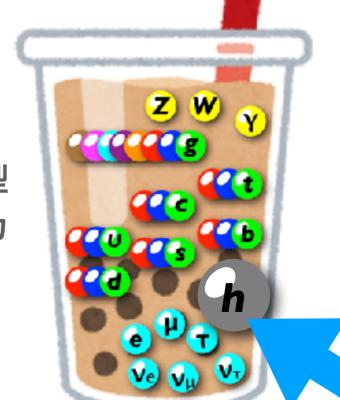
- ▶ ヒッグスについて
  - ・全ての素粒子の質量の起源

### 例えば電子:

「ヒッグス場」が「真空に凝縮」してくれるおかげで・



標準模型 タピオカ



- ▶ 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

→質量をもつ

→質量をもつ

電子

e

+

e

→質量をもつ

ニュートリノ



標準模型 タピオカ



- ▶ 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

→質量をもつ

→質量をもつ





→質量をもつ

ニュートリノ (▼) (+ (N)?)





## ヒッグス粒子は 標準模型の最後の素粒子だったが、 2012年についに発見された。



#### ヒッグス粒子は

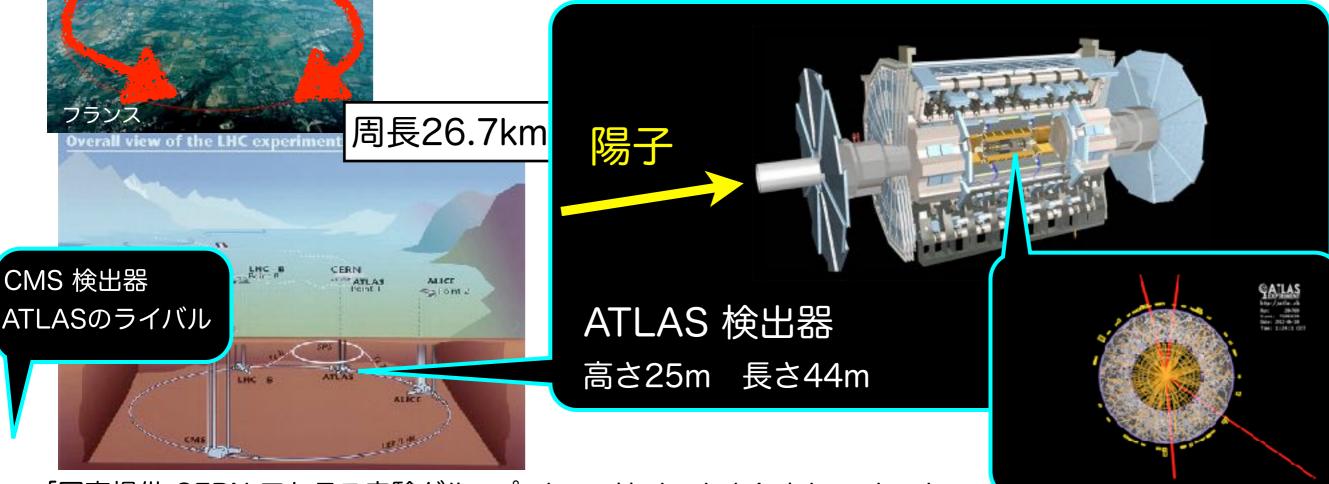
標準模型の最後の素粒子だったが、 2012年についに発見された。





LHC実験:陽子を光速の

99.99999% まで加速→衝突

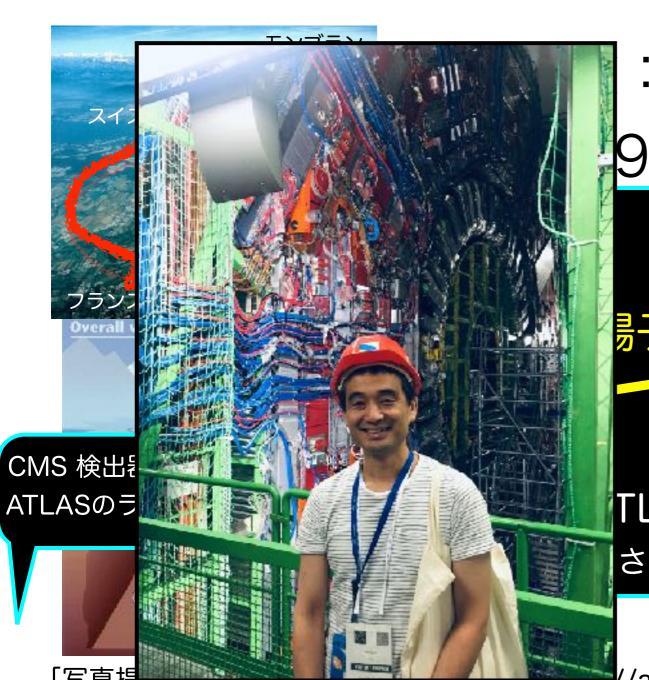


「写真提供 CERN アトラス実験グループ」http://atlas.kek.jp/photo.html

#### ヒッグス粒子は

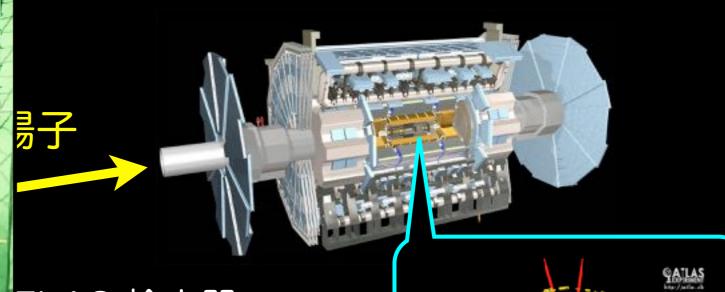
標準模型の最後の素粒子だったが、 2012年についに発見された。





:陽子を光速の

99% まで加速→衝突



TLAS 検出器 さ25m 長さ44m

//atlas.kek.jp/photo.html

### ヒッグス粒子は

標準模型の最後の素粒子だったが、 2012年についに発見された。



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。

# もくじ

- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
- (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

# もくじ

1.宇宙の話

2.素粒子の話

3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理

• (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

# もくじ

1.宇宙の話

2.素粒子の話

3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理

• (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し

話を思い出すと・・

知ってる物質 (原子)

5%

消えた 反物質の謎

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

暗黒物質

27%

話を思い出すと・・・

暗黑物質

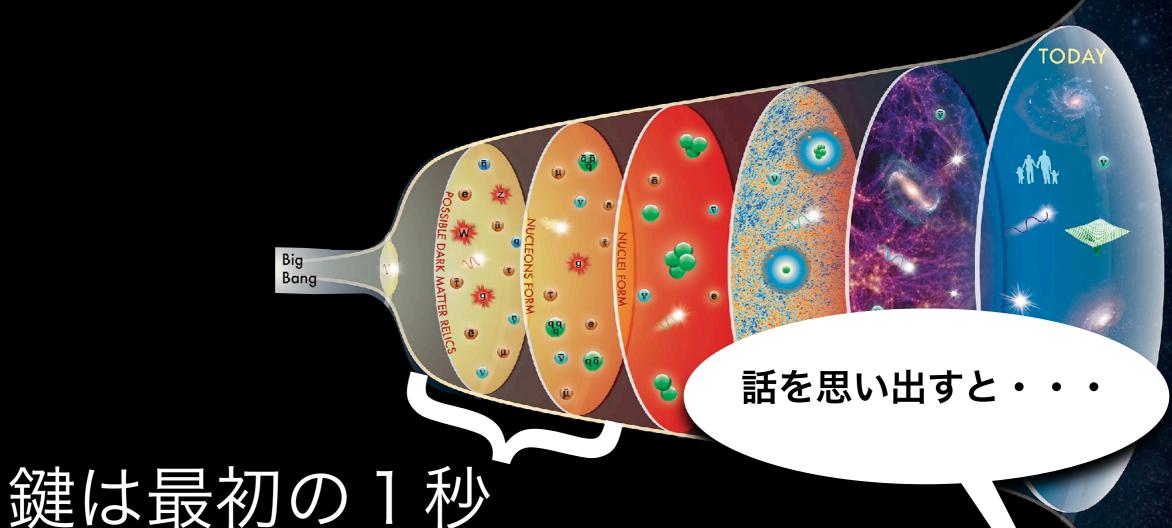
の正体は?

暗黒エネルギー 68%

暗黒エネルギー の正体は?

宇宙の初期条件の問題

さらに・

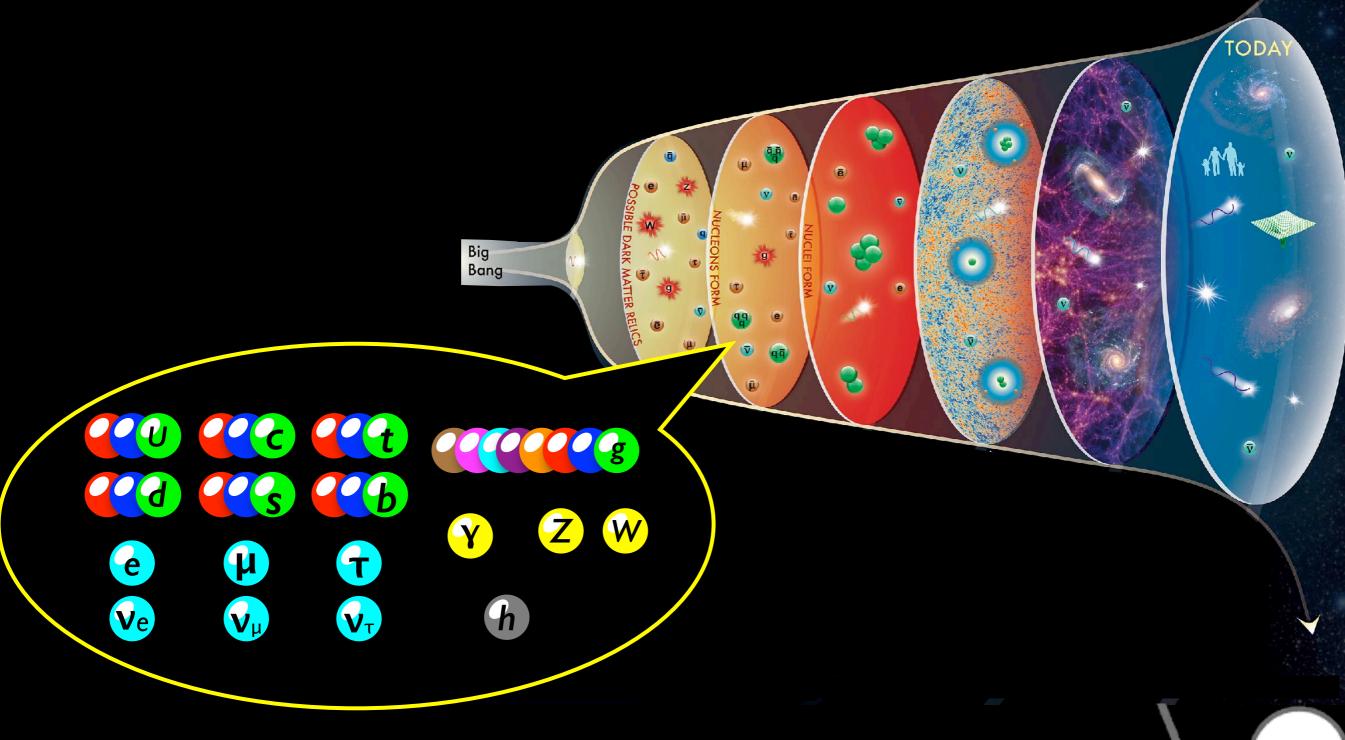


超高温·超高密度。

全ての物質がバラバラの<mark>素粒子</mark>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。





宇宙のごく初期(温度1000兆度以上)には標準模型の全ての素粒子が飛び回っていたと考えられる。



知ってる物質 (原子)

5%

消えた
反物質の謎

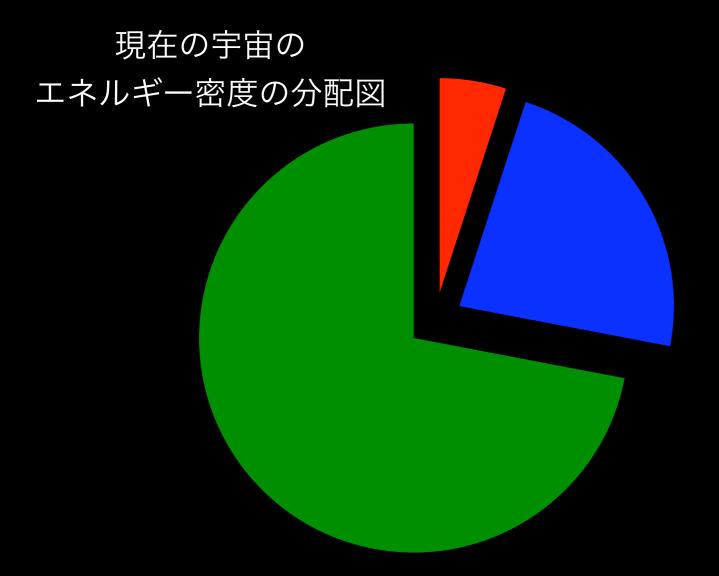
現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

暗黒物質 **27%**  暗黒物質の正体は?

暗黒エネルギー 68% 暗黒エネルギー の正体は?

さらに・・・

宇宙の初期条件の問題



宇宙の初期条件の問題

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

ここは ちょっとややこしい数式が 出てきます。

宇宙の初期条件の問題

## 現在の宇宙はとっても平坦!

「宇宙の平坦さ」

を表す量:

 $\Omega = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho}{H^2}$ 宇宙のエネルギー密度
(宇宙の膨張速度)

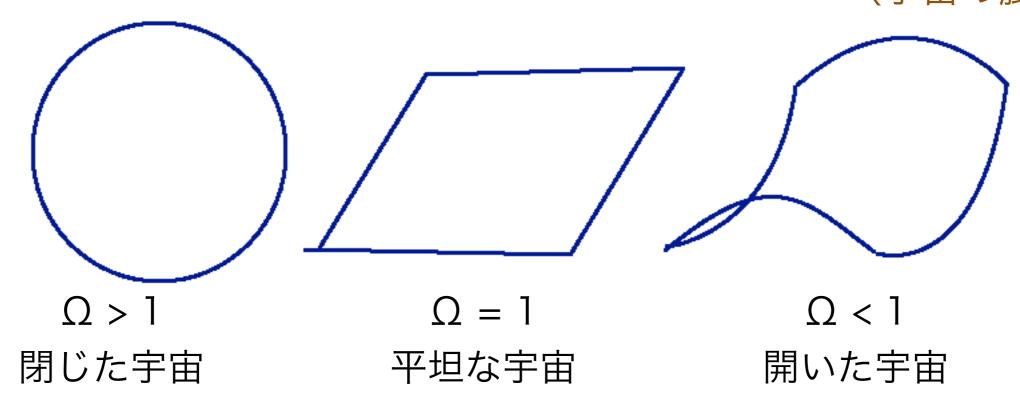
 $\Omega > 1$   $\Omega = 1$   $\Omega < 1$  閉じた宇宙 平坦な宇宙 開いた宇宙

### 現在の宇宙はとっても平坦!

「宇宙の平坦さ」

を表す量:

 $\Omega = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho}{H^2}$ 宇宙のエネルギー密度
(宇宙の膨張速度)



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!

アインシュタイン 方程式 によると:

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

宇宙のスケール因子 (~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:

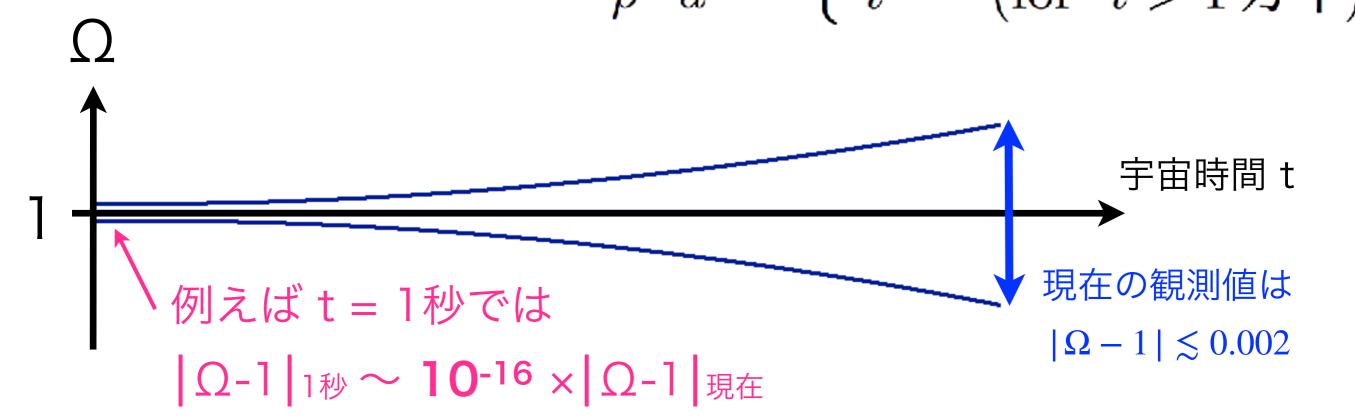
(アインシュタイン方程式+初期条件は火の玉宇宙)

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

アインシュタイン 方程式 によると:

$$\left. \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2}$$
 宇宙のスケール因子  $\left( \sim$ 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:  $\frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto \left\{ egin{array}{ll} t & ( ext{for } t < 1 万年) \\ t^{2/3} & ( ext{for } t > 1 万年) \end{array} 
ight.$ 



初期宇宙はものすご~~く平坦だった! なんで?? どうやって? 宇宙の初期条件の問題

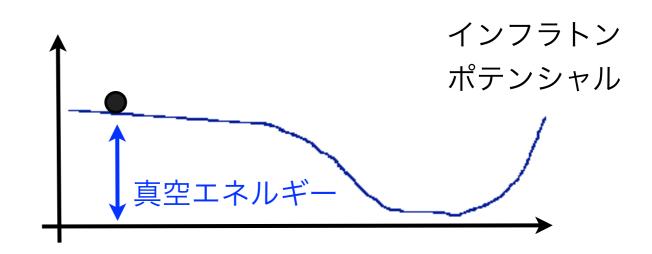
#### 解決法:インフレーション

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  $\rho$   $\sim$  constant

宇宙の"大きさ"  $a \propto e^{H_i t}$  (指数関数的膨張 = インフレーション) (スケール因子)

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

インフレーションがあれば

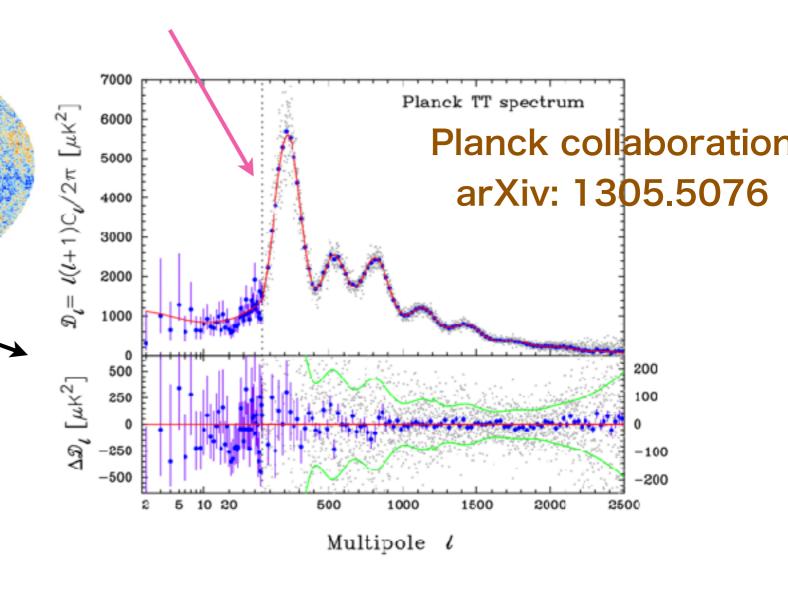
自動的に  $\Omega = 1$ (平坦な宇宙)に初期値を設定してくれる。

#### しかも・・・

宇宙背景放射の

温度ゆらぎ

インフレーションの予言する 温度ゆらぎが観測されている!

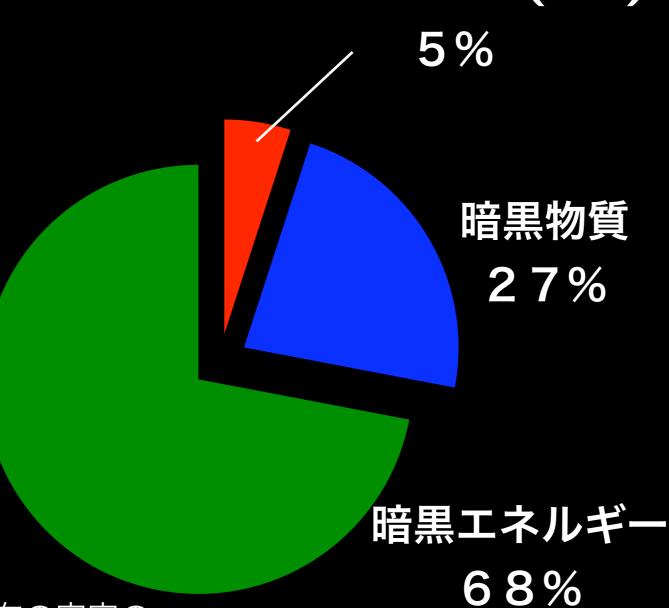


球面調和関数で展開

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

# 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

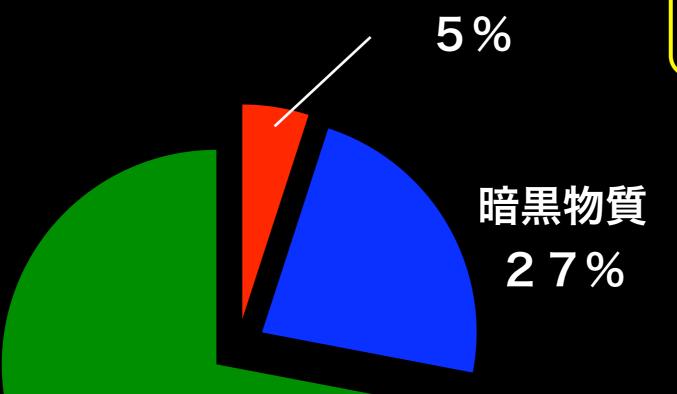
## 宇宙の初期条件の問題

=> おそらく答は「インフレーション」

# 宇宙に残された謎

知ってる物質 (原子)

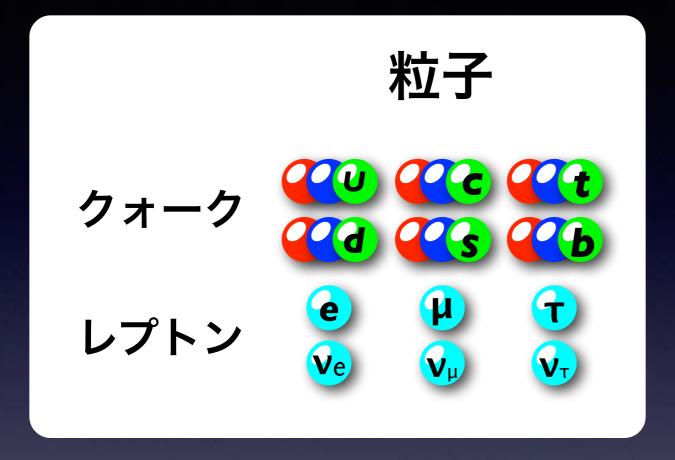
消えた
反物質の謎



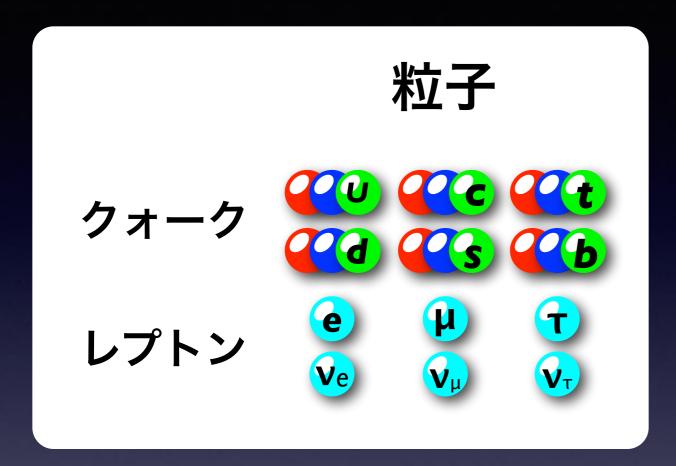
暗黒エネルギー 68%

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

### 全ての素粒子には

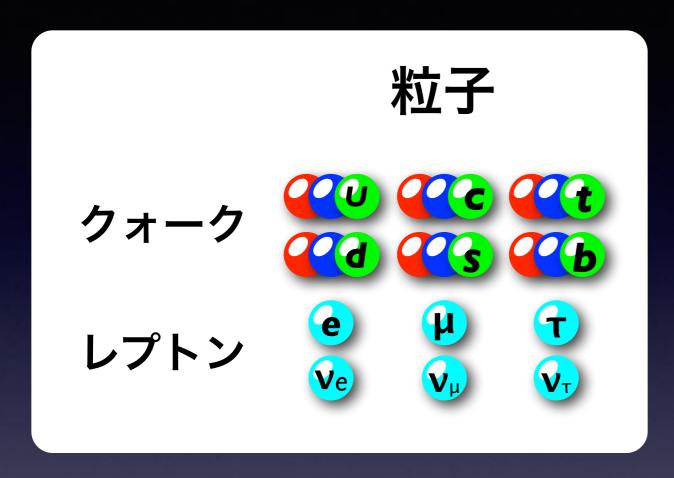


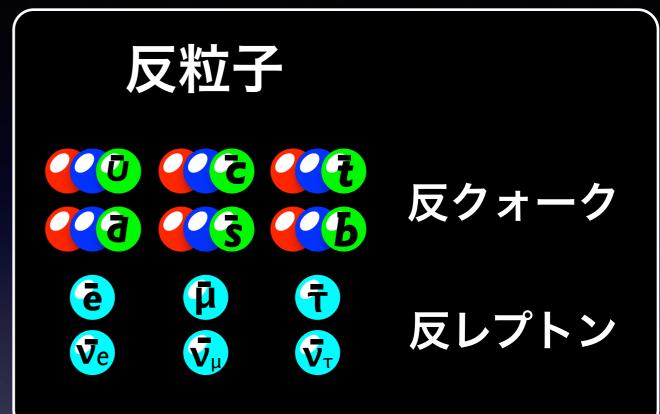
#### 全ての素粒子には反粒子が存在する。





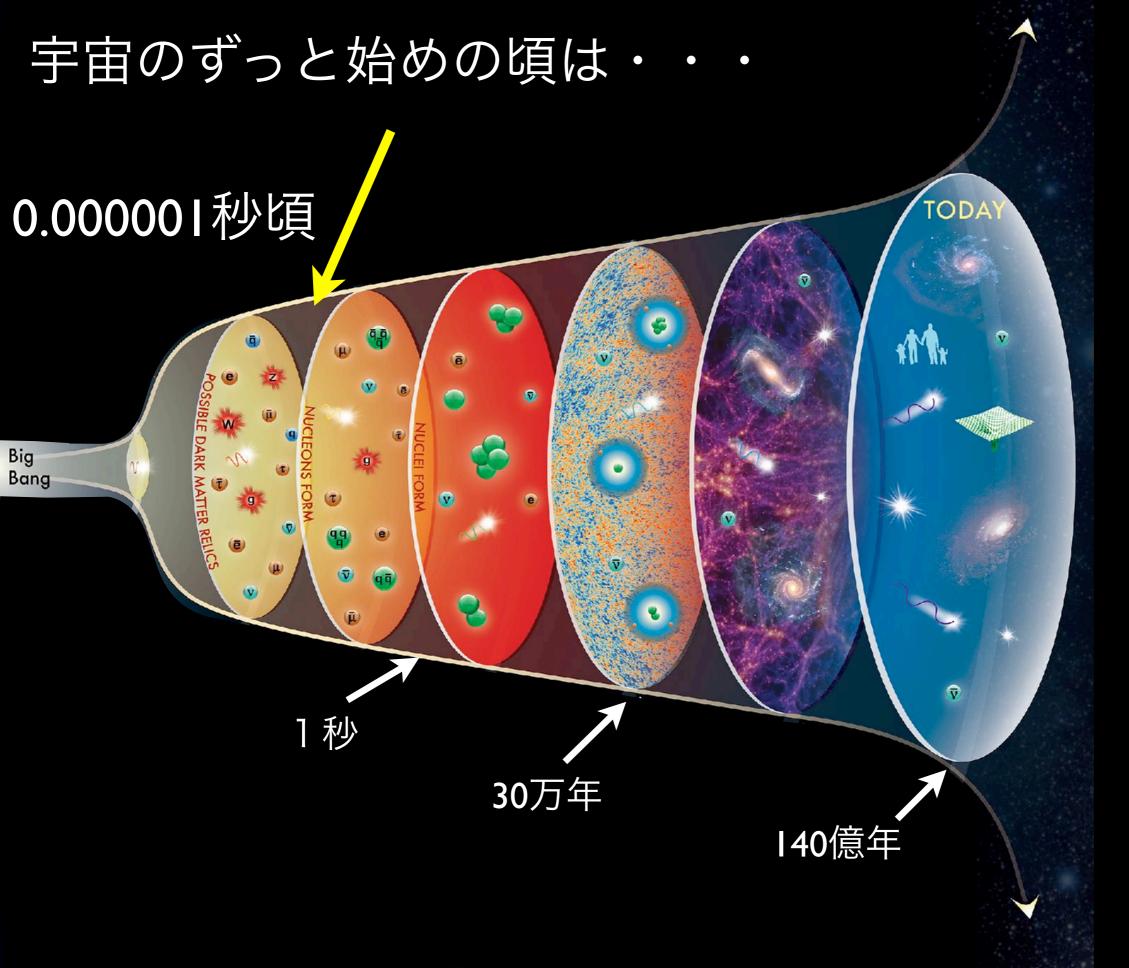
#### 全ての素粒子には反粒子が存在する。





粒子と反粒子は、重さが全く同じで反対の電荷を持つ。



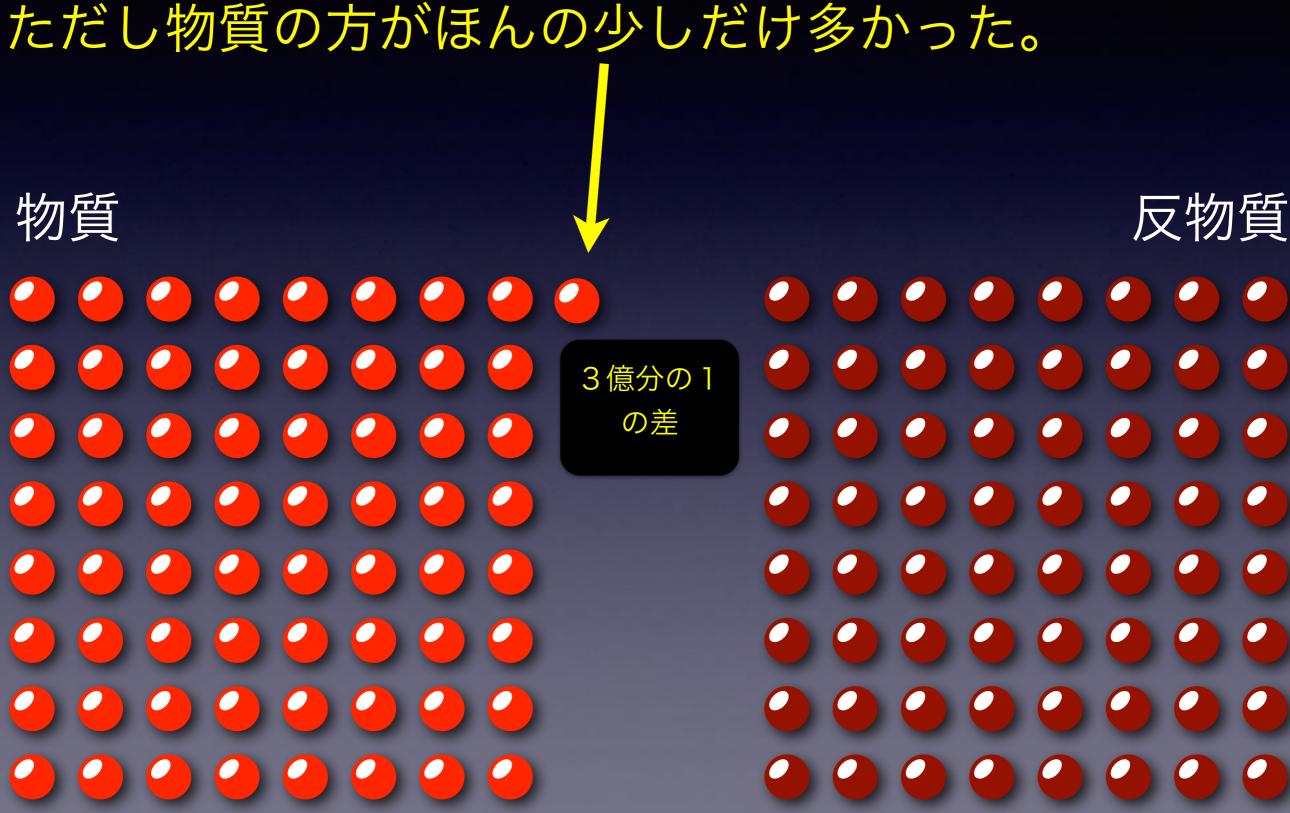


宇宙のずっと始めの頃は・・・物質と反物質がほぼ同数あった。

物質

反物質

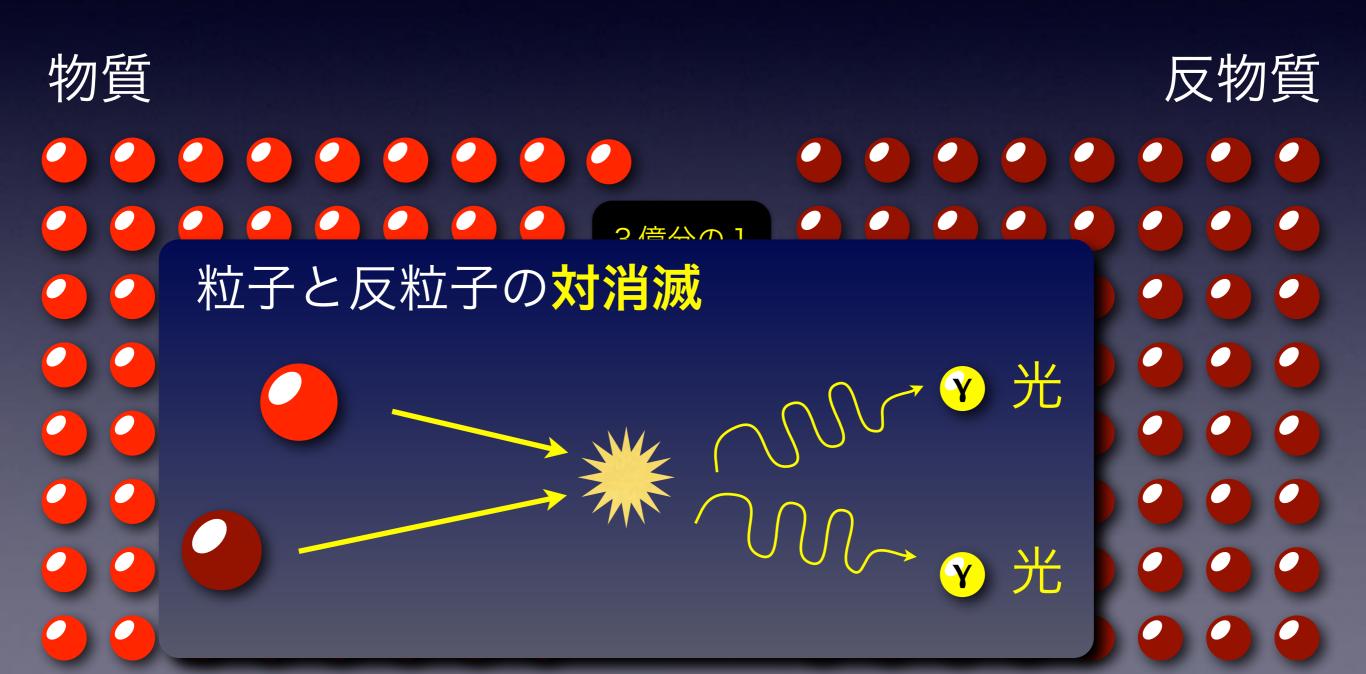
宇宙のずっと始めの頃は・・・物質と反物質がほぼ同数あった。



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<mark>対消滅して・・・</mark>



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・・・



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<mark>対消滅して・・・</mark>



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

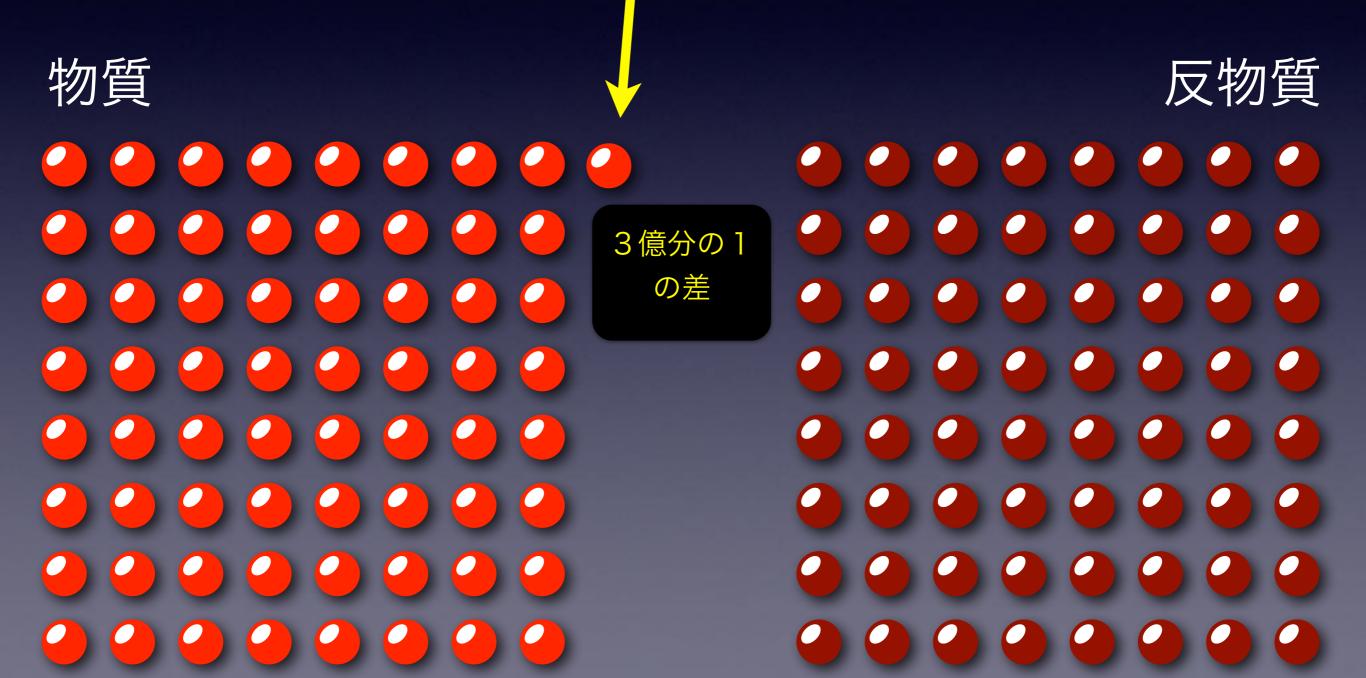


(反物質は消滅)

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!

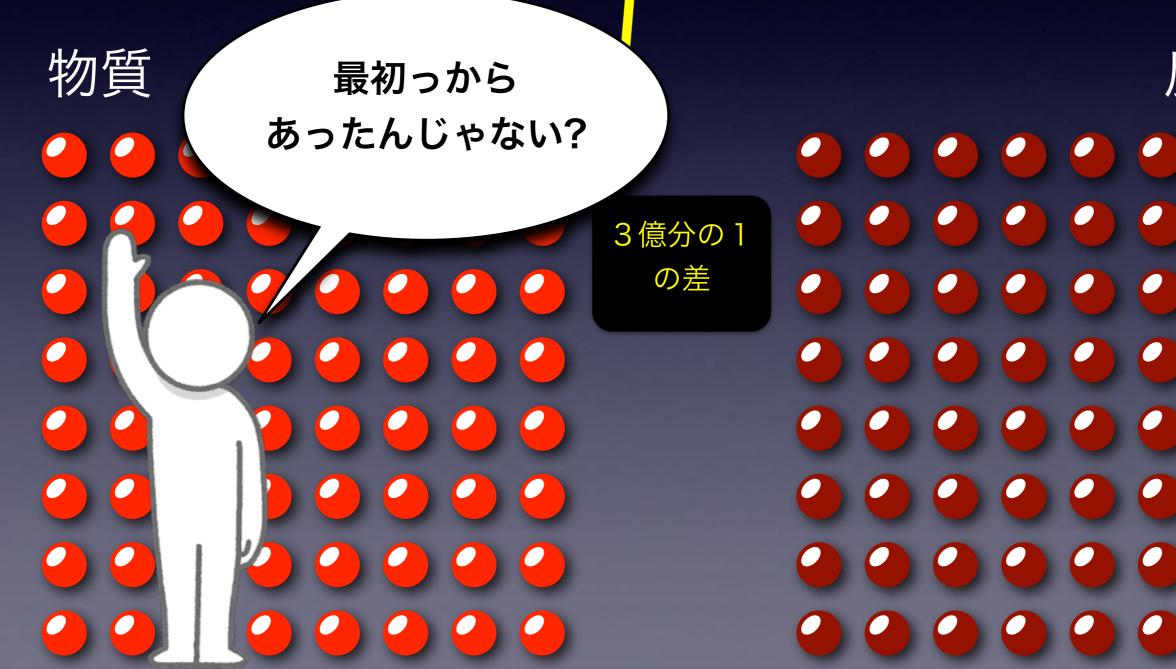
最初にあったこのわずかな差は

どうやって作られたのか?



最初にあったこのわずかな差は

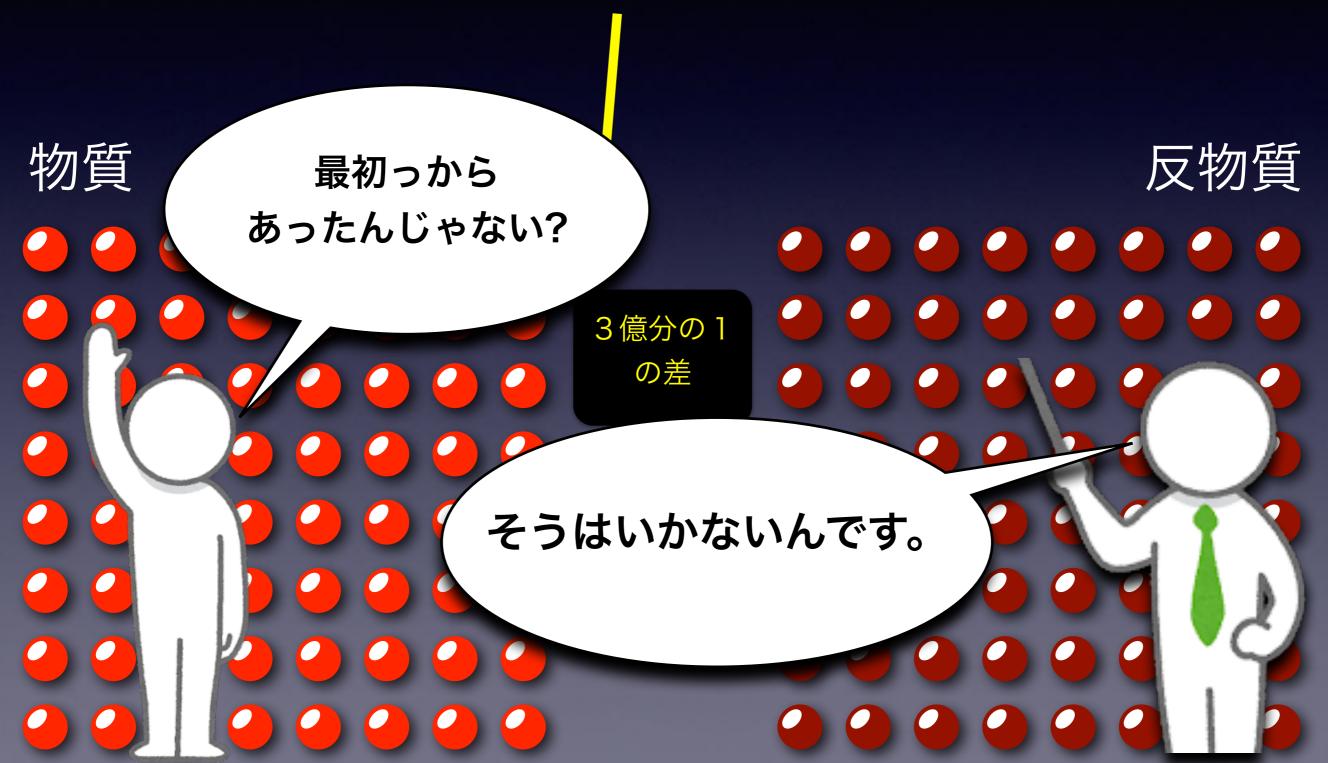
どうやって作られたのか?

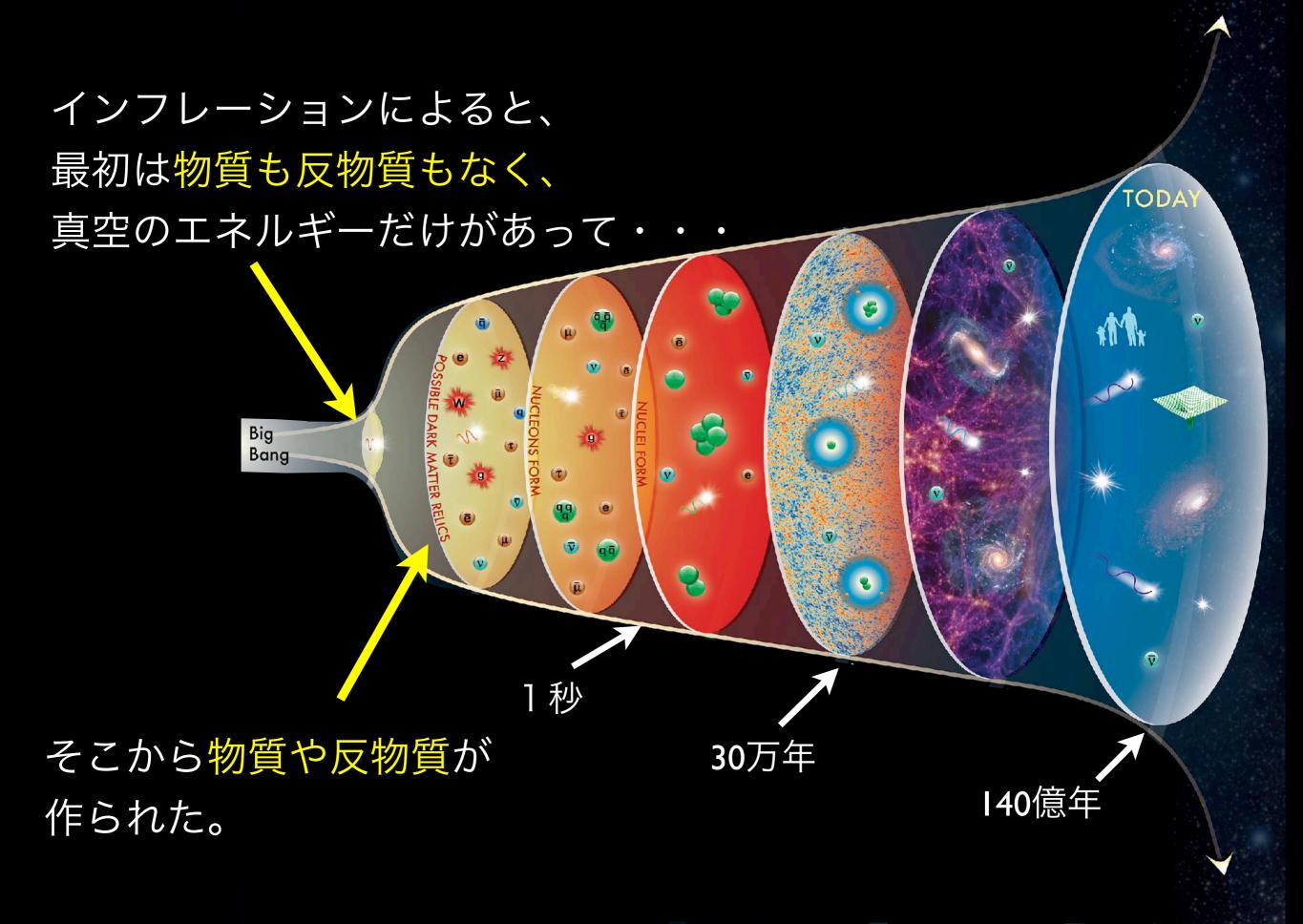


反物質

最初にあったこのわずかな差は

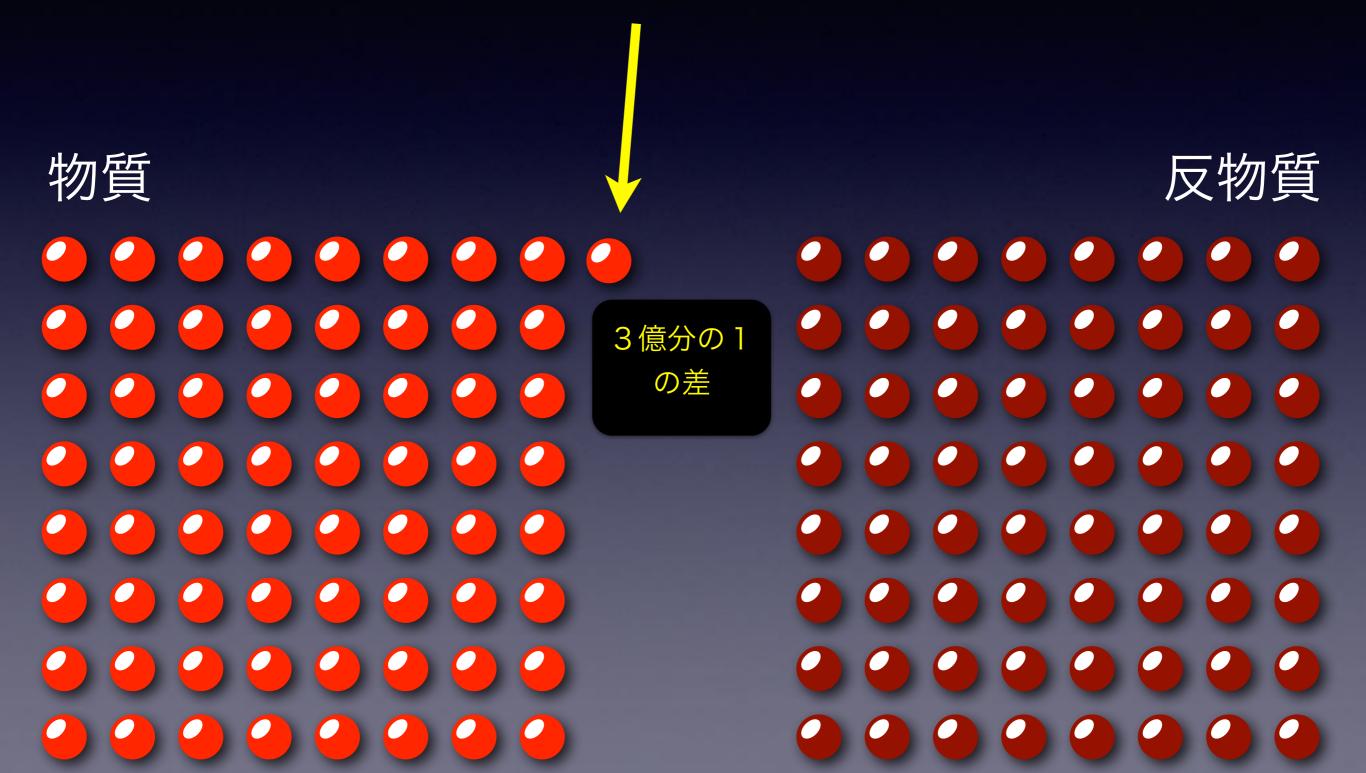
どうやって作られたのか?





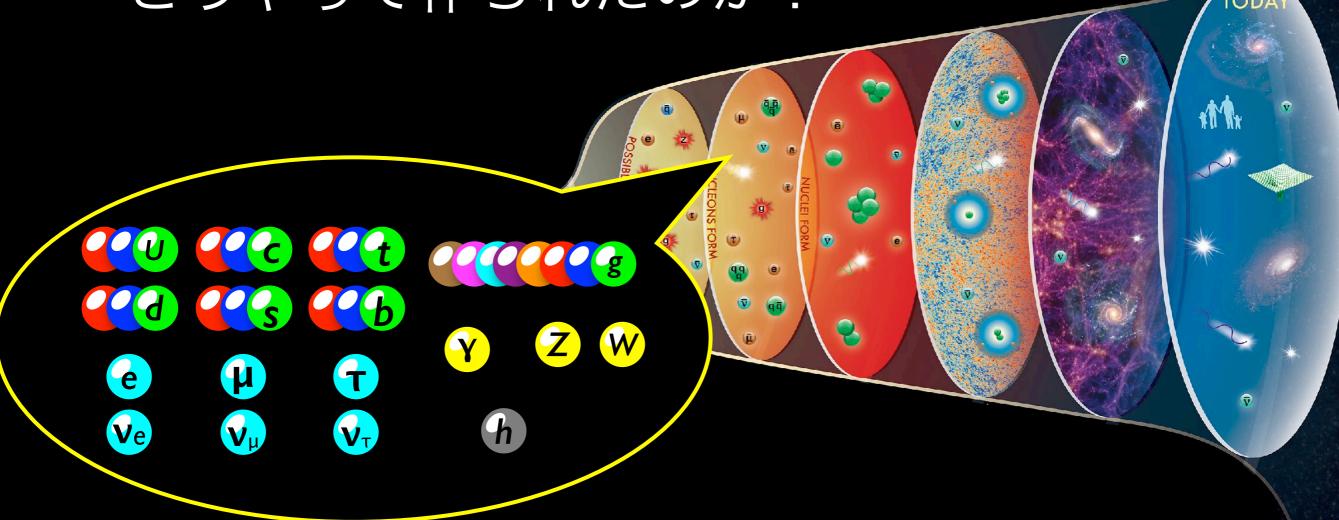
最初にあったこのわずかな差は

どうやって作られたのか?



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。

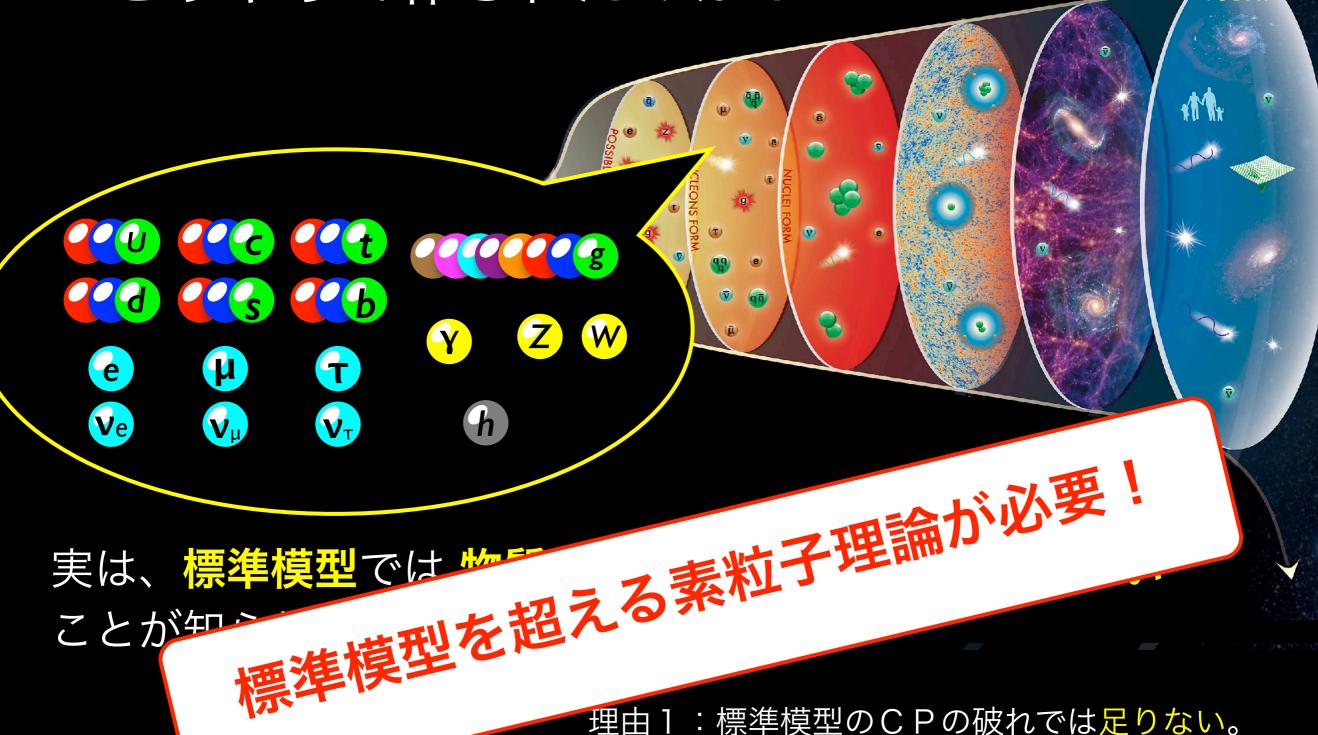
理由1:標準模型のCPの破れでは足りない。

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?

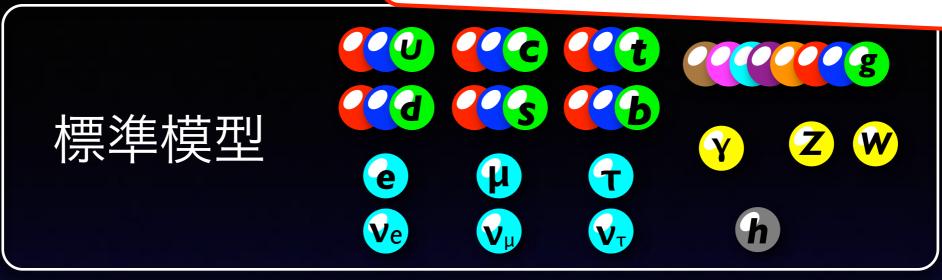


実は、標準模型では地 ことが知

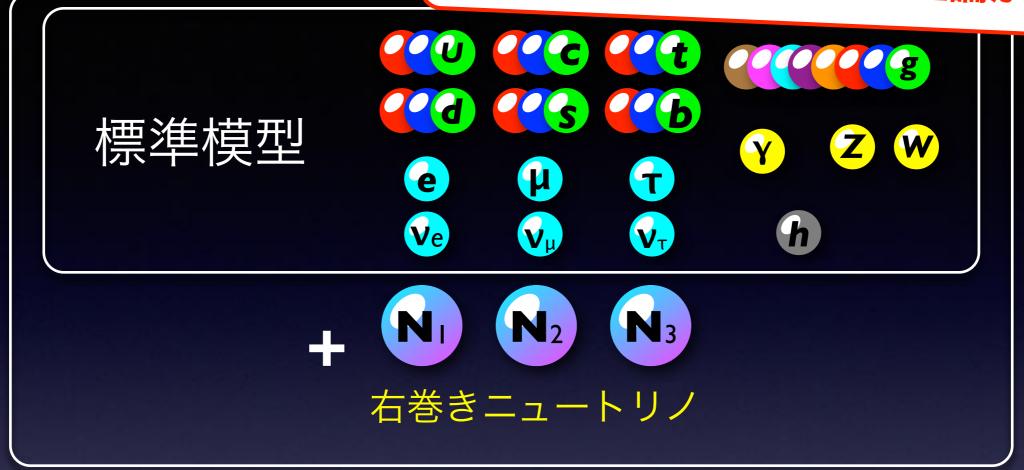
標準模型のCPの破れでは足りない。

理由2:物質>反物質に必要な非平衡が出来ない。

標準模型を超える素粒子理論が必要!

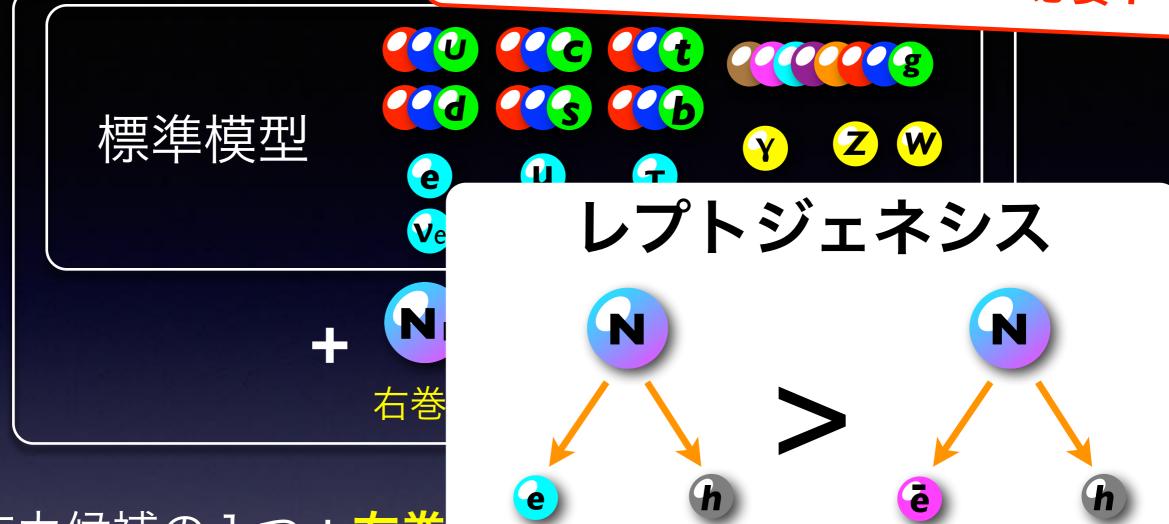


標準模型を超える素粒子理論が必要!



有力候補の1つ: 右巻きニュートリノ

## 標準模型を超える素粒子理論が必要!



• 有力候補の1つ: 右巻

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」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

# 宇宙に残された謎

知ってる物質 (原子)

5%



消えた
反物質の謎

有力候補の1つ: 右巻きニュートリノと レプトジェネシス

暗黒エネルギー 68%

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

知ってる物質 (原子)

5%

消えた
反物質の謎

有力候補の1つ:

右巻きニュートリノと レプトジェネシス

暗黒物質 27%

ここでちょっと寄り道

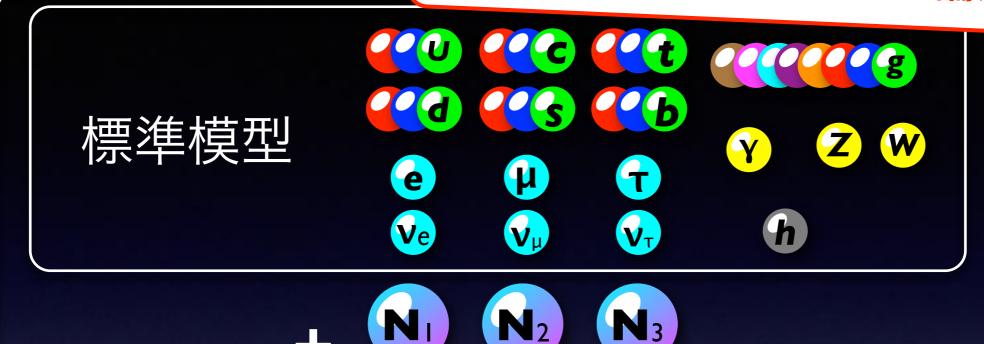
暗黒エネルギー 68%

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

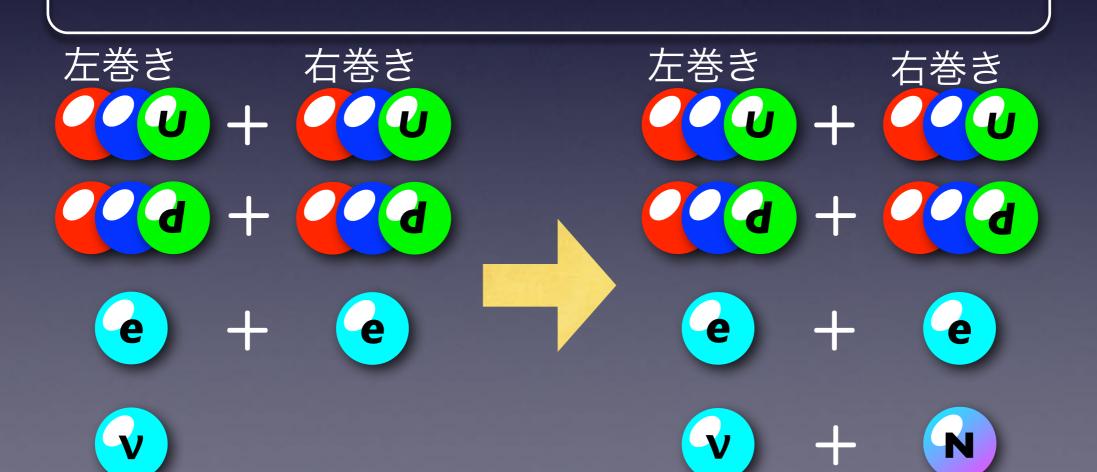




# 標準模型を超える素粒子理論が必要!



右巻きニュートリノ





① クォーク・レプトンが統一

標準模型によると・・・

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

```
 \begin{pmatrix} 200 \\ 200 \end{pmatrix} L \begin{pmatrix} 200 \\ 200 \end{pmatrix} R \begin{pmatrix} 3,2 \end{pmatrix} + 1/6 \begin{pmatrix} 3,1 \end{pmatrix} - 2/3 \begin{pmatrix} 3,1 \end{pmatrix} + 1/3 \begin{pmatrix} 3
```



① クォーク・レプトンが統一

```
標準模型によると・・・
SU(3) × SU(2) × U(1)

((3,2)+1/6 (3,1)-2/3 (3,1)+1/3 (1,2)-1/2 (1,1)+1

強い力を受ける
強い力を受ける
強い力を受けない
```



① クォーク・レプトンが統一

標準模型によると・・・ SU(3) × SU(2) × U(1)

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{C} \end{pmatrix} L \quad \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{C} \end{pmatrix} R \quad \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{C} \end{pmatrix} L \quad \begin{pmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{C} \end{pmatrix} R$$

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

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



① クォーク・レプトンが統一

標準模型によると・・・  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  $\begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e} \end{pmatrix} \mathbf{e} \begin{pmatrix} \mathbf{e}$  $(3,1)_{-2/3}$   $(3,1)_{-1/3}$   $(1,2)_{-1/2}$  $(I,I)_{+I}$ (3,2) 176 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

電弱ハイパー電荷 (電荷みたいなもの)



① クォーク・レプトンが統一

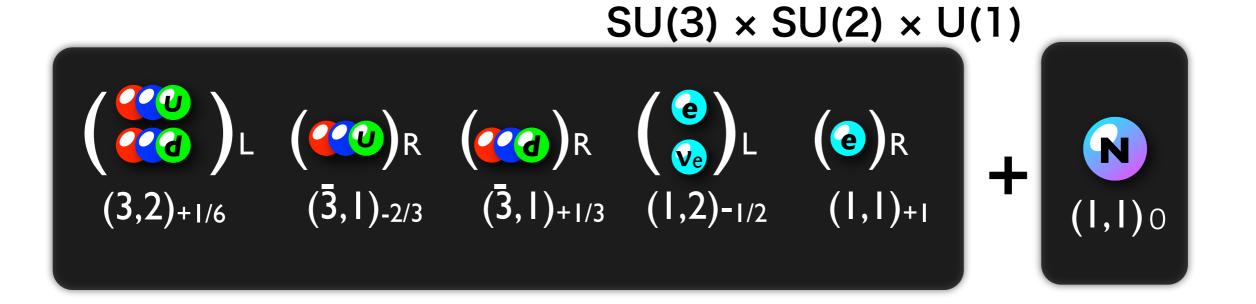
標準模型によると・・・  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  $\begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e} \end{pmatrix} \mathbf{k}$   $\begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e} \end{pmatrix} \mathbf{k}$   $\begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e} \end{pmatrix} \mathbf{k}$  $(3,1)_{-2/3}$   $(3,1)_{-1/3}$   $(1,2)_{-1/2}$  $(I,I)_{+I}$ (3,2) 176 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

電弱ハイパー電荷

(電荷みたいなもの) ・ ・ なんかバラバラ!



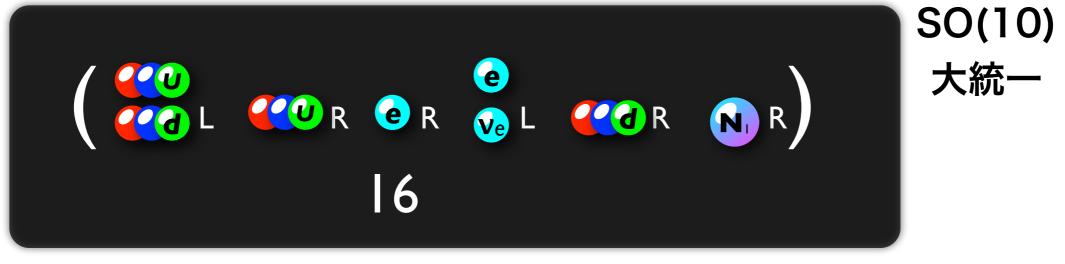
① クォーク・レプトンが統一





① クォーク・レプトンが統一

```
SU(3) \times SU(2) \times U(1)
(3,2)_{+1/6} \quad (3,1)_{-2/3} \quad (3,1)_{+1/3} \quad (1,2)_{-1/2} \quad (1,1)_{+1}
```

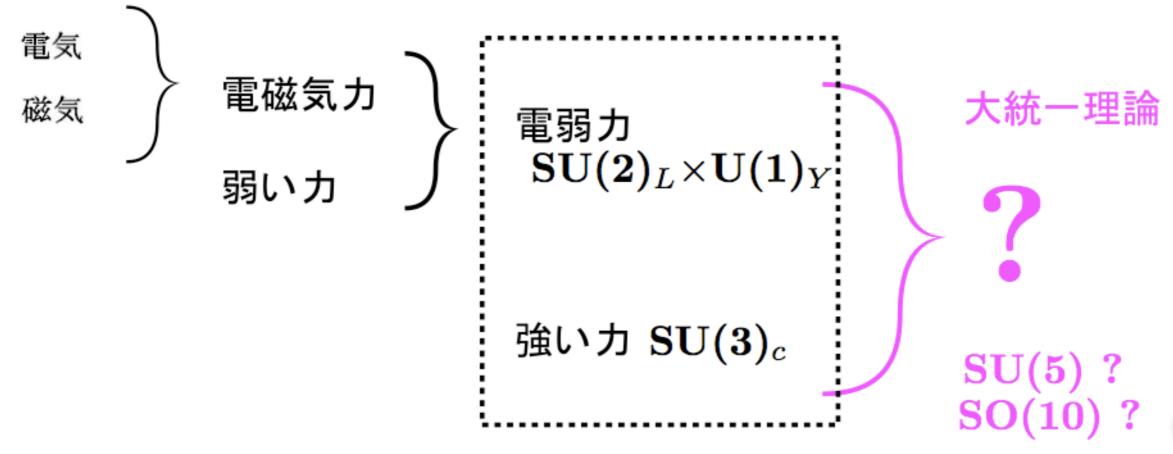


① クォーク・レプトンが統一

```
(\uparrow\downarrow\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow)
(\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\downarrow)
(\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\downarrow)
(\downarrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow)
(\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow)
 (\downarrow\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow)
(\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow)
(\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\uparrow)
(\uparrow\uparrow] \downarrow\uparrow\uparrow)
(\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow)
(\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\uparrow)
 (\downarrow\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\uparrow)
(\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow)
(\downarrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow)
 (\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow)
 (\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow)
```

```
\begin{pmatrix} \mathcal{C} \mathcal{C} \\ \mathcal{C} \\ \mathcal{C} \end{pmatrix} L \mathcal{C} \mathcal{C} R \mathcal{C} R \mathcal{C} L \mathcal{C} R \mathcal{C} R
```

① クォーク・レプトンが統一

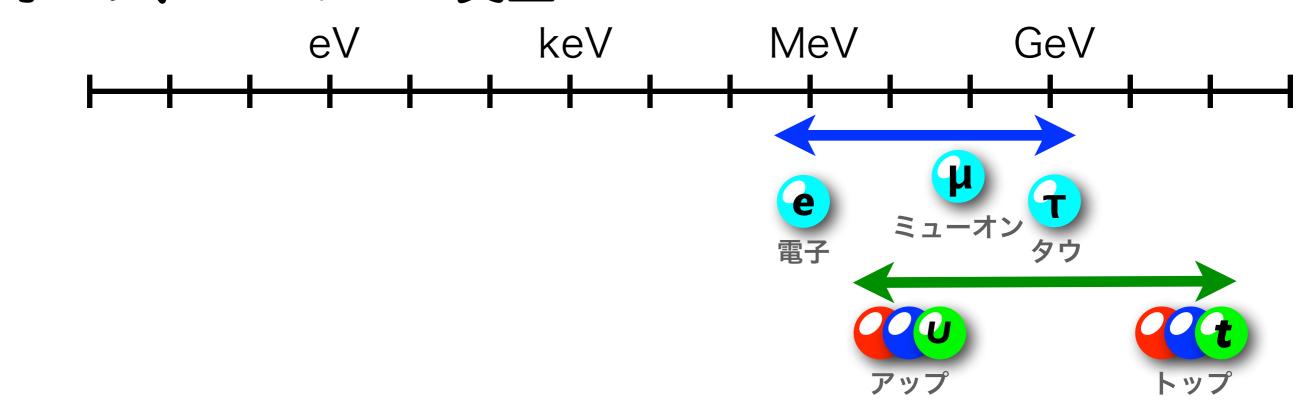


標準模型

- (1) クォーク・レプトンが統一
- ② 小さなニュートリノ質量を説明

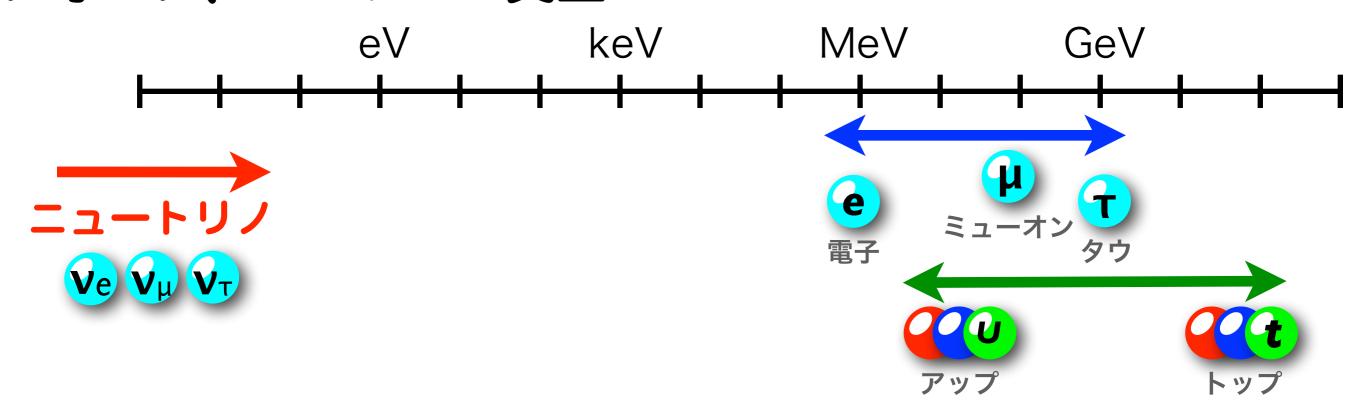
- ① クォーク・レプトンが統一
- ② 小さなニュートリノ質量を説明

#### クォーク、レプトンの質量



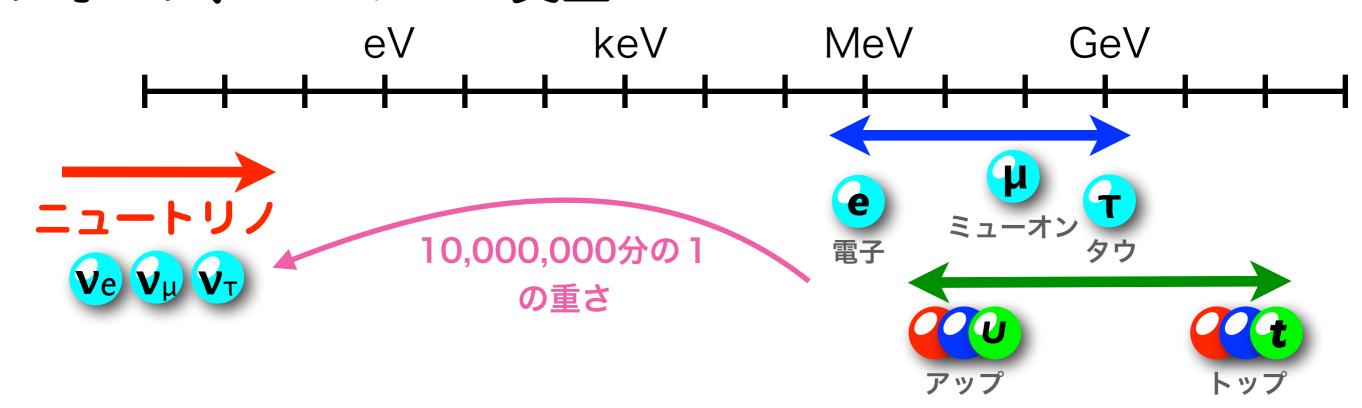
- ① クォーク・レプトンが統一
- ② 小さなニュートリノ質量を説明

#### クォーク、レプトンの質量



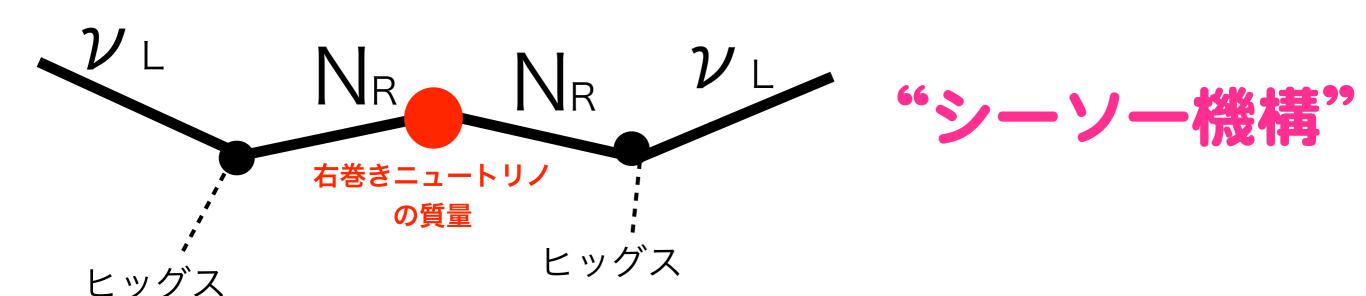
- ① クォーク・レプトンが統一
- ② 小さなニュートリノ質量を説明

#### クォーク、レプトンの質量



• • 何でニュートリノだけこんなに軽いの?

- ① クォーク・レプトンが統一
- ② 小さなニュートリノ質量を説明



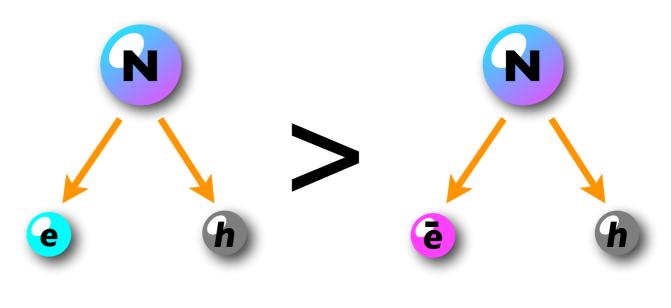
右巻きニュートリノが重い

→ 観測されるニュートリノ質量が軽くなる ("シーソー")



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

レプトジェネシス





# 標準模型を超える物理の動機/ヒント宇宙 素粒子



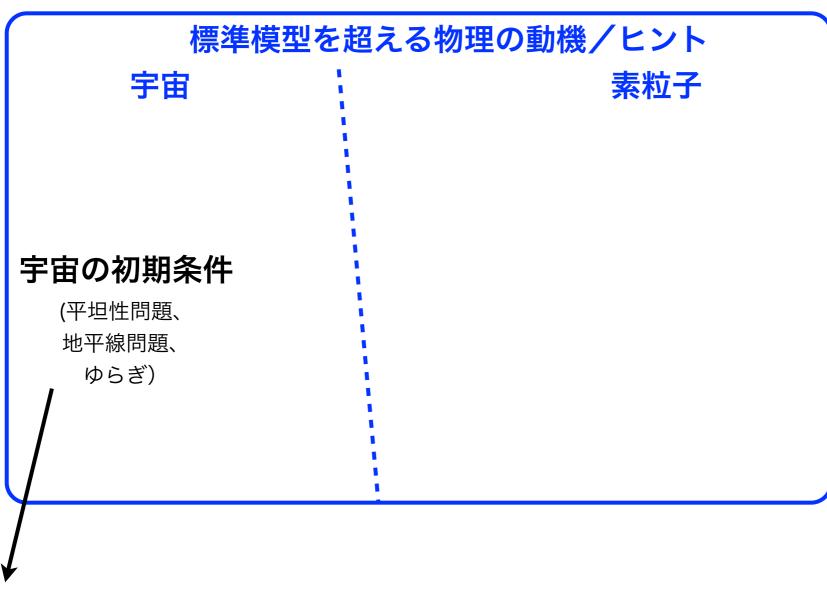
#### 標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙素粒子

#### 宇宙の初期条件

(平坦性問題、 地平線問題、 ゆらぎ)









#### 標準模型を超える物理の動機/ヒント

素粒子

宇宙

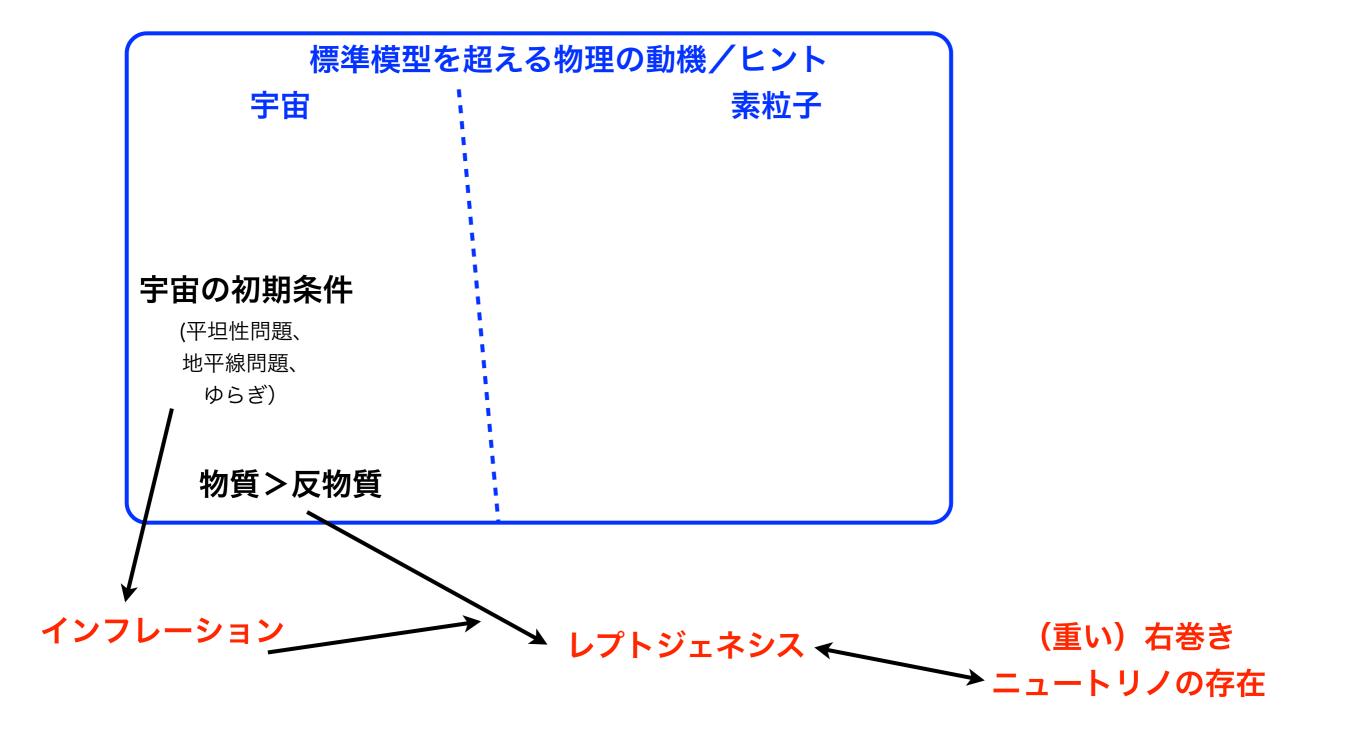
#### 宇宙の初期条件

(平坦性問題、 地平線問題、 ゆらぎ)

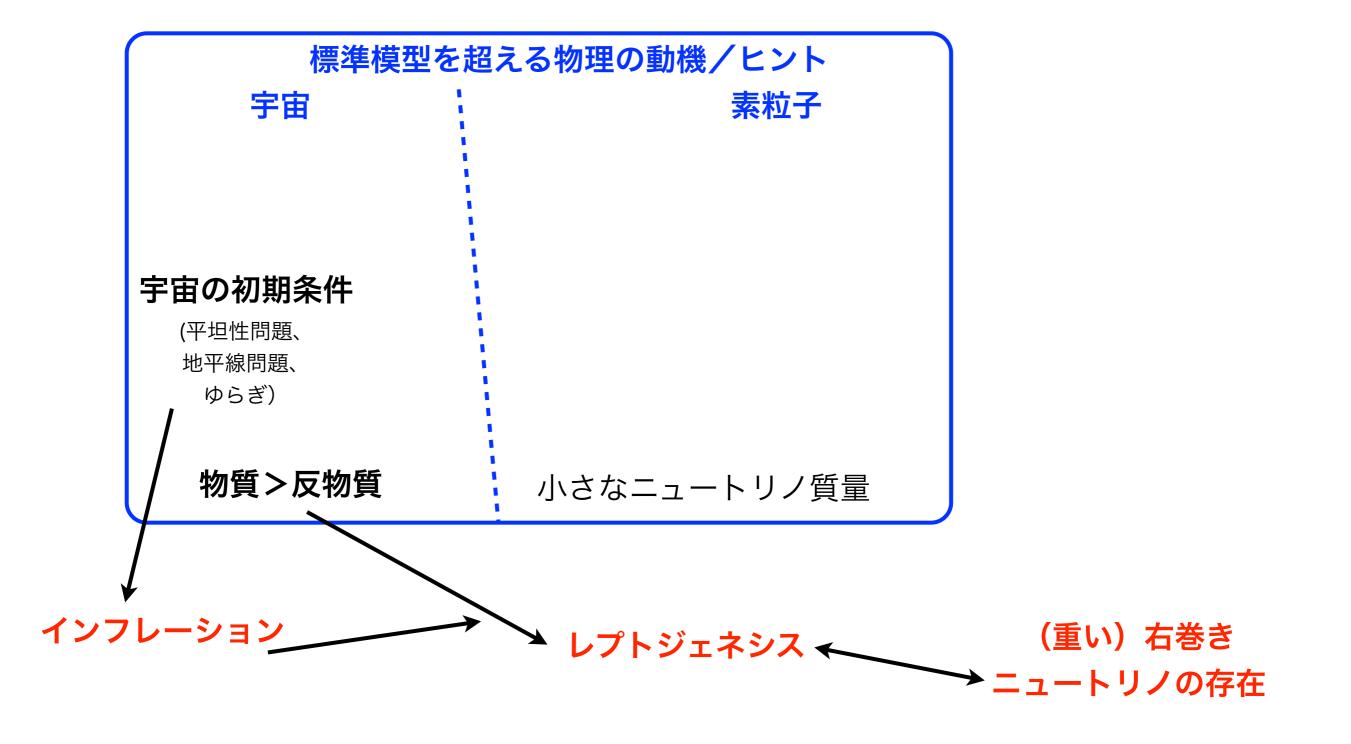
物質>反物質

インフレーション

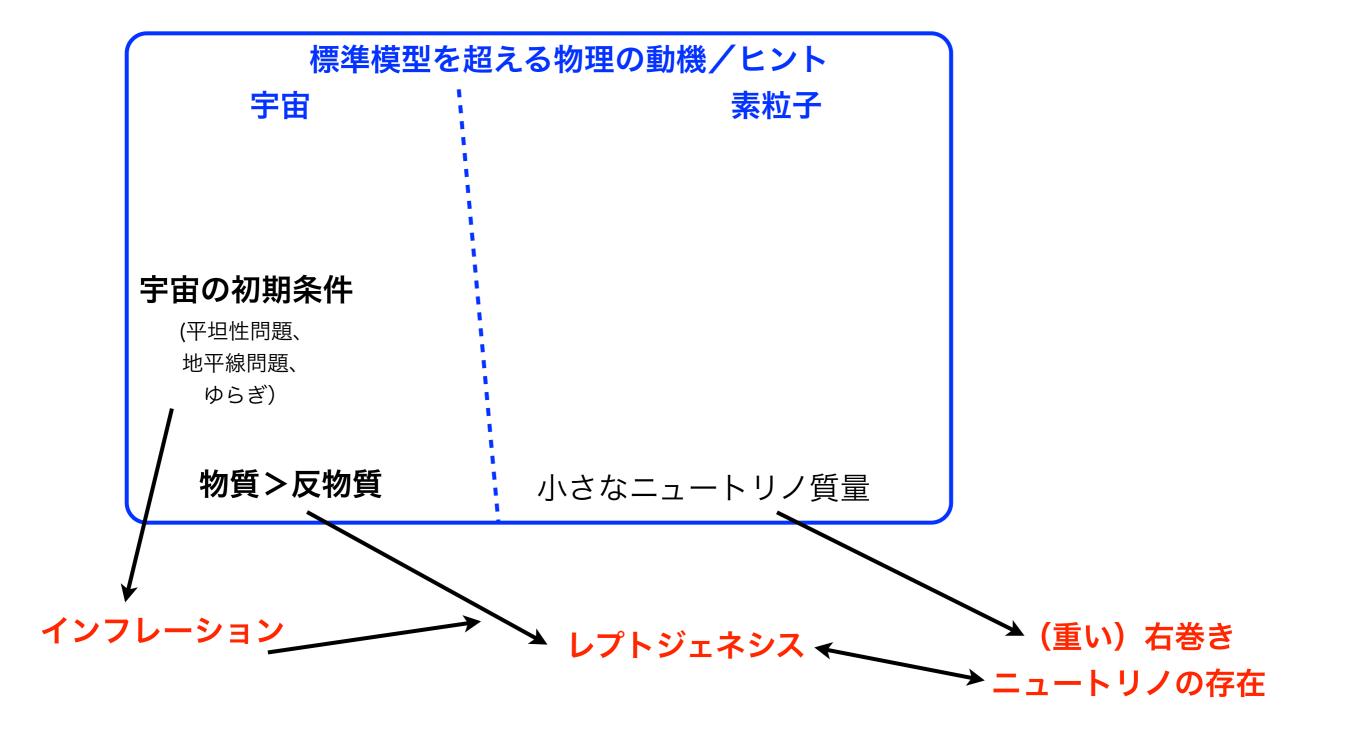




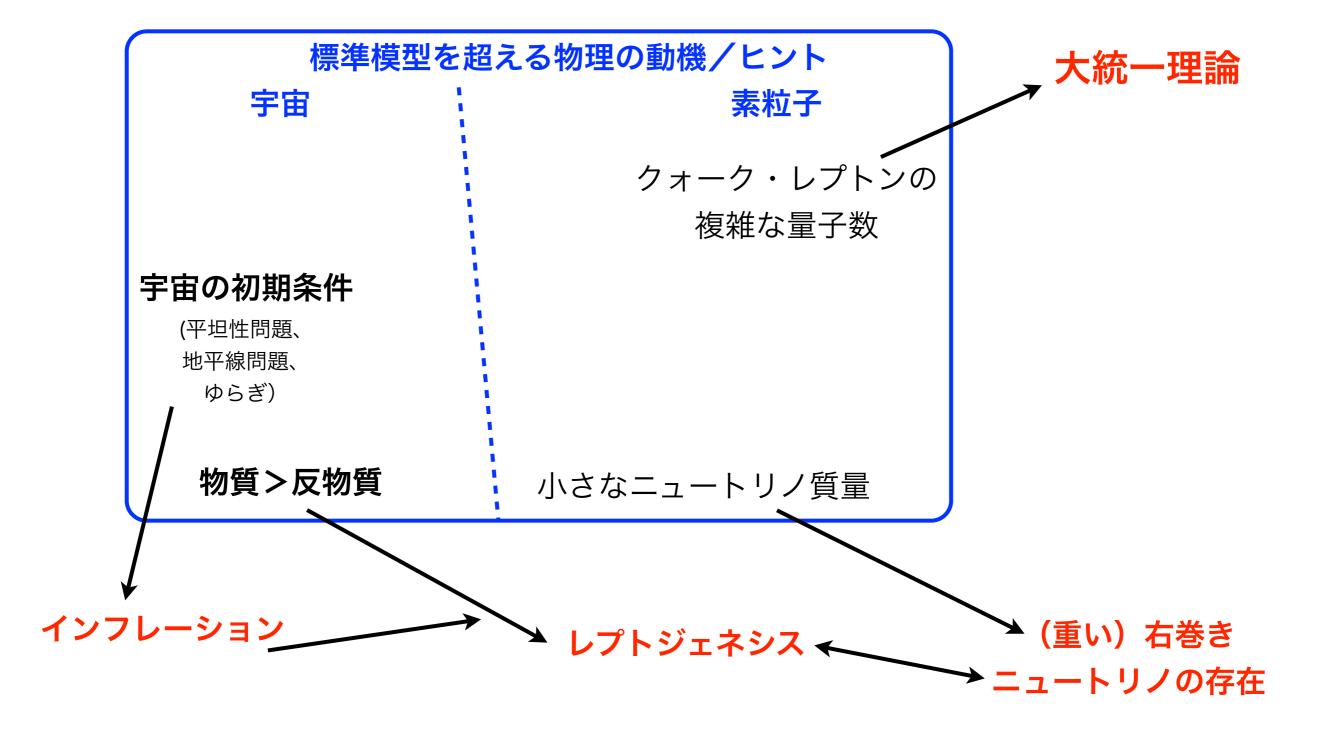




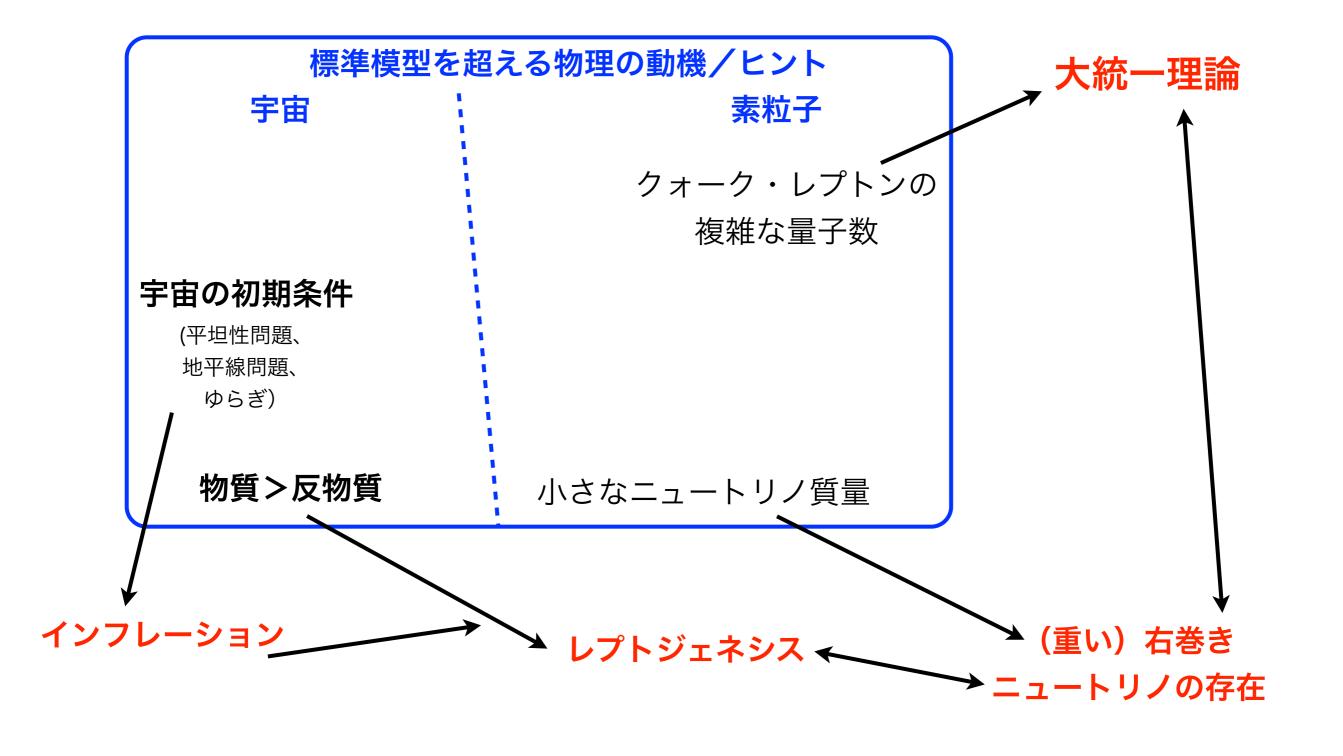




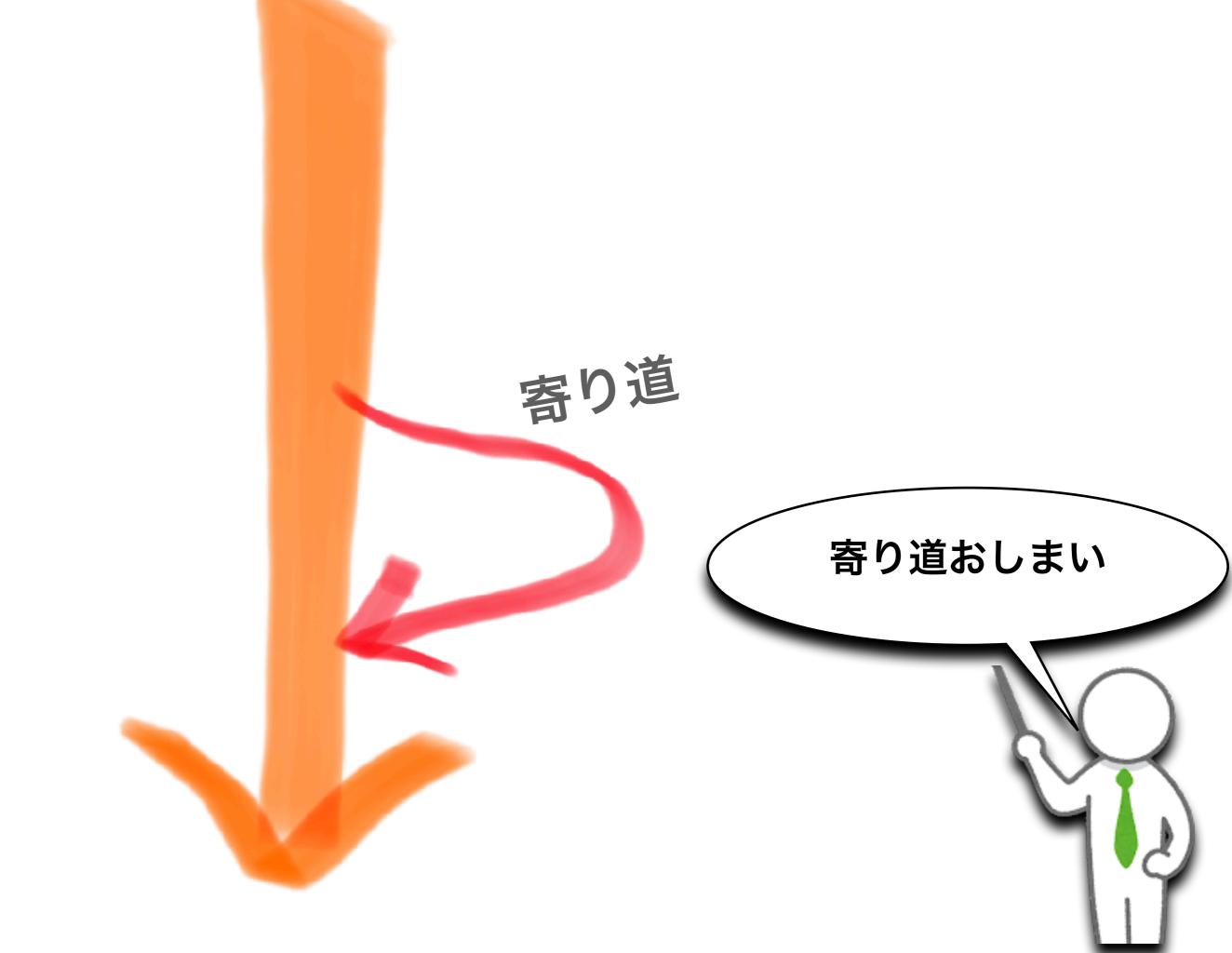












# 宇宙に残された謎

知ってる物質 (原子)

5%



消えた
反物質の謎

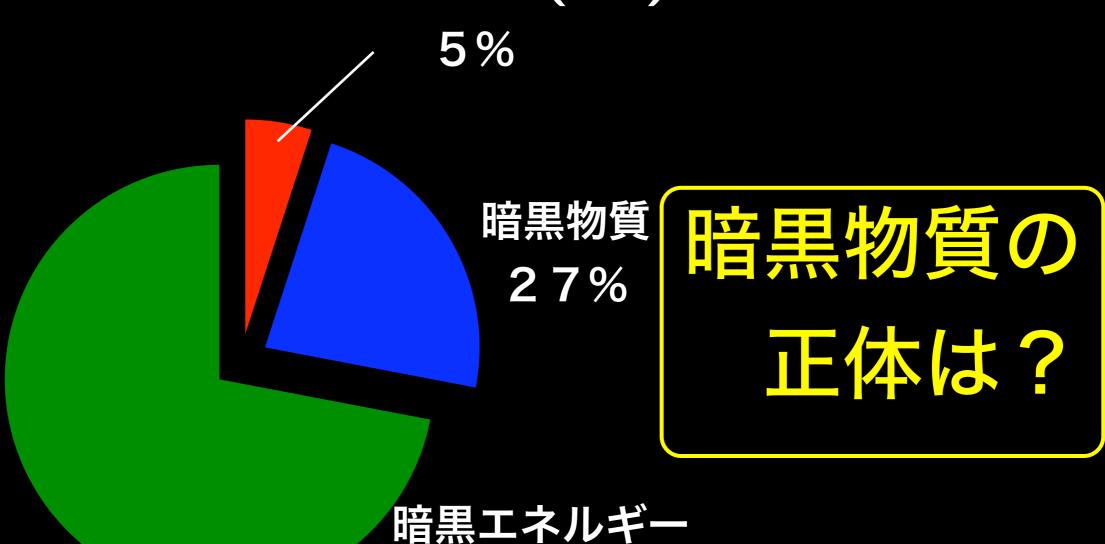
有力候補の1つ: 右巻きニュートリノと レプトジェネシス

暗黒エネルギー 68%

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



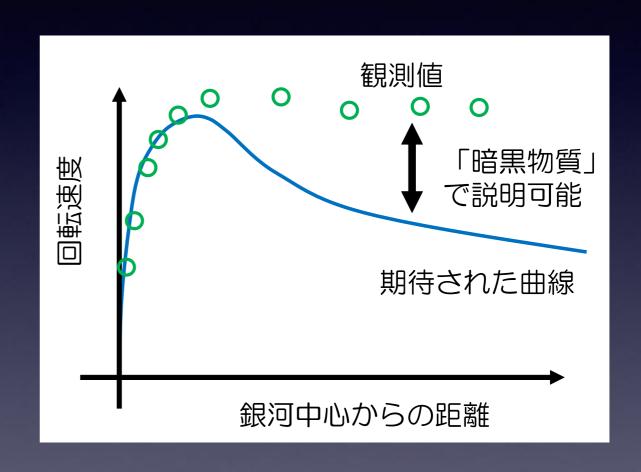


68%

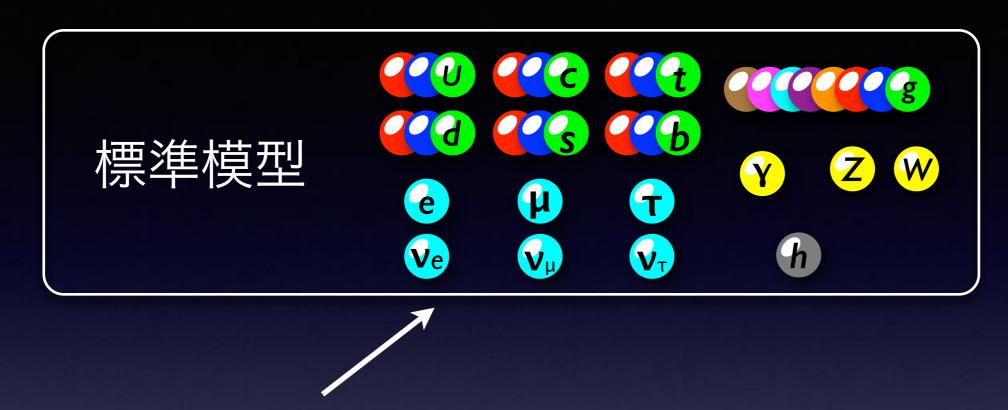
現在の宇宙の エネルギー密度の分配図

### 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・・。

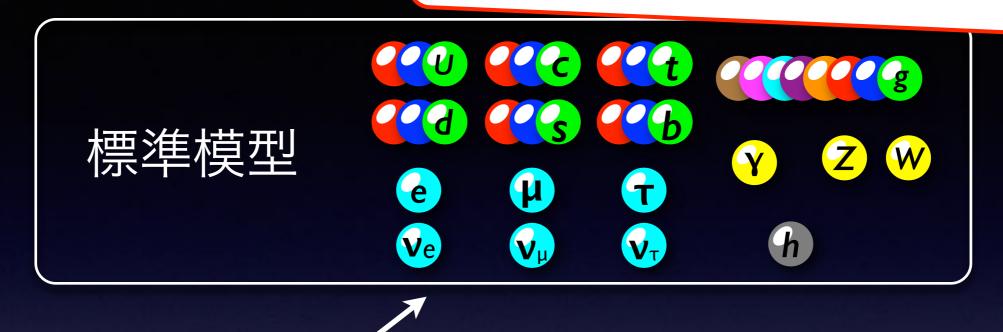


- ・銀河の回転速度
- 宇宙背景放射の非等方性の精密測定
- 宇宙の構造形成
- 弾丸銀河団



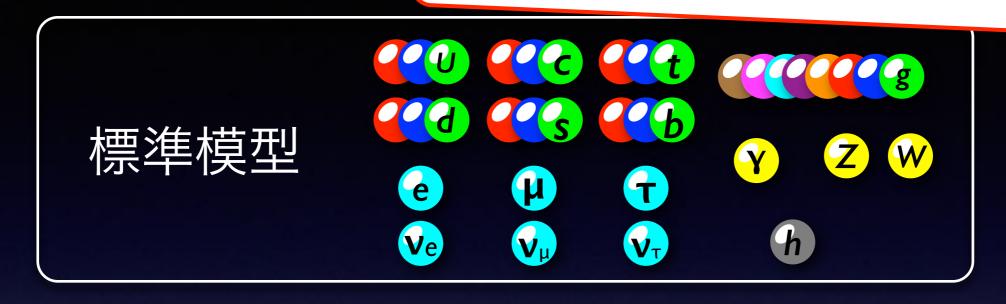
標準模型の中には暗黒物質になれる粒子はない!!

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!!

標準模型を超える素粒子理論が必要!

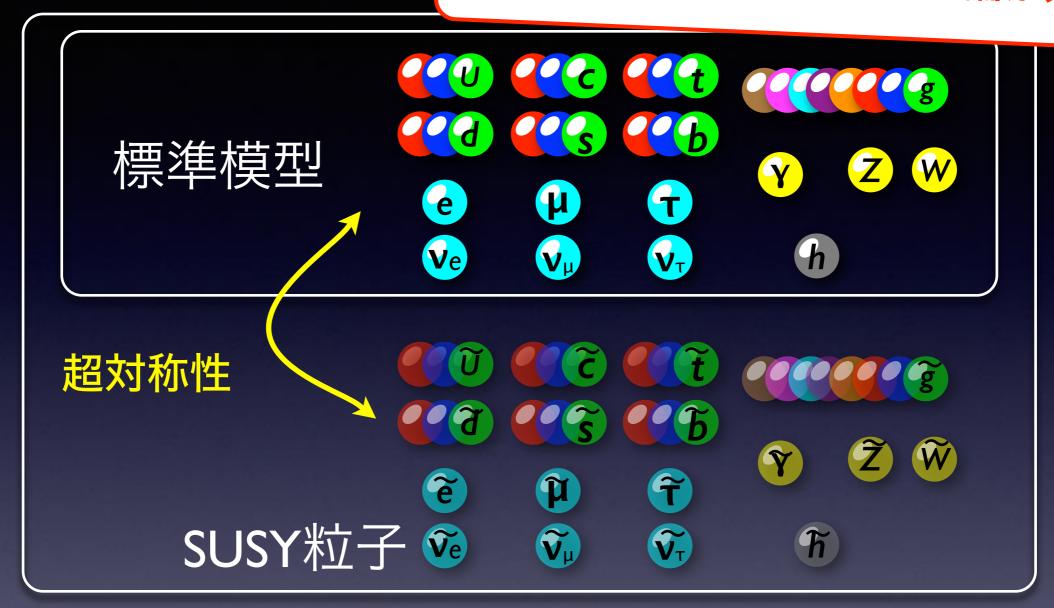


・有力候補の一つ:

超対称性理論 (SUSY)

= ボソンとフェルミオンを入れ替える対称性

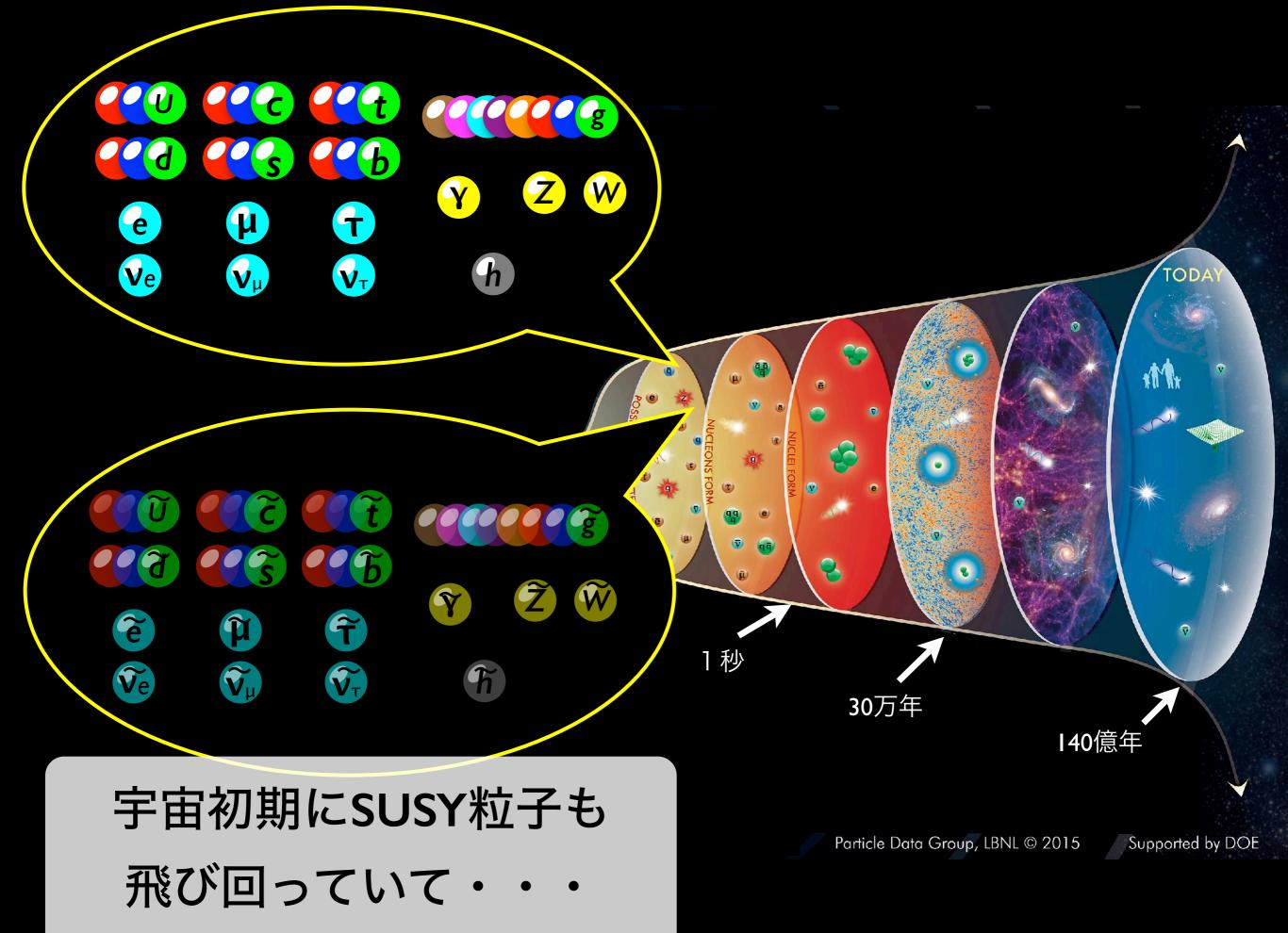
標準模型を超える素粒子理論が必要!

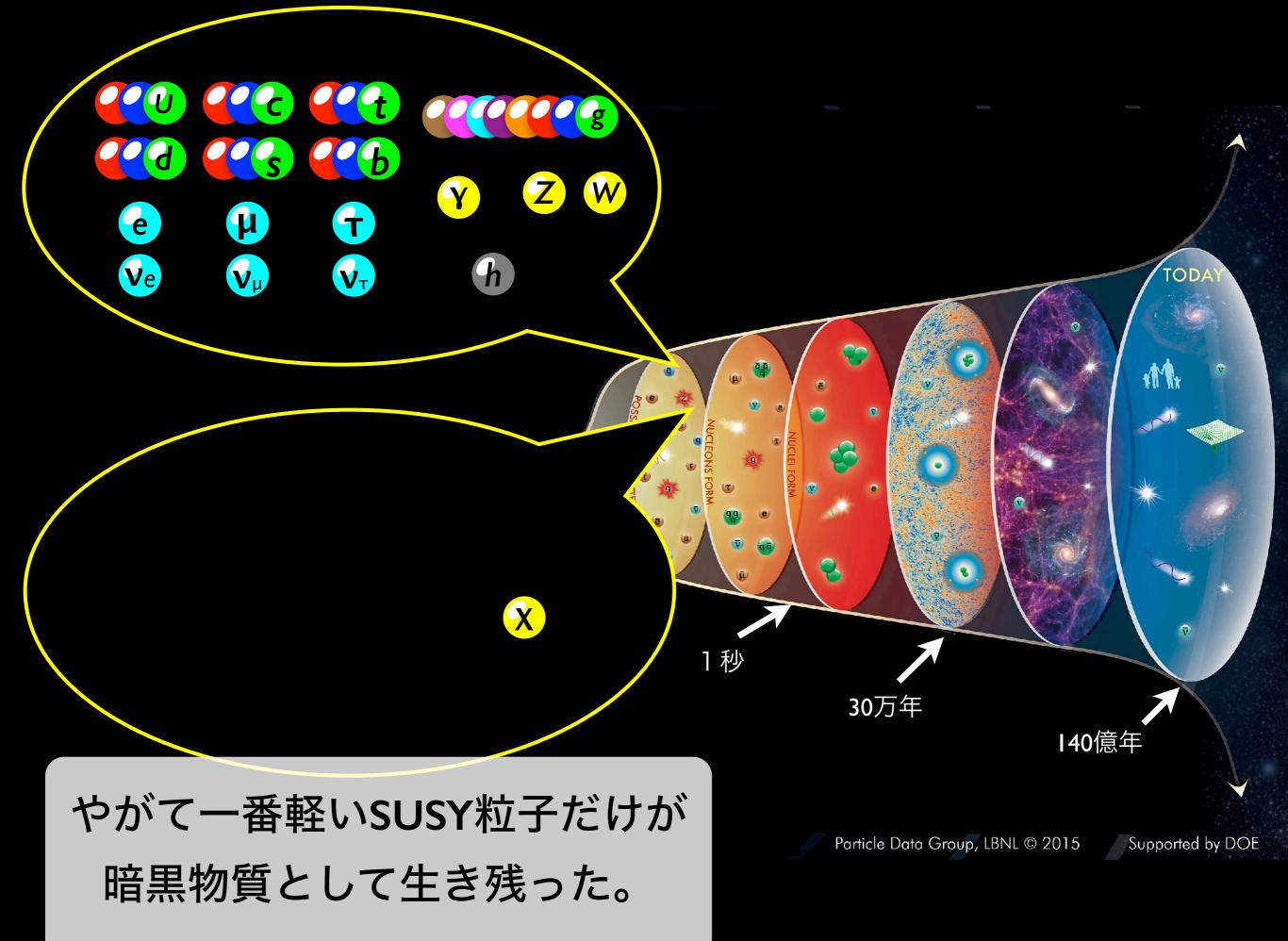


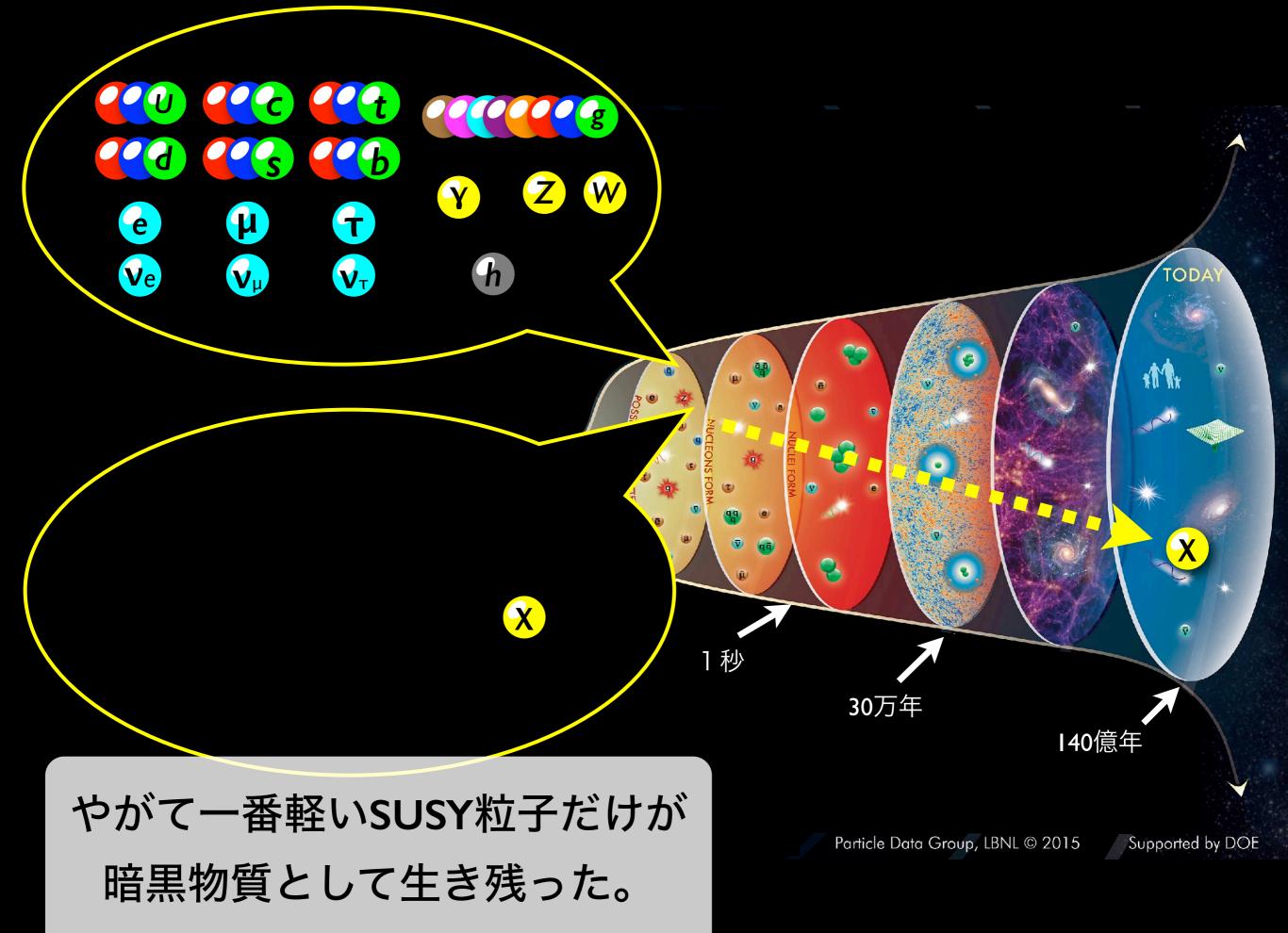
• 有力候補の一つ:

超対称性理論(SUSY)

= ボソンとフェルミオンを入れ替える対称性

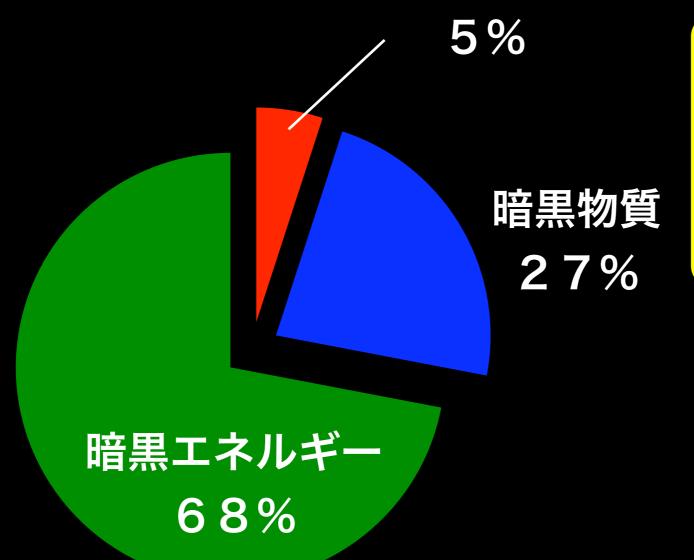






# 宇宙に残された謎

知ってる物質 (原子)

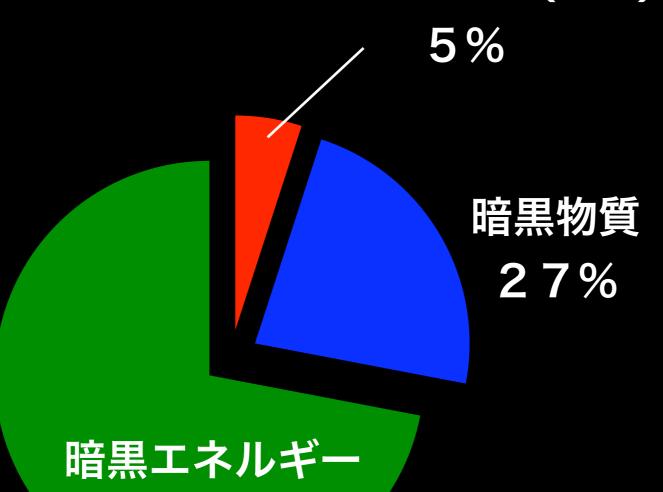


現在の宇宙の エネルギー密度の分配図 暗黒物質の正体は?

有力候補の1つ: 超対称性理論 (SUSY) の 一番軽いSUSY粒子

# 宇宙に残された謎

知ってる物質 (原子)



68%

暗黒物質の正体は?

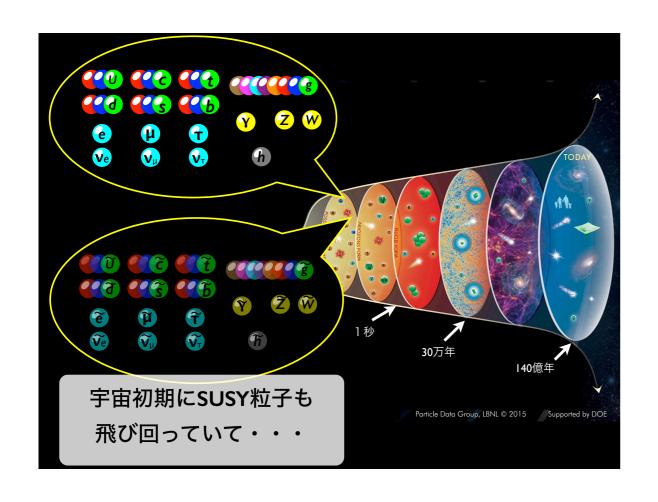
有力候補の1つ: 超対称性理論 (SUSY) の 一番軽いSUSY粒子

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図 ここでまたまた寄り道





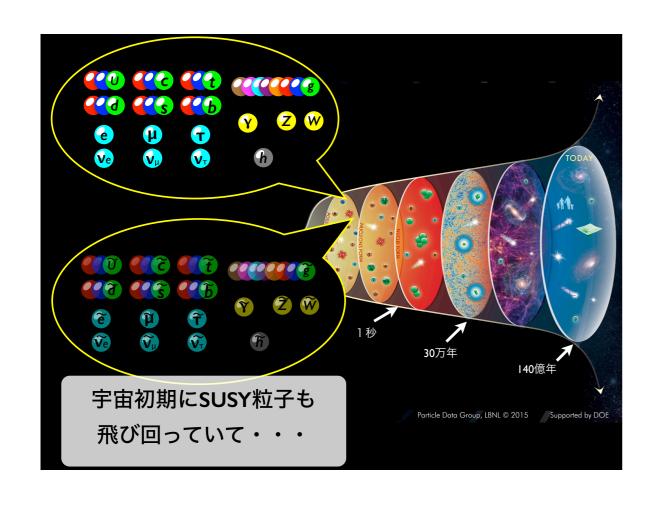
ここでまたまた寄り道



超対称性と言うけれど、、、

暗黒物質を説明するだけのために、、、 ちょっと大げさすぎないか?





超対称性と言うけれど、、、

暗黒物質を説明するだけのために、、、 ちょっと大げさすぎないか?

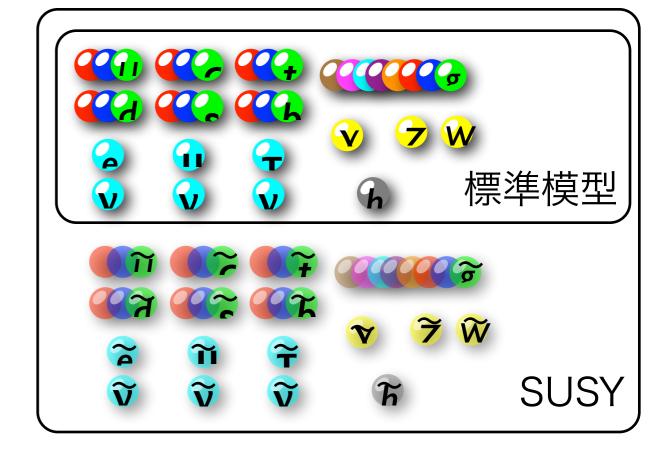
わざわざ粒子の数を





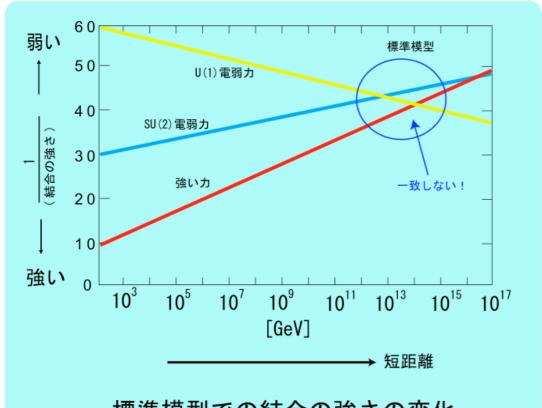
にする必要があるのか?







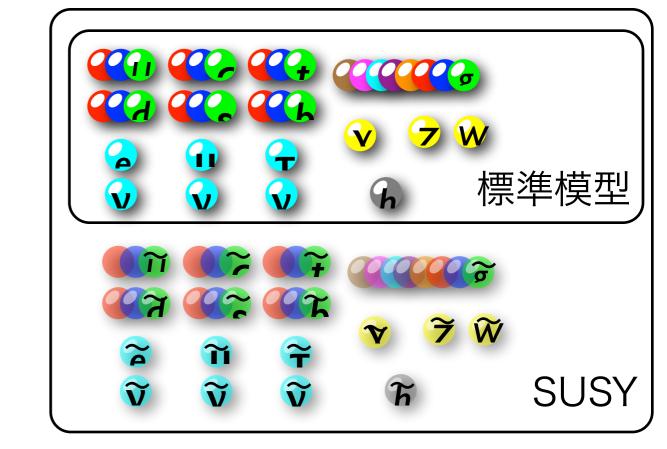
## ① 大統一理論の予言通り、 3つの結合定数が一致

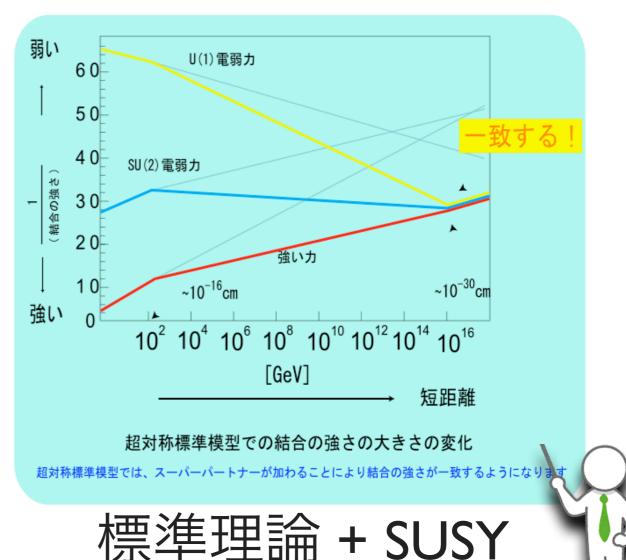


標準模型での結合の強さの変化

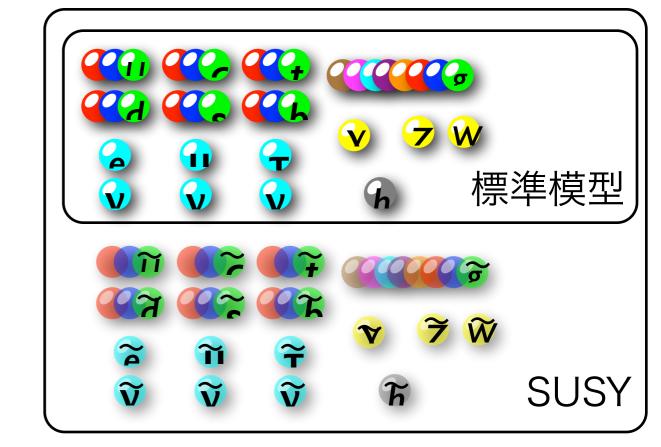
標準模型では短距離にいったときに、結合の強さが一致しません。 このままでは、大統一ができない!

標準理論





① 大統一理論の予言通り、 3つの結合定数が一致



## 2 ヒッグス質量の「不自然さ」を解決

超対称性なし

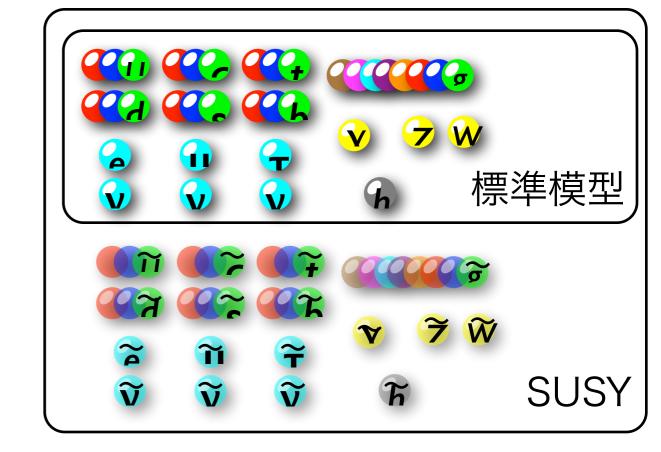
$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + (\Lambda^2 - \Lambda^2)$$
  $\cdots$   $\gamma$ ェルミオン ボゾン

超対称性あり

問題解決!



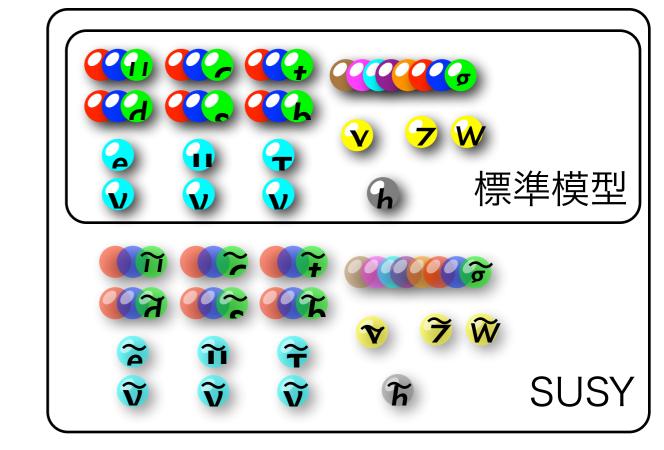
① 大統一理論の予言通り、 3つの結合定数が一致



- 2 ヒッグス質量の「不自然さ」を解決
- 3 暗黒物質の候補がある。

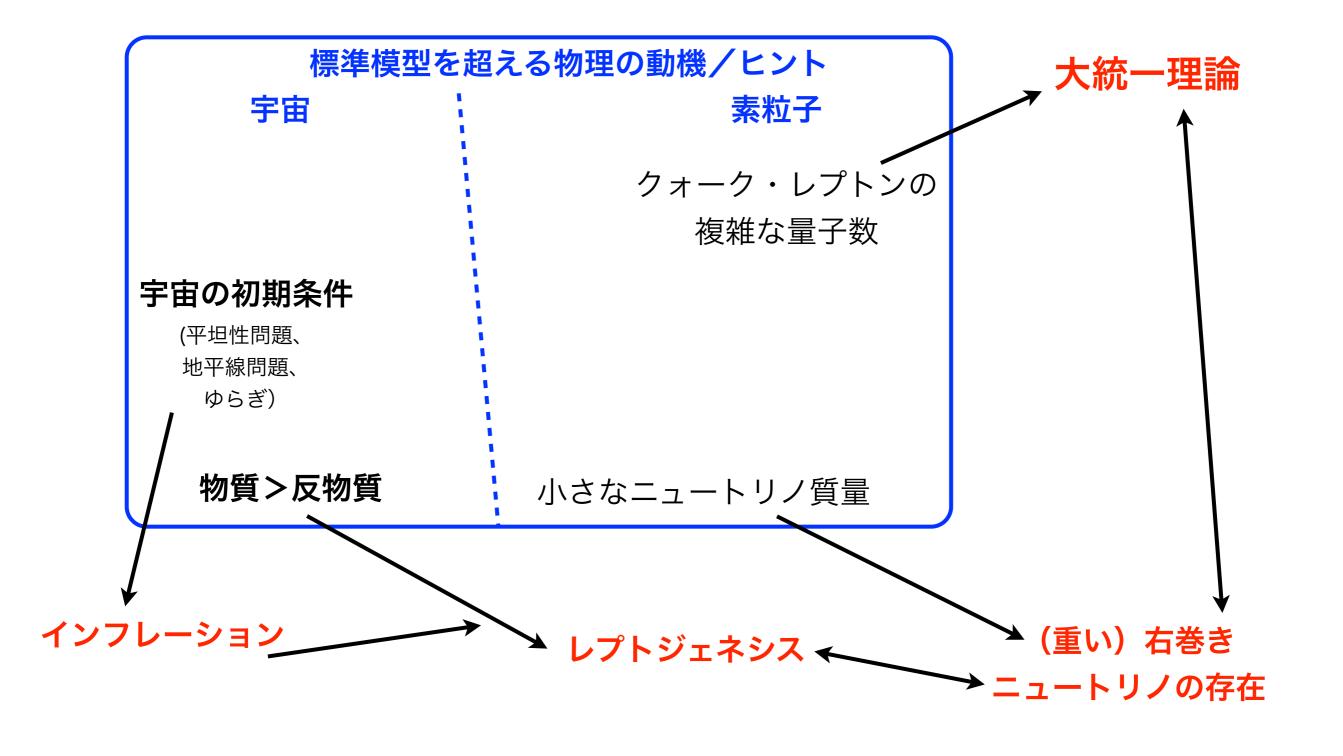


① 大統一理論の予言通り、 3つの結合定数が一致

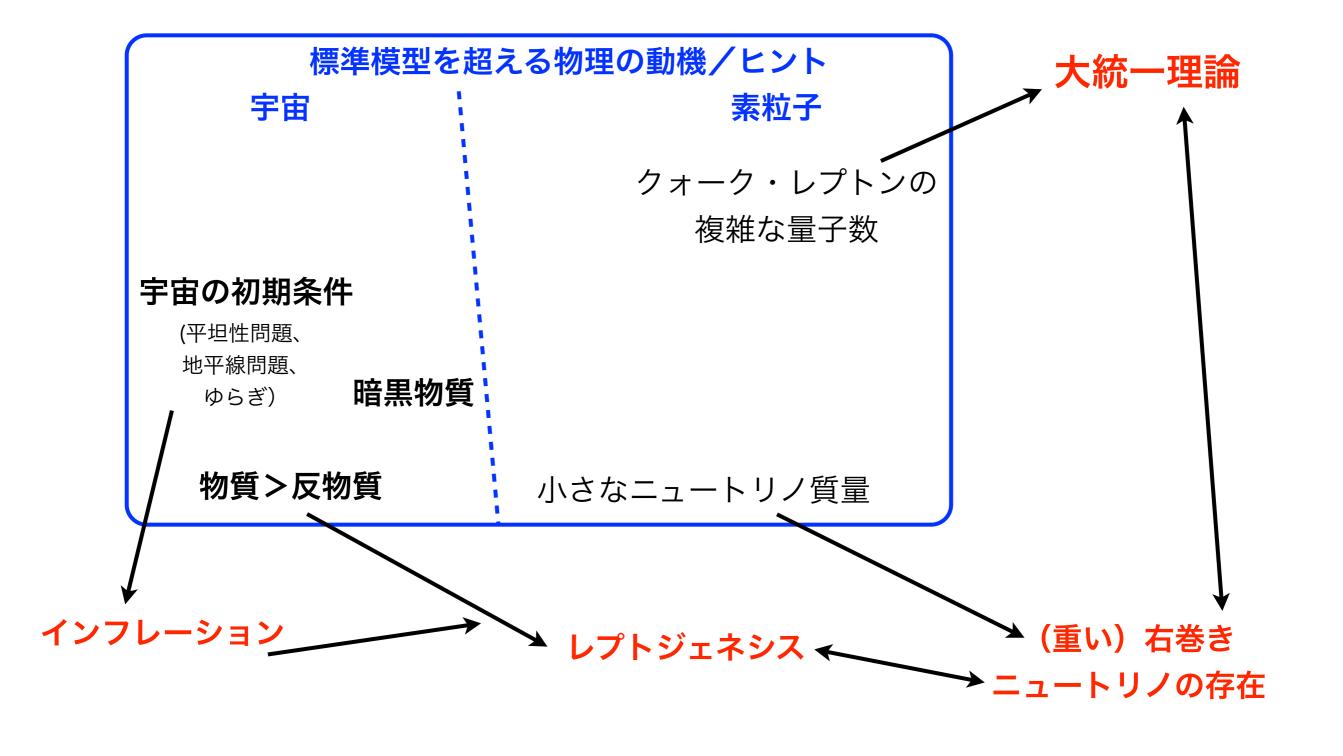


- 2 ヒッグス質量の「不自然さ」を解決
- 3 暗黒物質の候補がある。
- (4) 超ひも理論も超対称性を含んでいる。)

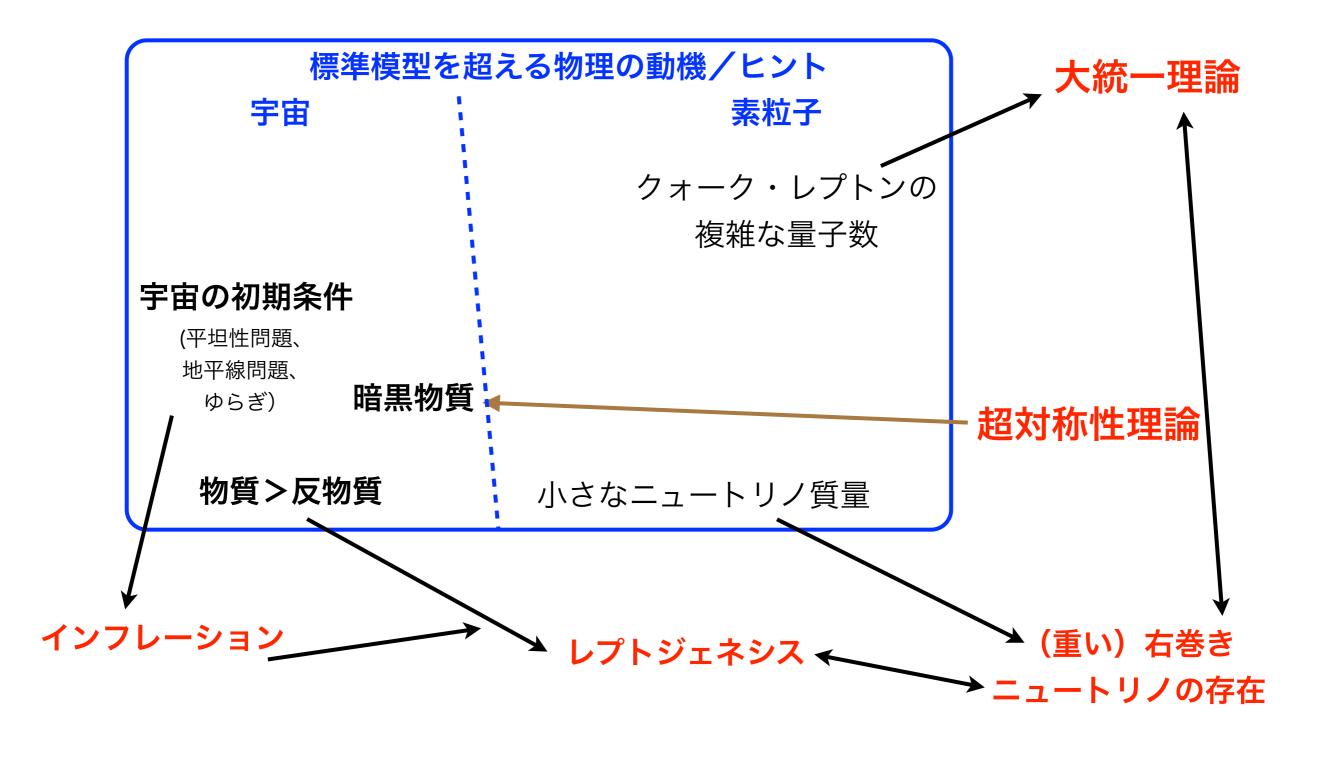




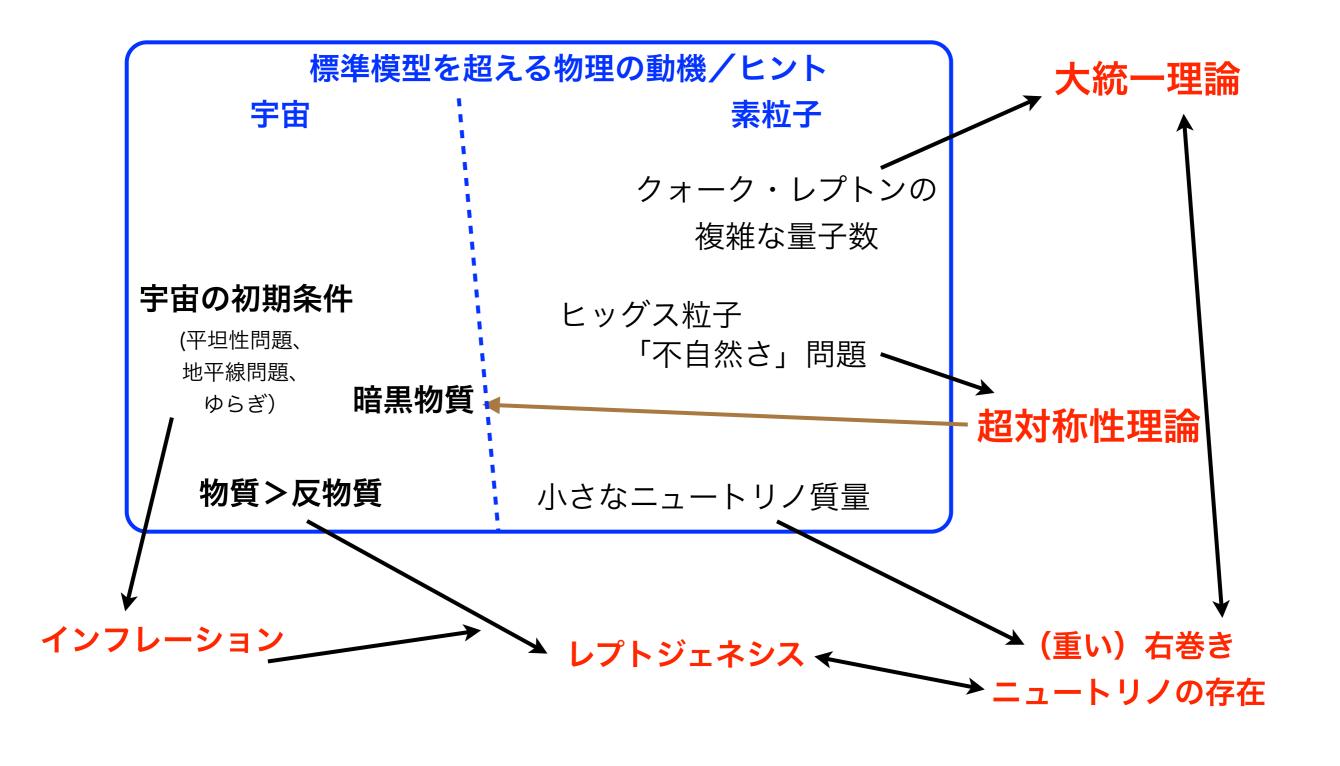




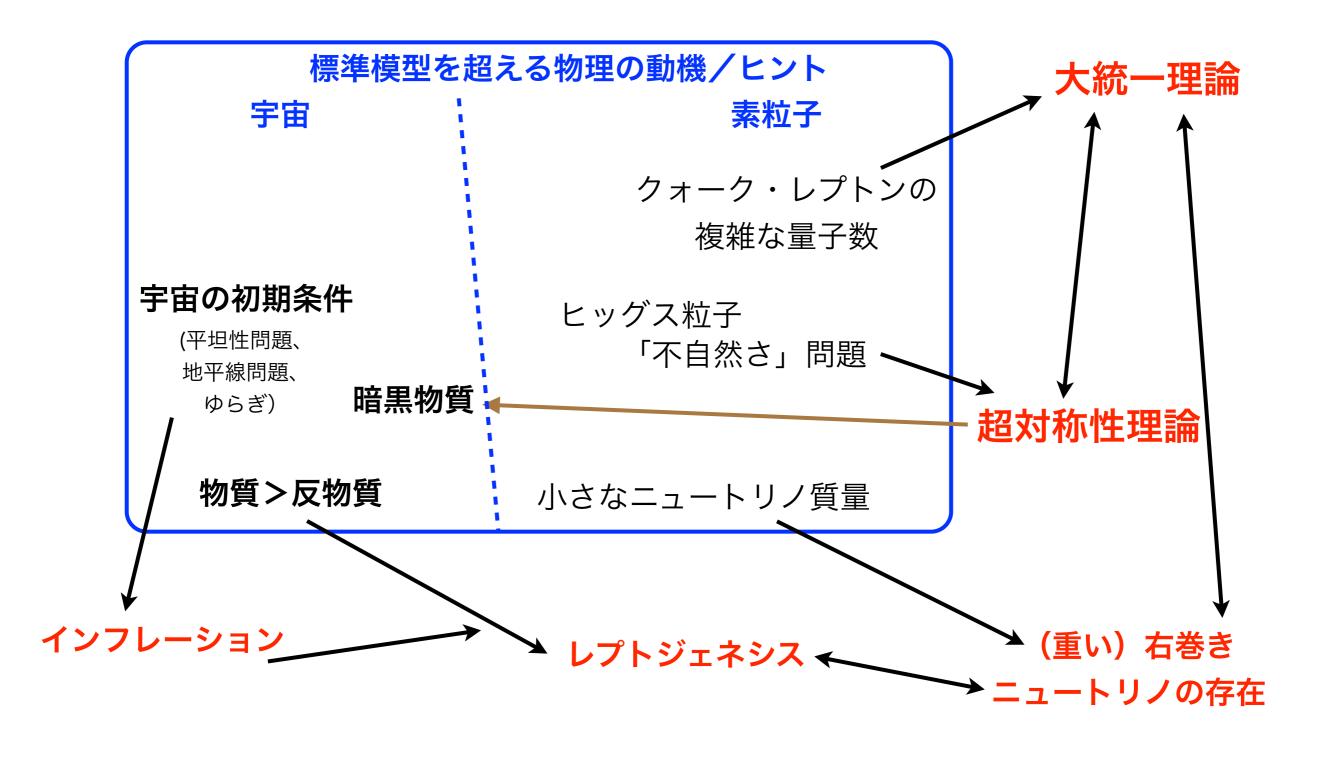




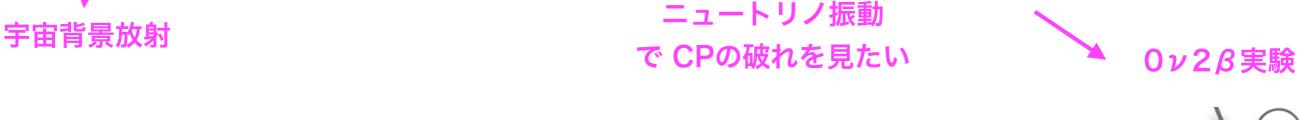






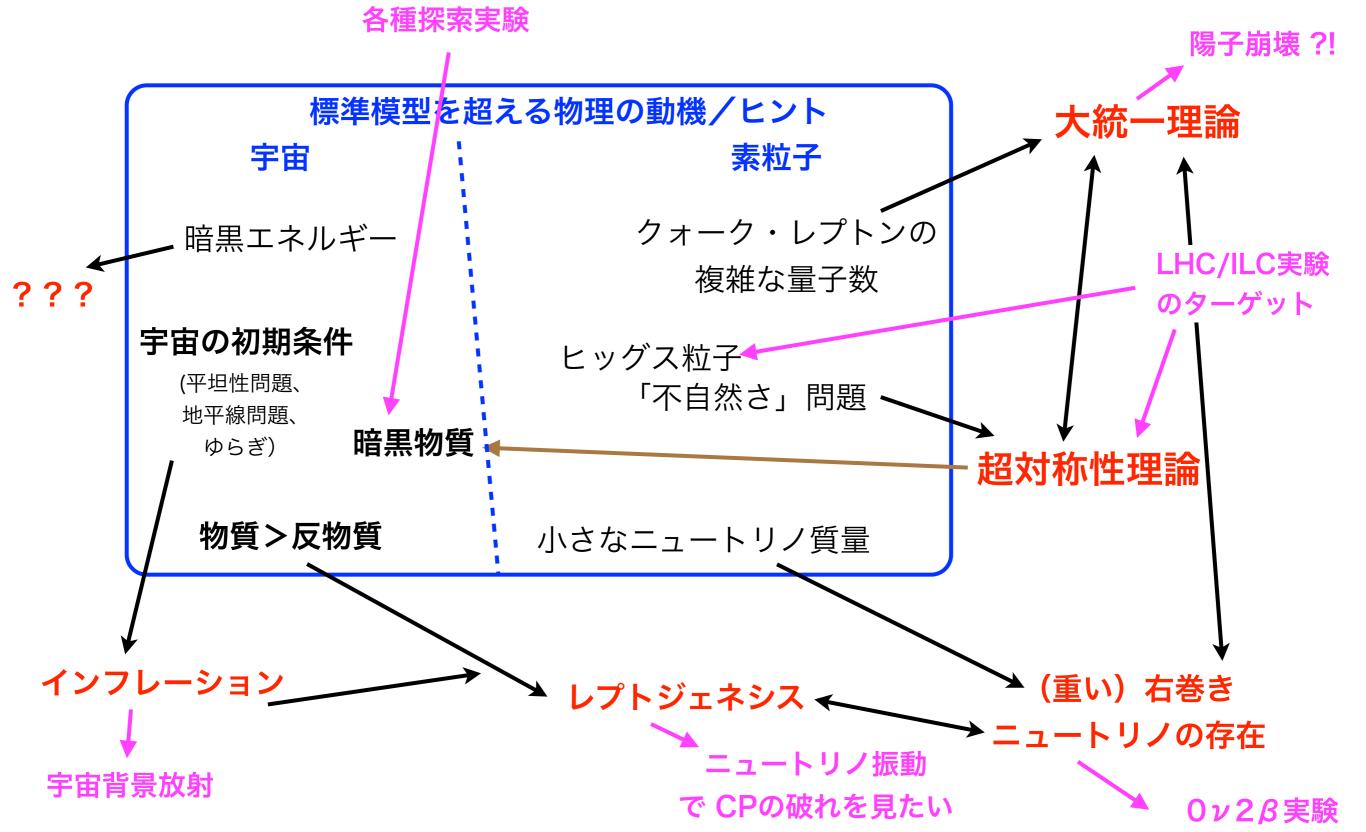




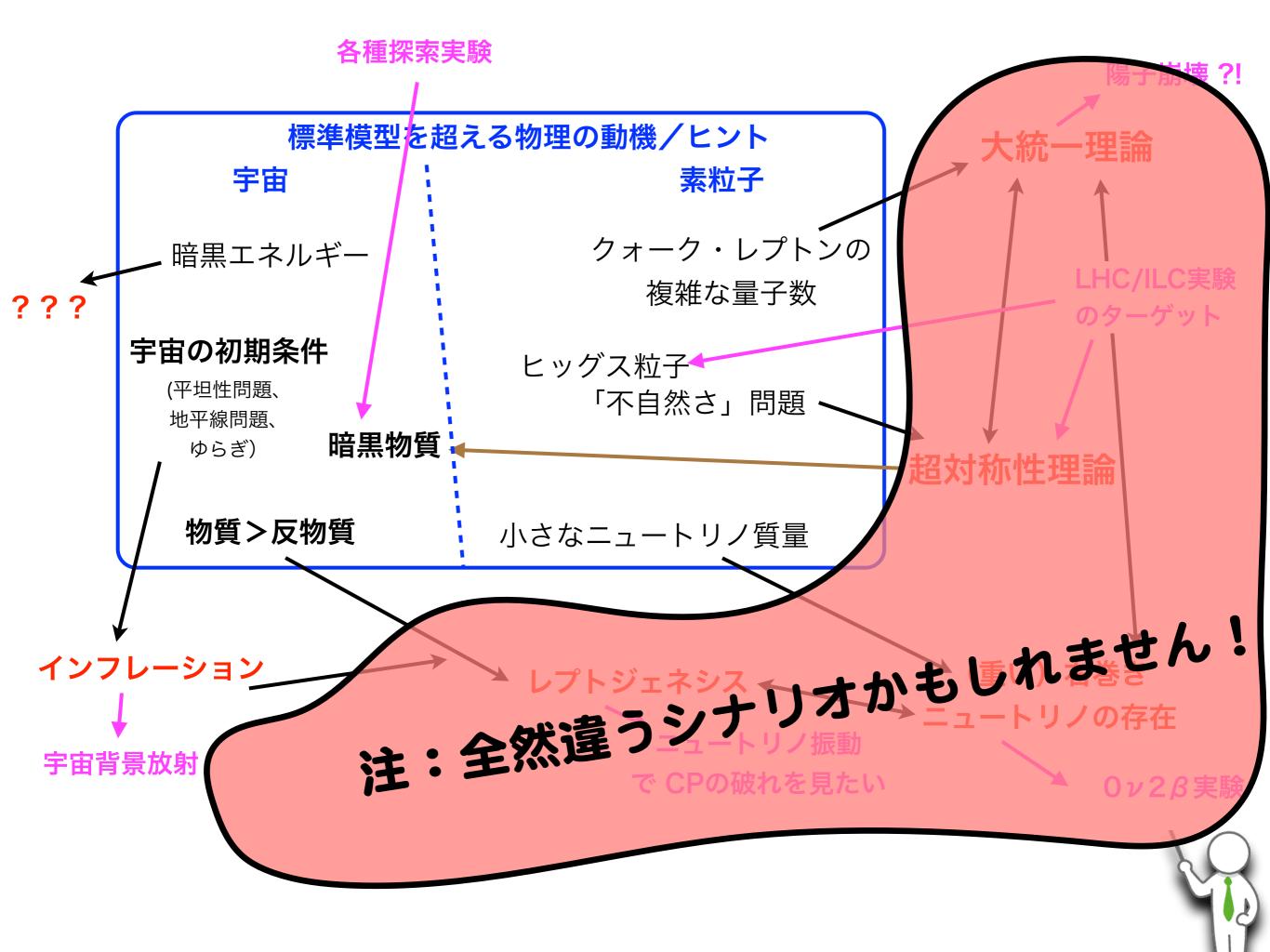




ニュートリノの存在





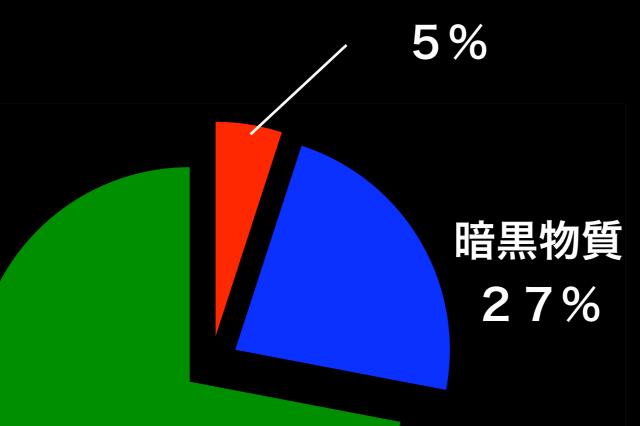


# 寄り道

寄り道おしまい

## 宇宙に残された3つの謎

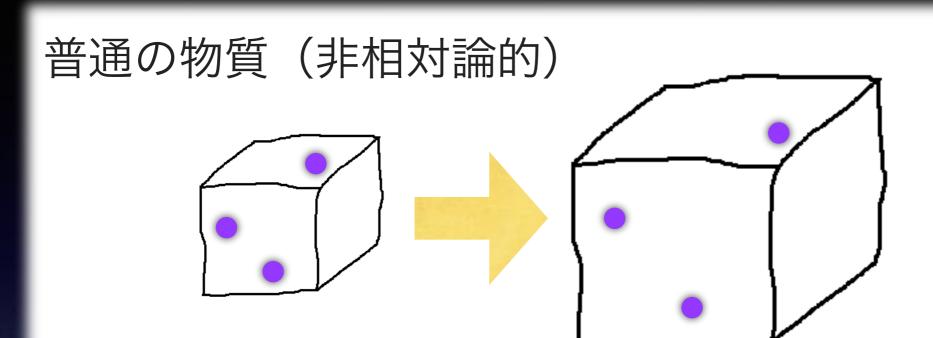




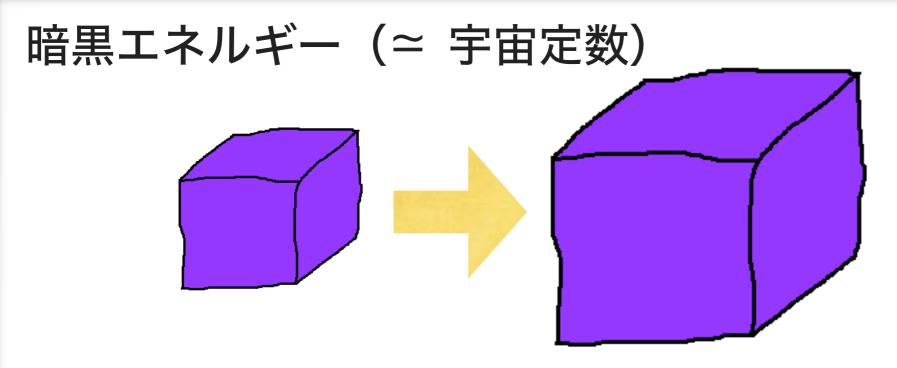
暗黒エネルギー

68%

現在の宇宙の エネルギー密度の分配図 暗黒エネルギーの正体は?



宇宙が膨張して体積が倍になったら密度は半分



宇宙が膨張しても密度が一定

場の量子論で単純に計算して出る値よりも、

観測値が 0.00000000 0000000000

場の量子論で単純に計算して出る値よりも、

場の量子論で単純に計算して出る値よりも、

場の量子論で単純に計算して出る値よりも、

場の量子論で単純に計算して出る値よりも、

00000000 000000

000000000 000000

000000000 000000

00000000000001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?

場の量子論で単純に計算して出る値よりも、

観測値が 0.00000000 0000000000

000000000 000000 000000000 000000

標準模型を超える・・・どころか、 全く新しい枠組みが必要?

00000000000001倍、小さい!

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。

## まとめ

宇宙の謎

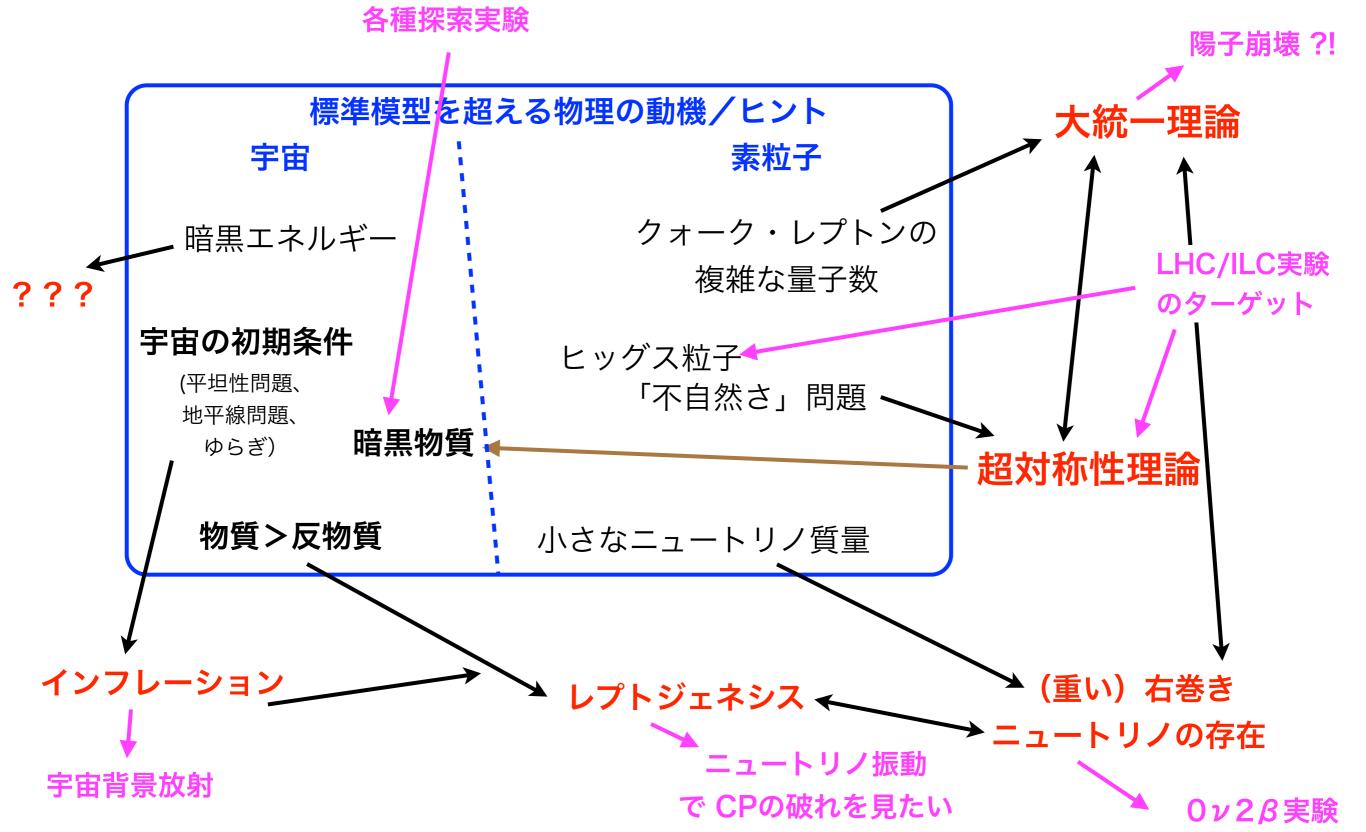


を解くには

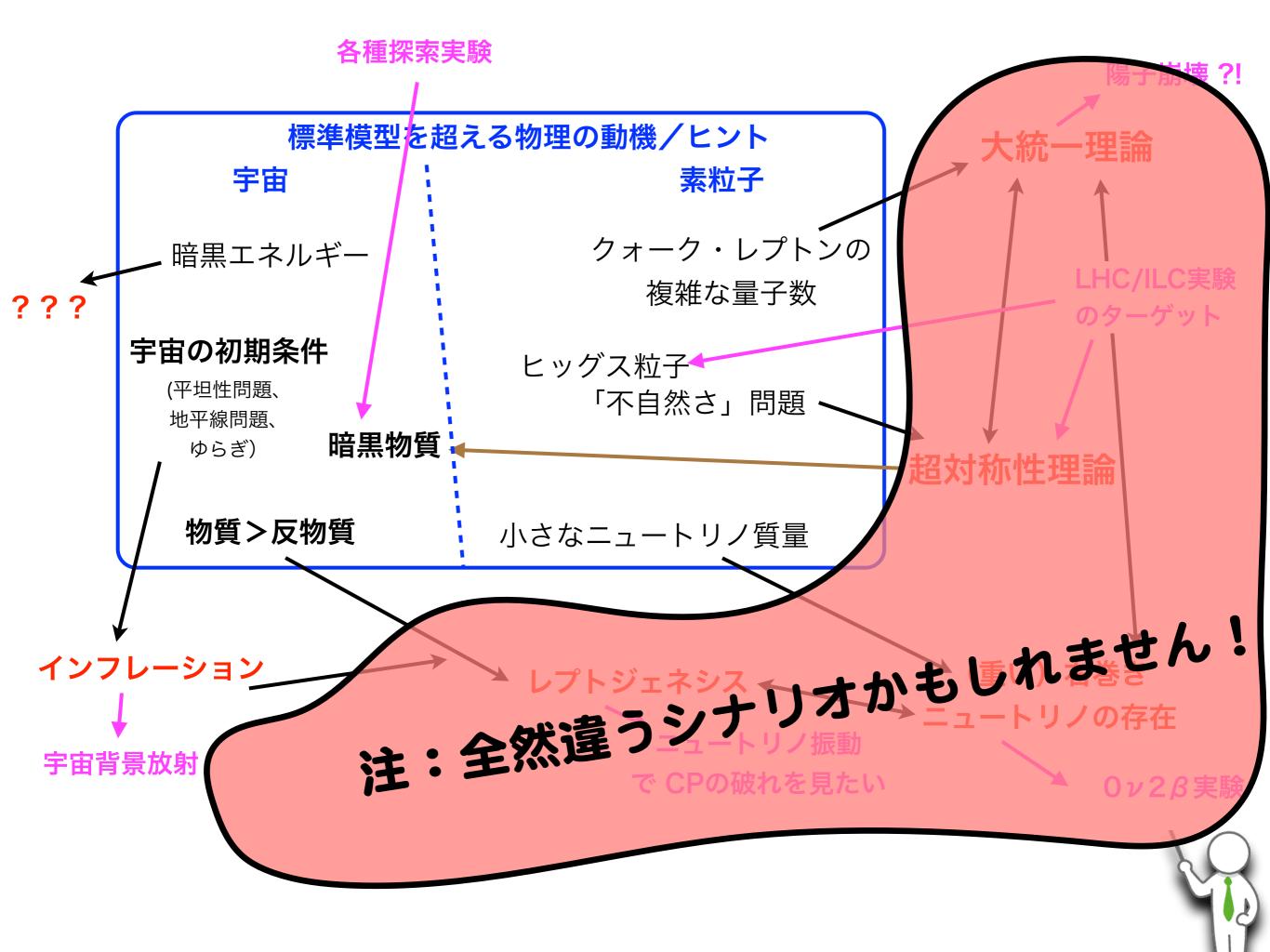
標準模型を超える素粒子理論

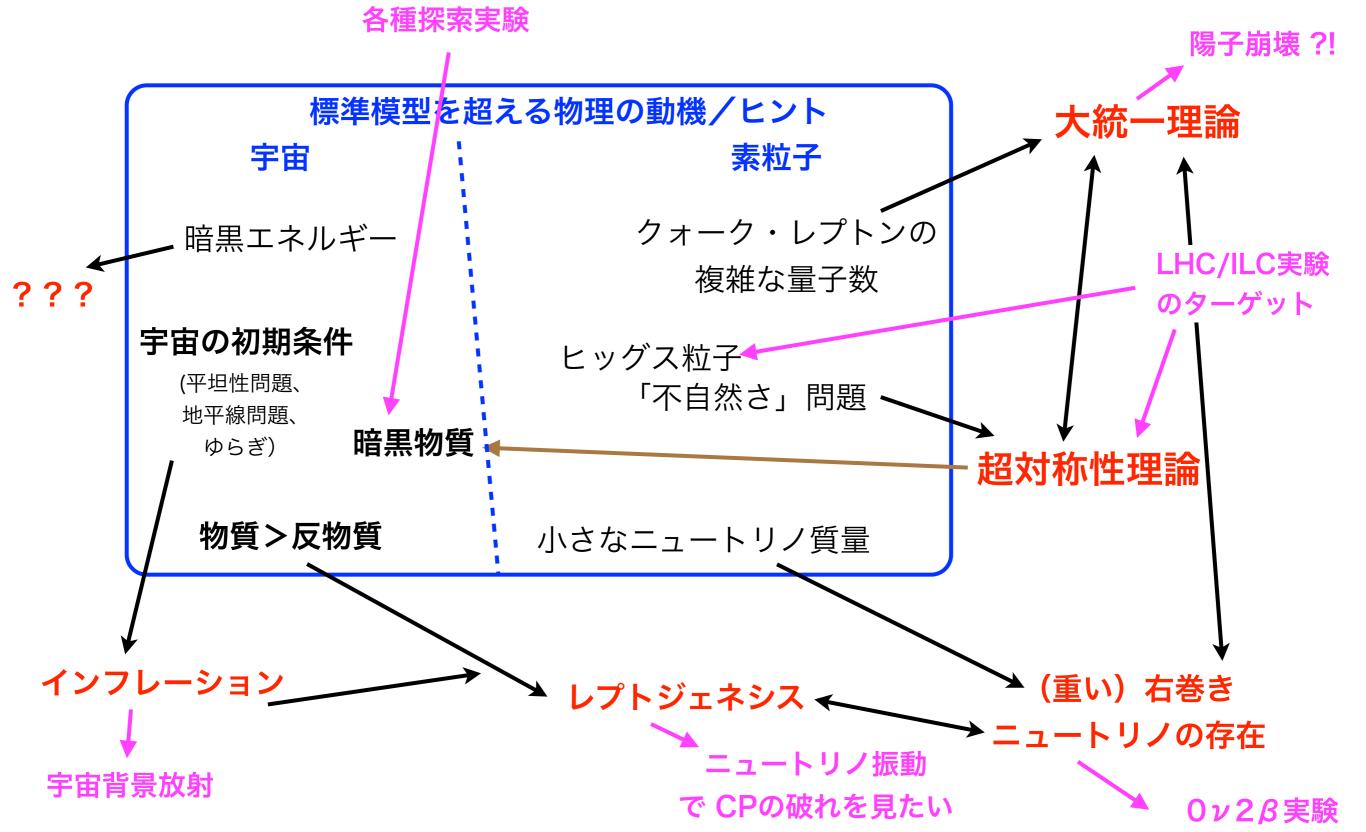
が必要。













# もくじ

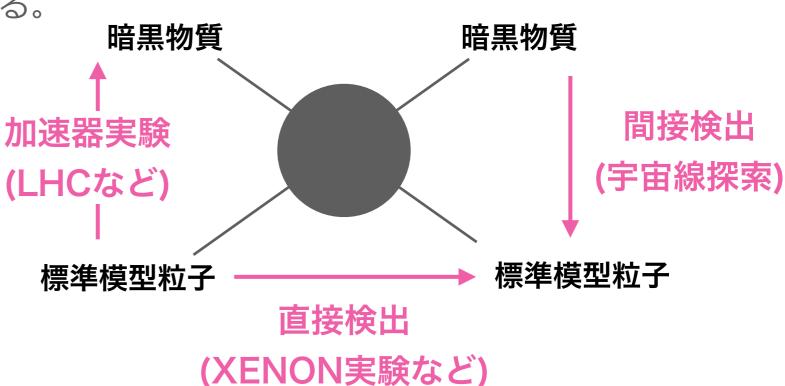
- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
- (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し
  - (1) 暗黒物質と中性子星の話 (昨年4,5月に発表した論文から)
  - (2) アクシオンと超新星の話(今年8月に発表した論文から)

## もくじ

- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
  - ・(時間があれば)自分の最近の研究の話を少し
    - (1) 暗黒物質と中性子星の話 (昨年4,5月に発表した論文から)
    - (2) アクシオンと超新星の話(今年8月に発表した論文から)

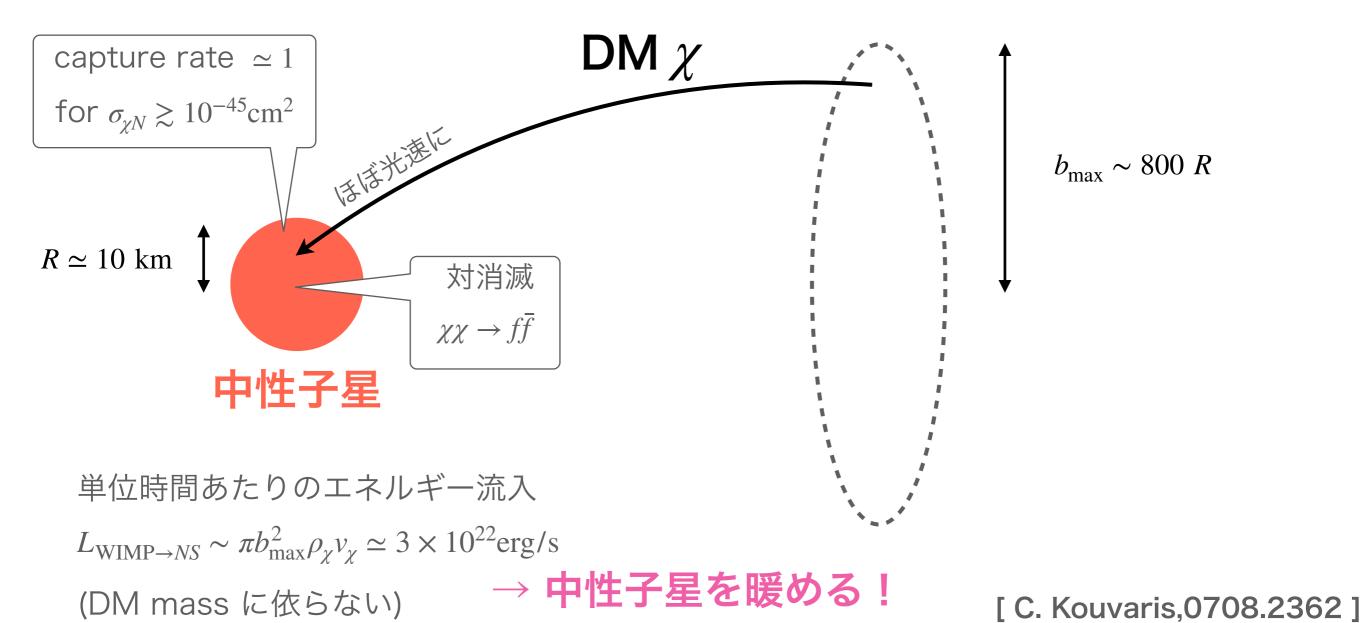
#### WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) 暗黑物質

- ▶ 宇宙の暗黒物質の候補
- ▶ 先ほどの超対称性粒子の暗黒物質候補はこの WIMP の一種
- ▶ 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。
- ▶ 様々な探索実験が行われている。



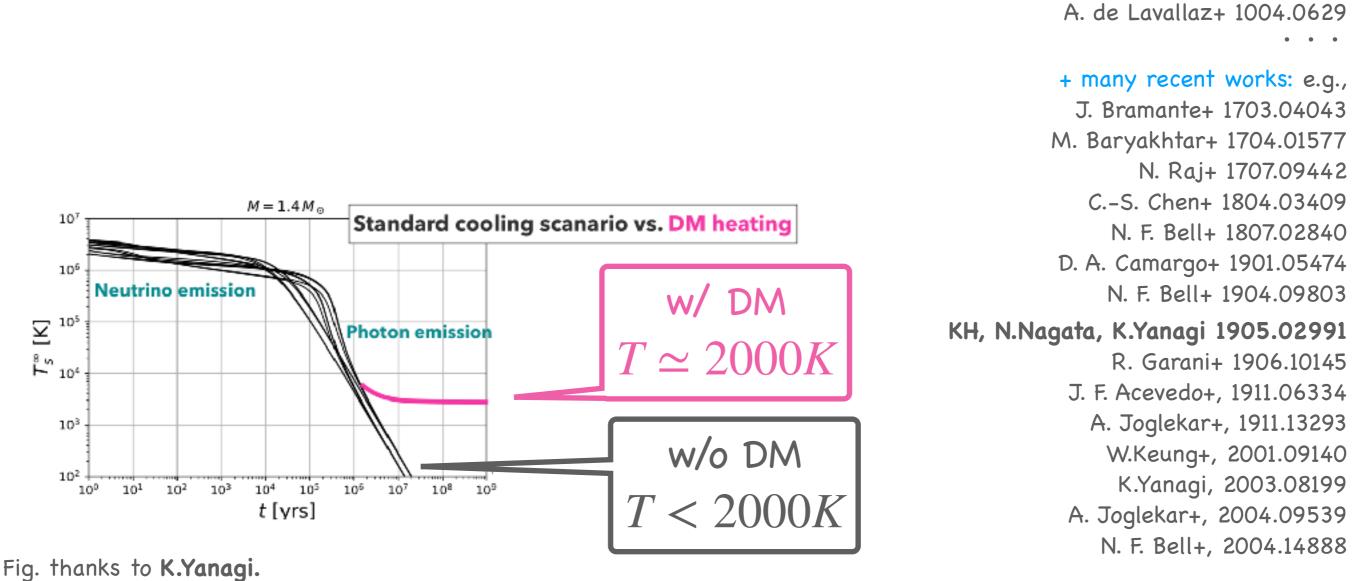
K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489

#### 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。



K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?



C. Kouvaris 0708.2362,

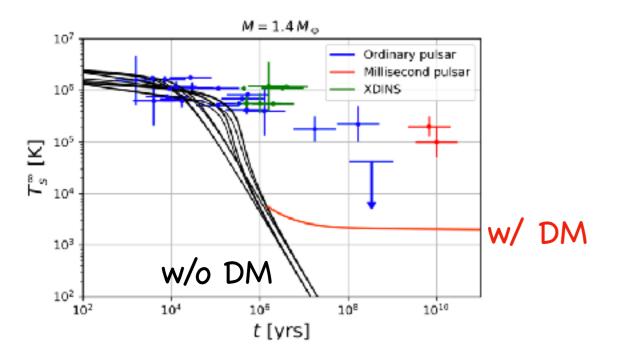
G. Bertone+ 0709.1485,

C. Kouvaris+ 1004.0586,

K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?

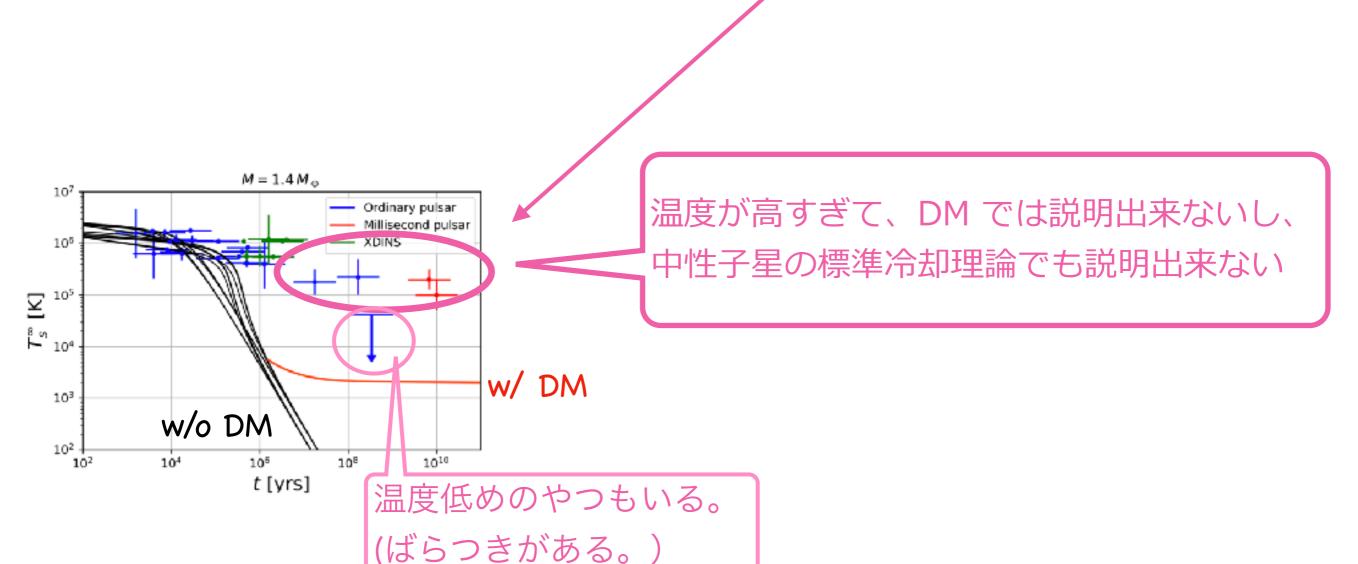
## 3.しかし!



K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?

**3.** しかし 上古くて暖かい  $(T \gg 3000K)$  中性子星が見つかっている。

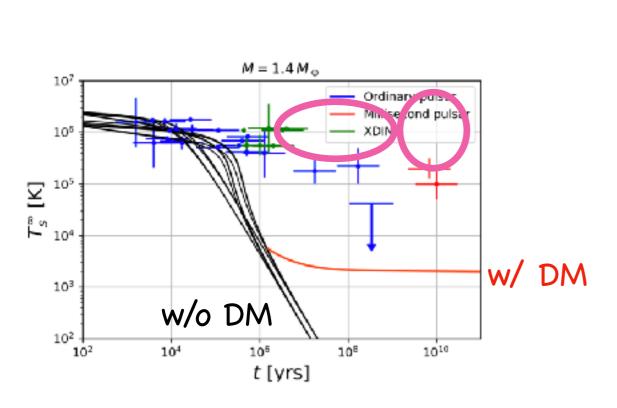


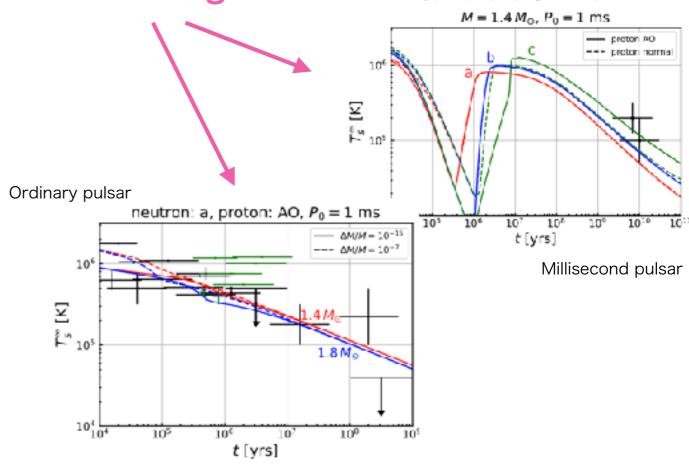
K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?

## **3.** しかし ! 古くて暖かい $(T \gg 3000K)$ 中性子星が見つかっている。

しかも中性子星に内在する "rotochemical heating" でそれらが説明出来る。





Reisengger,'94, Haensel,'92, Gourgoulhon, Haensel,'93, Fernandez, Reisenegger,'05,..... Yanagi, Nagata, KH, 1904.04667

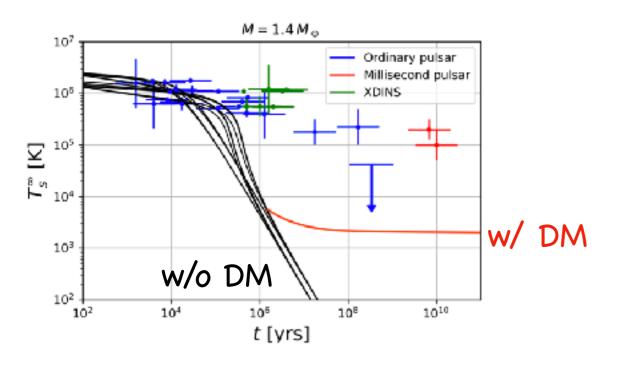
K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489

- 1. WIMP DM は中性子星に当たって、内部で対消滅する。
- 2. 古い中性子星の温度を測れば DM の兆候が見えるのでは?
- 3. しかし! 古くて暖かい  $(T \gg 3000K)$  中性子星が見つかっている。

しかも中性子星に内在する "rotochemical heating" でそれらが説明出来る。

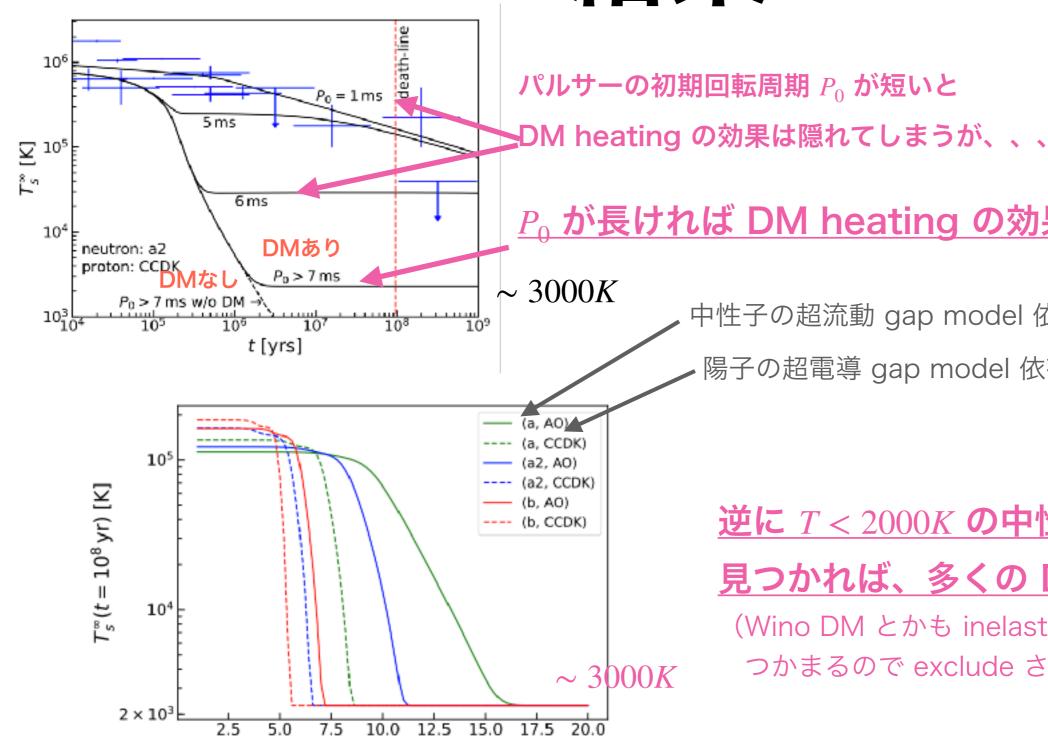
4. DM heating は見えるのか?

見えるとしたらその条件は?・・・これを調べた。



K. Hamaguchi, N. Nagata, K. Yanagi [arXiv:1905.02991] Phys.Lett. B795 (2019) 484-489





 $P_0$  [ms]

パルサーの初期回転周期 Po が短いと

P<sub>0</sub> が長ければ DM heating の効果が見え得る!

中性子の超流動 gap model 依存性 陽子の超電導 gap model 依存性

逆に T < 2000K の中性子星が

見つかれば、多くの DM を exclude.

(Wino DM とかも inelastic scattering で つかまるので exclude されてしまう。)

# もくじ

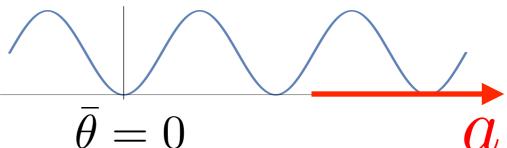
- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
- (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し
  - (1) 暗黒物質と中性子星の話 (昨年4,5月に発表した論文から)
  - (2) アクシオンと超新星の話(今年8月に発表した論文から)

・標準模型の最大の未解決問題の一つ「Strong CP 問題」



・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]



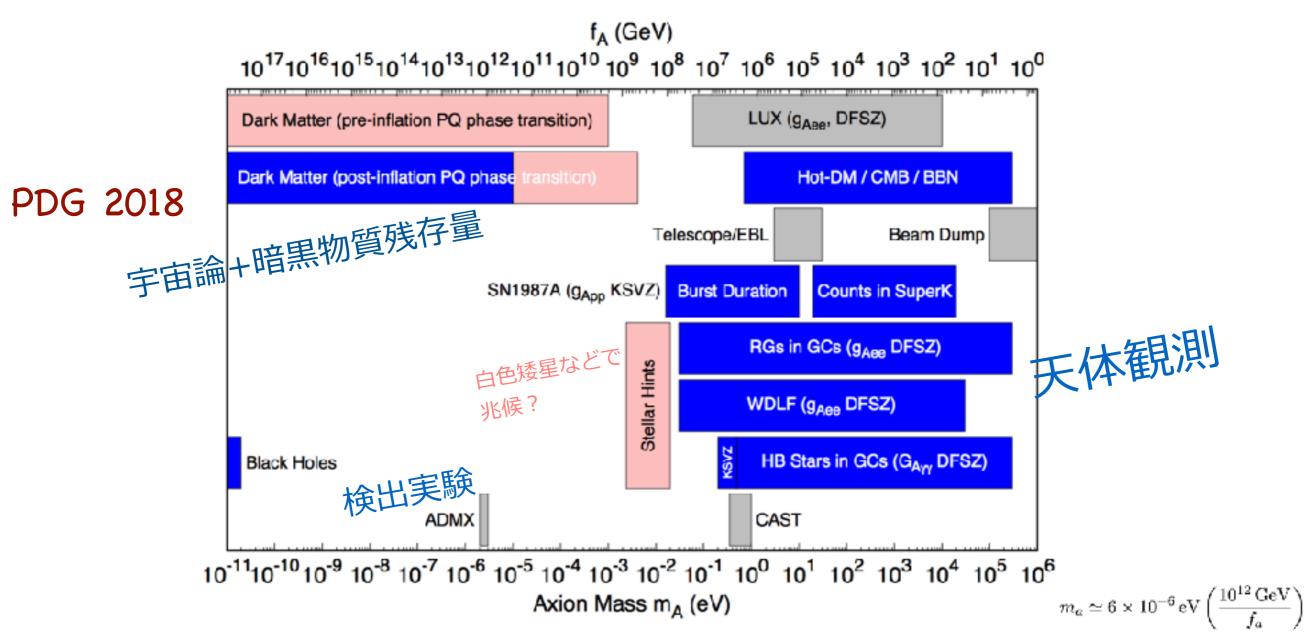
・アクシオンは暗黒物質の候補でもある。



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

#### アクシオン:

観測・制限によって様々な探索がなされているが未発見。



S. Ge, K. Hamaguchi, K. Ichimura, K. Ishidoshiro, Y. Kanazawa, Y. Kishimoto, N. Nagata, J. Zheng, [arXiv:2008.03924]

#### Supernova-scope for the Direct Search of Supernova Axions

Shao-Feng Ge<sup>a,b,c</sup>, Koichi Hamaguchi<sup>d,e</sup>, Koichi Ichimura<sup>f,e</sup> Koji Ishidoshiro<sup>f</sup>, Yoshiki Kanazawa<sup>d</sup>, Yasuhiro Kishimoto<sup>f,e</sup>, Natsumi Nagata<sup>d</sup>, Jiaming Zheng<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai 200240, Shanghai Jiao Tong University, China <sup>b</sup> School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>c</sup>Shanghai Key Laboratory for Particle Physics and Cosmology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

<sup>d</sup>Department of Physics, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113–0033, Japan
<sup>e</sup>Kavli IPMU (WPI), University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277–8583, Japan

 $^fResearch\ Center\ for\ Neutrino\ Science,\ Tohoku\ University,\ Sendai\ 980-8578,\ Japan$ 

### 先月arXivに発表したばかりの論文です Abstract

If a supernova explosion occurs within a few hundred parsecs from the Earth, a huge number of axions, in addition to neutrinos, may arrive at the Earth. In this paper, we discuss in detail the prospect of detecting those supernova axions by an axion helioscope. With the help of a pre-supernova neutrino alert system, it is possible to point a helioscope at an exploding supernova in advance. The supernova axions can then be detected by a gamma-ray detector installed at the end of the helioscope. We call such a detection system an axion supernova-scope (SNscope). We propose a conceptual design for an axion SNscope, where the gamma-ray detector is installed at the opposite end to the X-ray detector for the solar axion. It still functions as an axion helioscope during the normal operation time, and once a pre-SN neutrino alert is received, the scope is temporarily turned around and targeted to a SN candidate, waiting for the supernova axions. We estimate the sensitivity of supernova axion detection and find that SNscopes based on the next-generation

S. Ge, K. Hamaguchi, K. Ichimura, K. Ishidoshiro, Y. Kanazawa, Y. Kishimoto, N. Nagata, J. Zheng, [arXiv:2008.03924]

ベテルギウスなどの 近傍超新星候補が爆発したら・・・



「アクシオン超新星望遠鏡」を用いて・・・

X-ray detector 超新星爆発 アクシオンを 検出出来るかもしれない。 という提案 をしました。

<sup>\gamma-ray</sup> detector

# もくじ

- 1.宇宙の話
- 2.素粒子の話
- 3.宇宙の謎と、素粒子の標準模型を超える物理
- (時間があれば) 自分の最近の研究の話を少し
  - (1) 暗黒物質と中性子星の話(昨年4,5月に発表した論文から)
  - (2) アクシオンと超新星の話(今年8月に発表した論文から)

おしまいです。どうもありがとうございました。

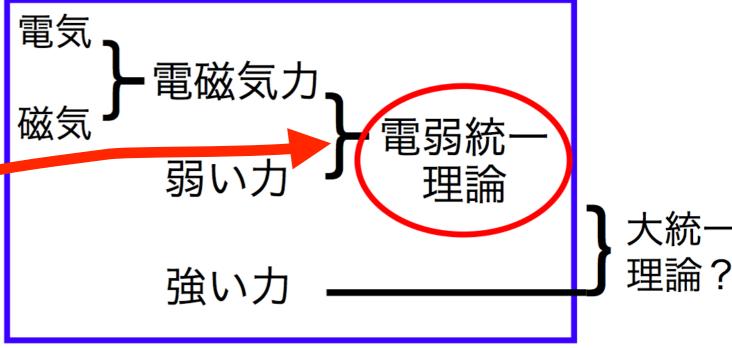
質問・コメント用

▶ヒッグスについて

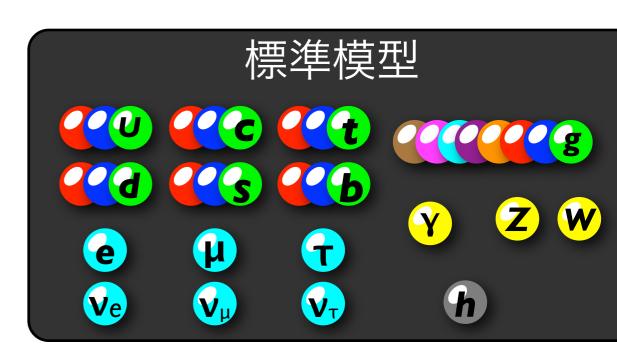


- ▶ヒッグスについて
- ・標準模型の要

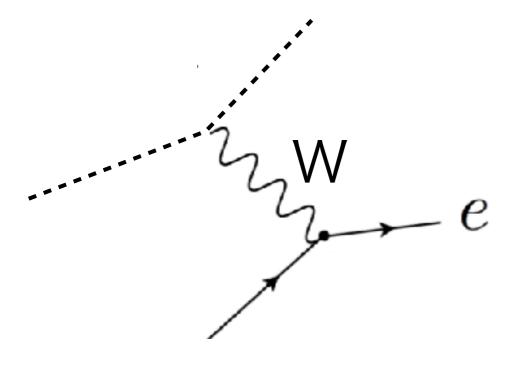
「ヒッグス場」による 「自発的対称性の破れ」が 電磁気力と弱い力の 統一の中心的役割を 果たしている 素粒子の標準模型



(詳細はココでは省きます・・・。)



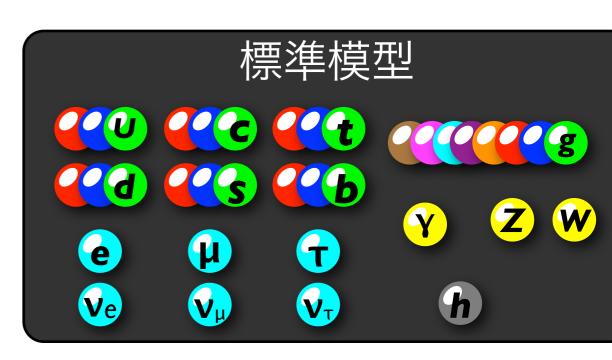
▶ 相互作用は粒子の種類を変えることもある。



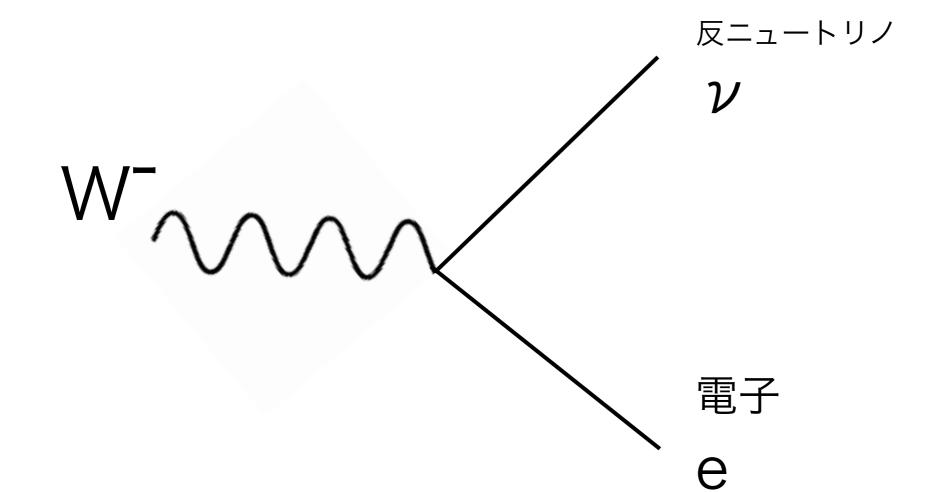
ニュートリノ

 $\mathcal{V}$ 

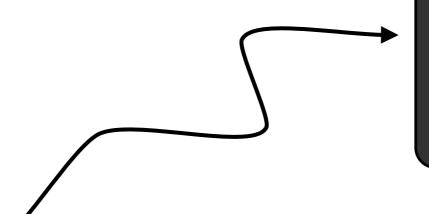
W との相互作用で ニュートリノが電子に化ける

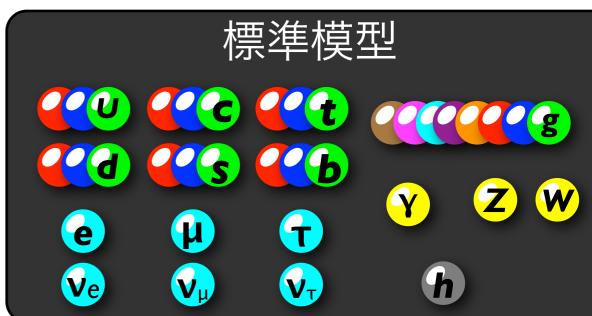


▶ 相互作用は粒子同士の散乱だけでなく「崩壊」も引き起こす。



W<sup>-</sup>粒子 は電子と 反ニュートリノに 崩壊する





- ※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

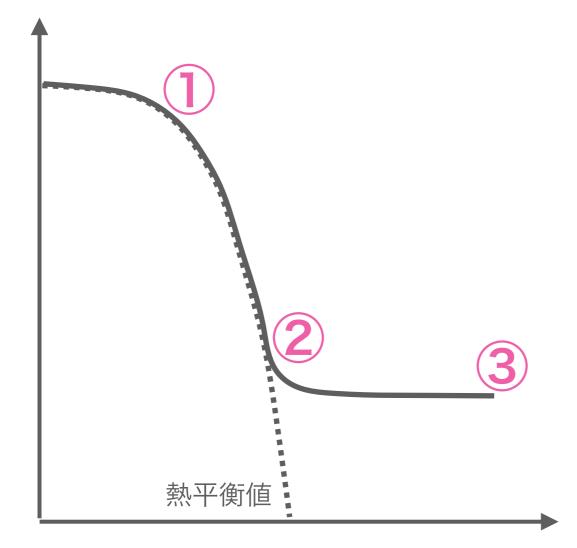
▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.

# ① <u>熱かった</u> → ② <u>冷えた</u> → ③ <u>今に至る</u>

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)



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

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

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

① <u>熱かった</u> → ② <u>冷えた</u> → ③ <u>今に至る</u>

他の粒子たちと熱平衡

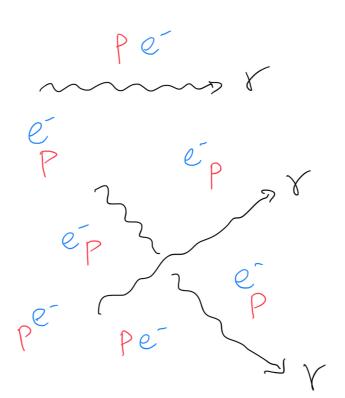
熱平衡から外れる

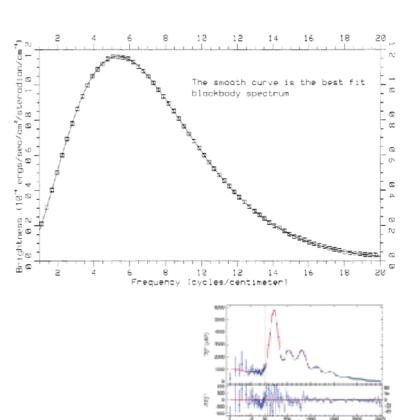
あとは宇宙膨張に従うだけ

# 例1:CMB

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

Property of Proper





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

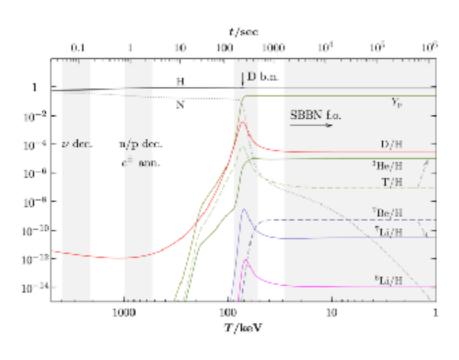
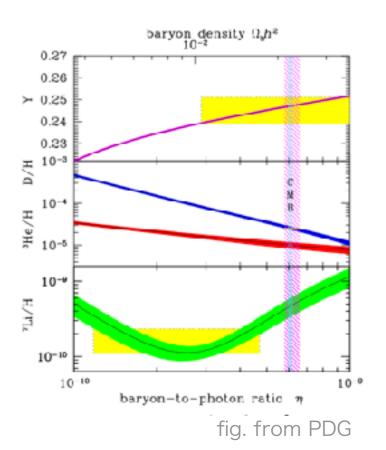


fig. from 1011.1054



▶ 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

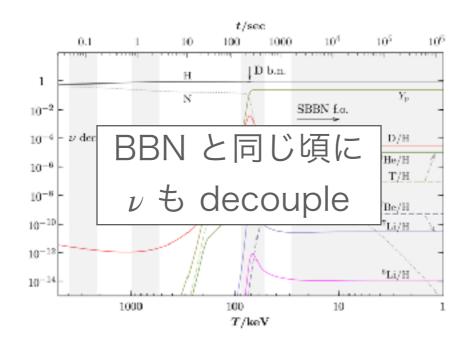
熱平衡から外れる

あとは宇宙膨張に従うだけ

例3:C<sub>ν</sub>B

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

P N P



1.9 K の  $C_{\nu}B$  がいるはず。 いつか観測出来るかも?

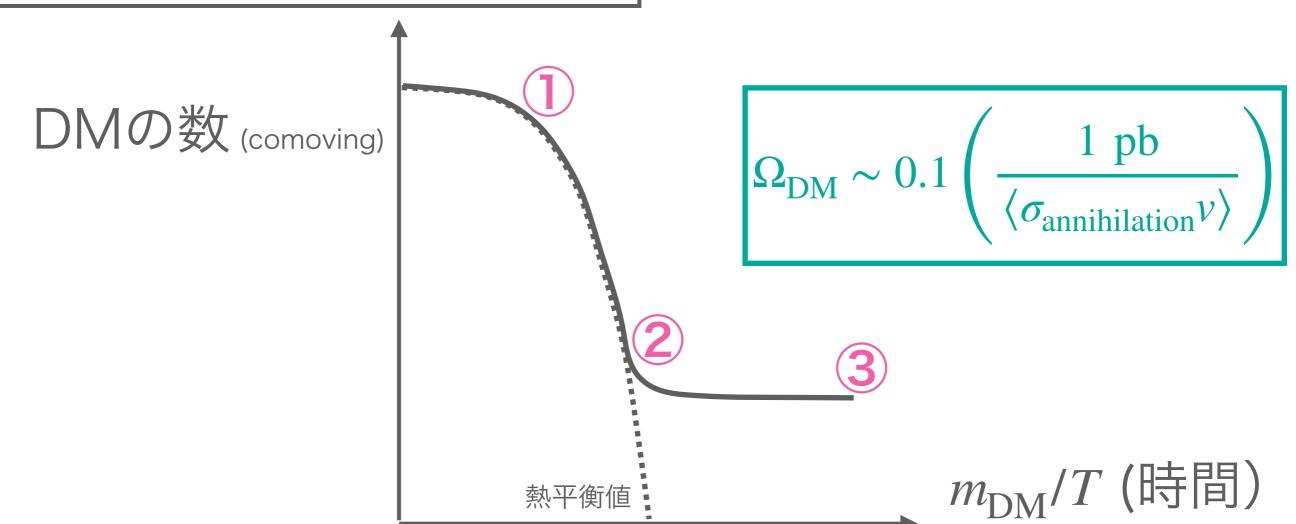
▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生成機構, thermal relic シナリオ.

① <u>熱かった</u> → ② <u>冷えた</u> → 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4になるか?: WIMP DM!!!

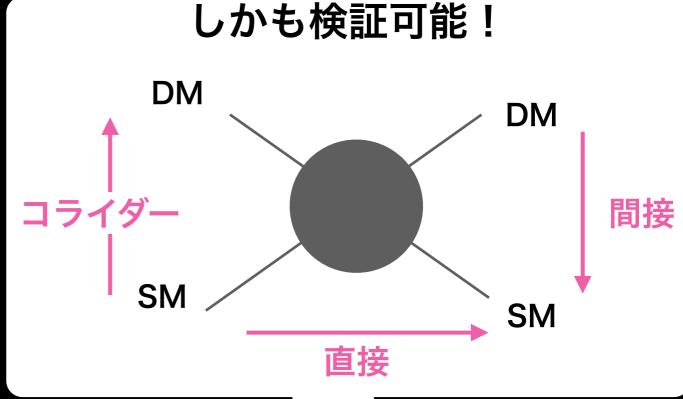




▶ WIMP 最大の魅力 = シンプルな生

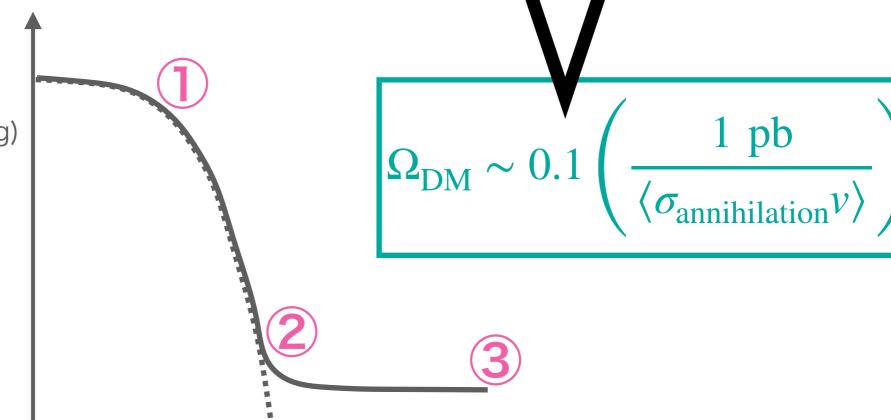
# 1 熱かった 2

他の粒子たちと熱平衡



## 例4になるか?: WIMP DM

DMの数 (comoving)



 $m_{
m DM}/T$  (時間)