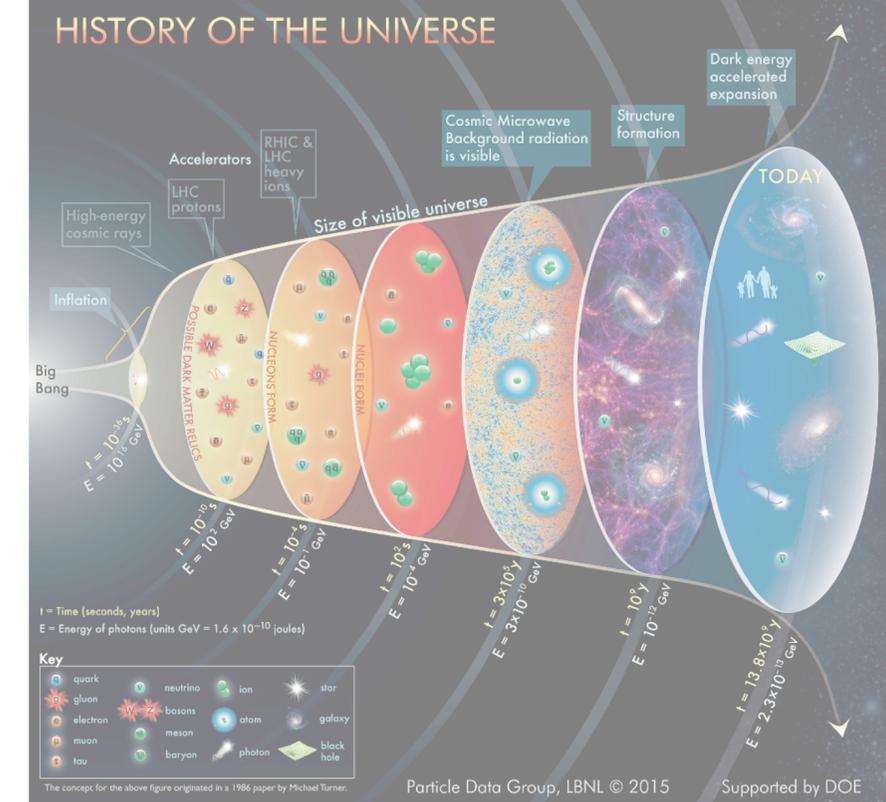


Figure credit;
Particle Data Group
at Lawrence Berkeley National Lab.



素粒子特論

濱口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

今日は初回ということで
オンラインツール slido を
使ってみようと思います。

@お茶の水女子大学, 2025年夏学期

はじめまして & お久しぶりです

自己紹介

濱口幸一

1997～2002 大学院 曹さんとはこの頃からの知り合いです.

2002～2006 ポスドク&ジュニアスタッフ @ DESY ドイツ

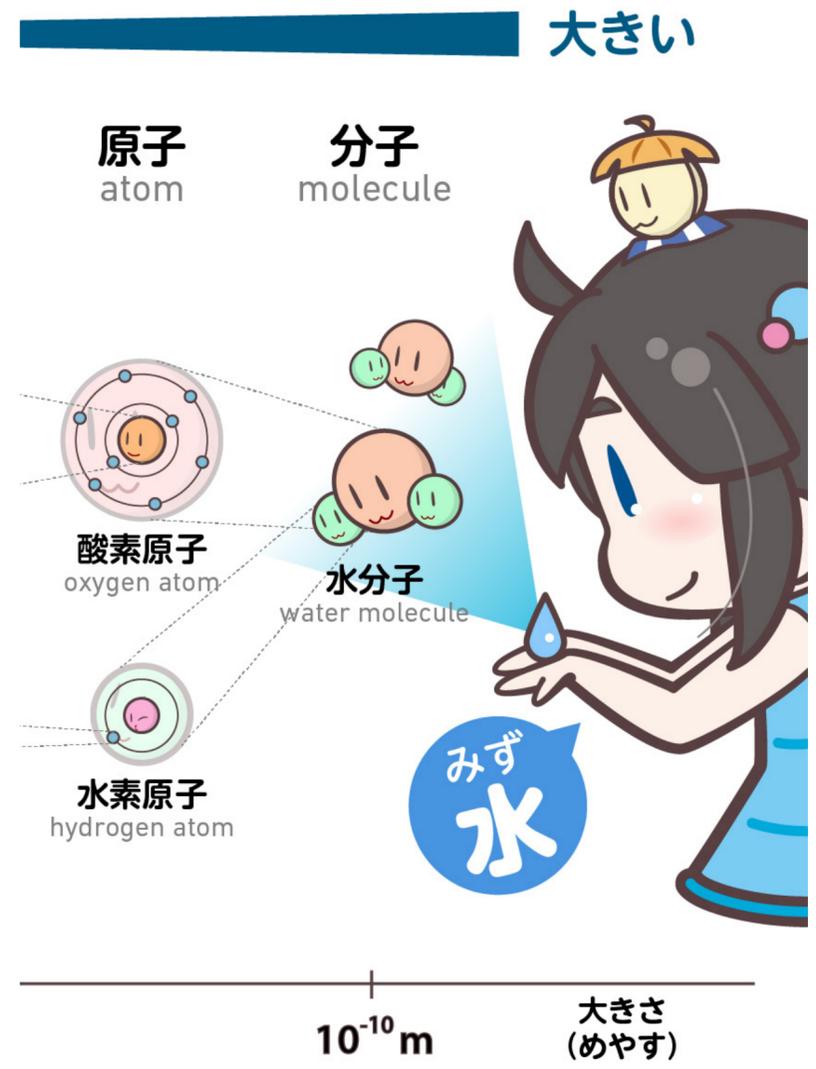
2006～現在 東京大学 スタッフ

研究対象 = 標準模型を超える物理 + 初期宇宙

インフレーション、宇宙の物質反物質非対称性、暗黒物質、天体物理との境界領域、コライダー現象論、素粒子模型構築 (大統一理論からTeVスケールまで)、などなど

今日は初回ということで
オンラインツール slido を
使ってみようと思います。

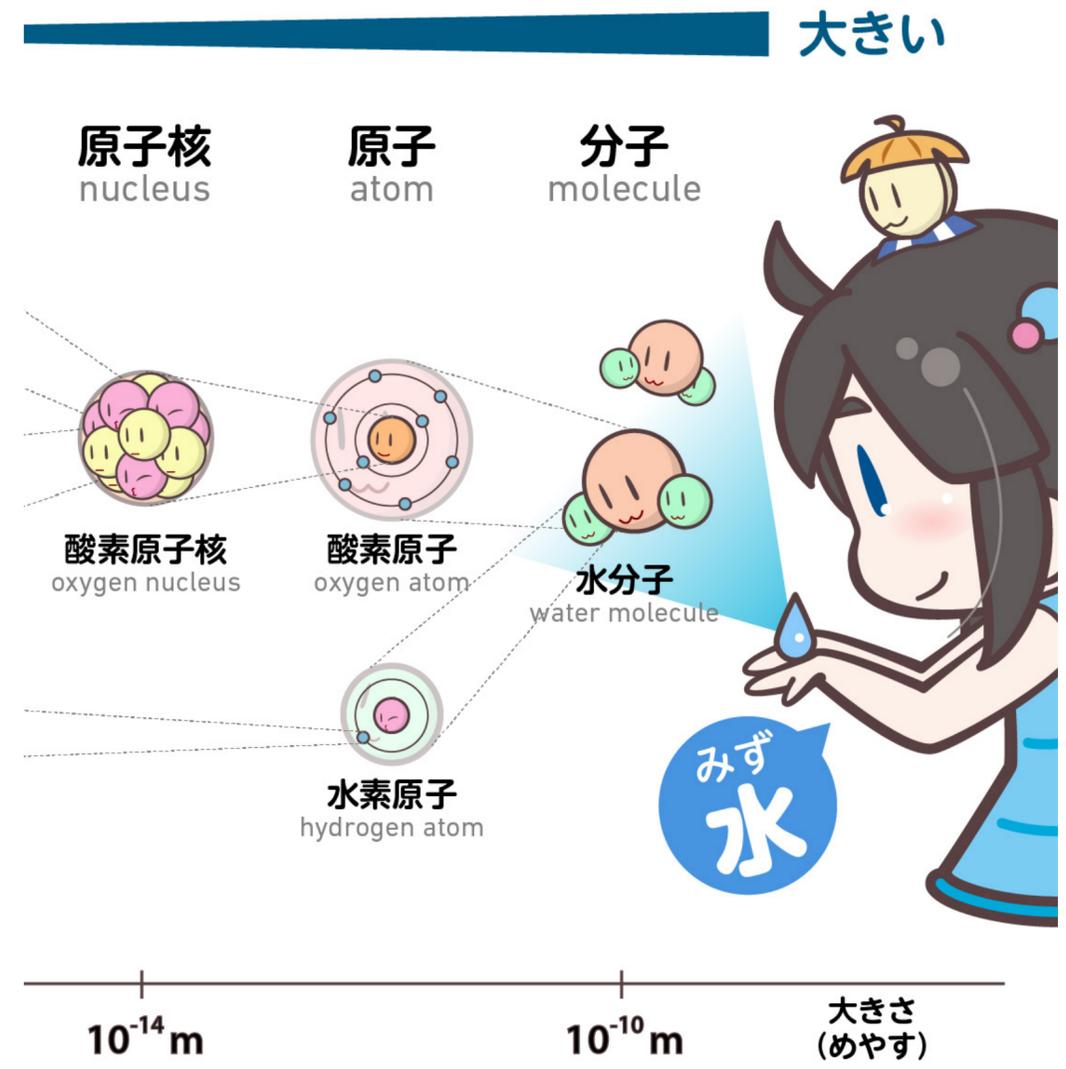
素粒子・・・物質の最小単位



ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

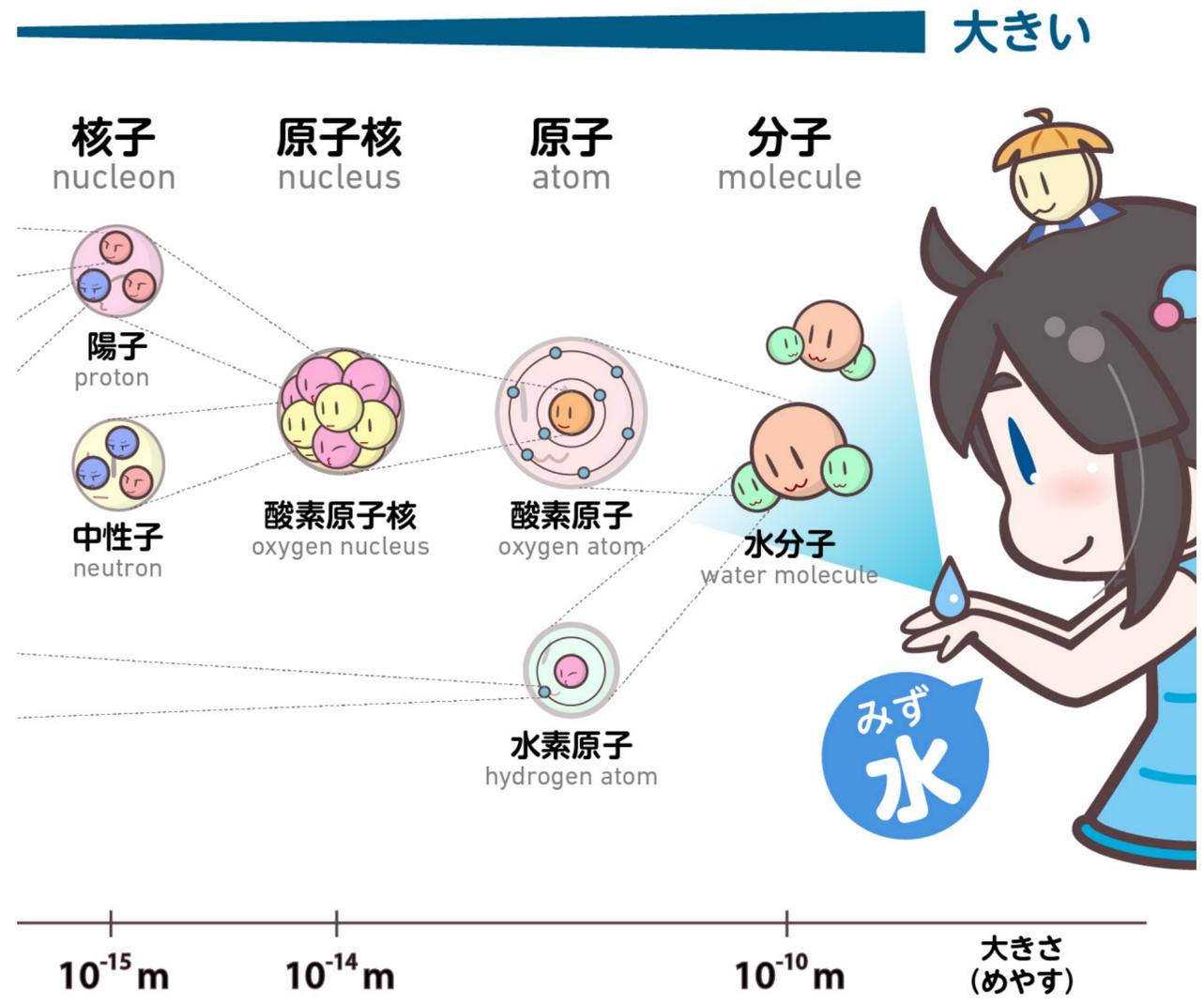
素粒子・・・物質の最小単位



ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

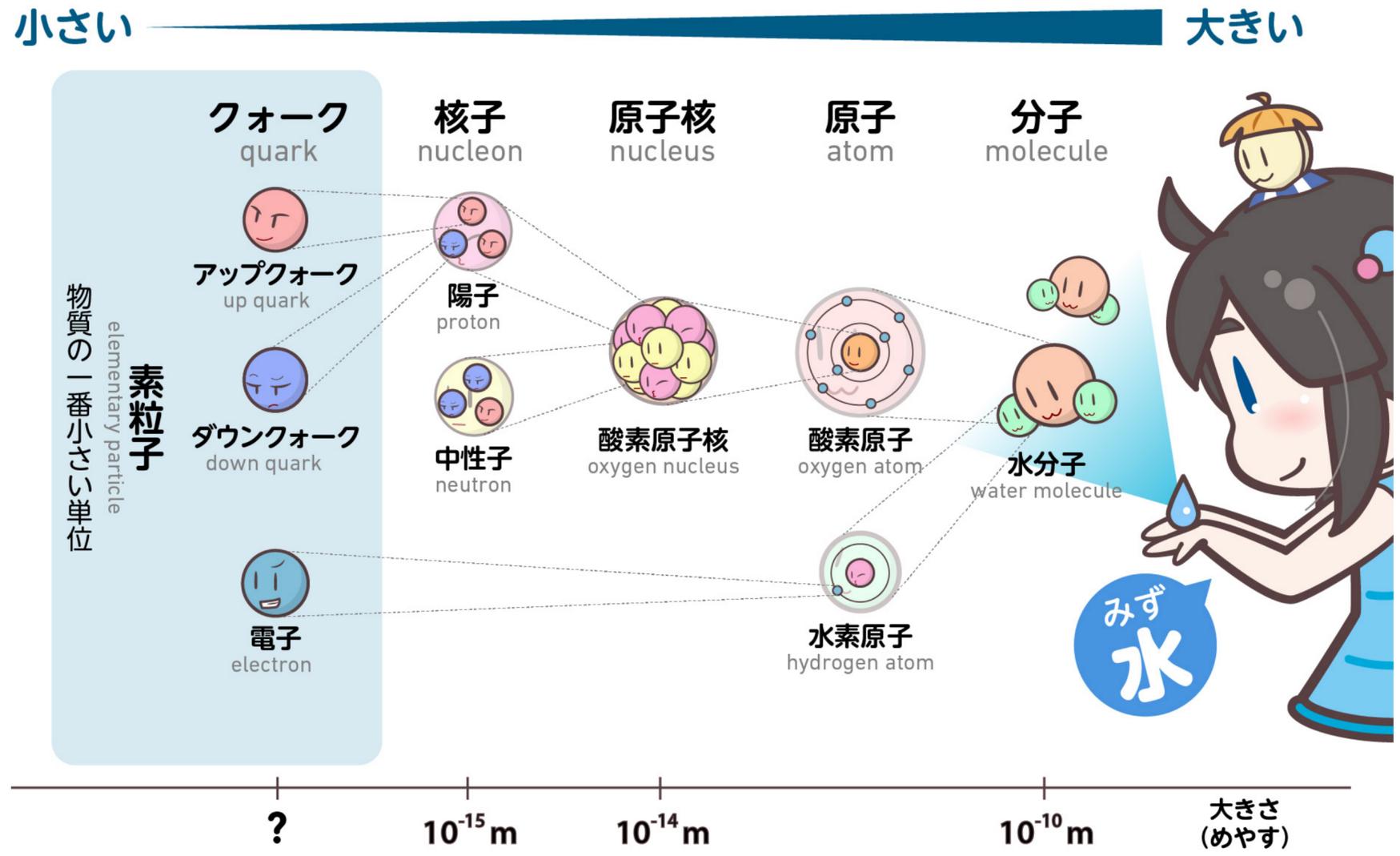
素粒子・・・物質の最小単位



ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

素粒子・・・物質の最小単位

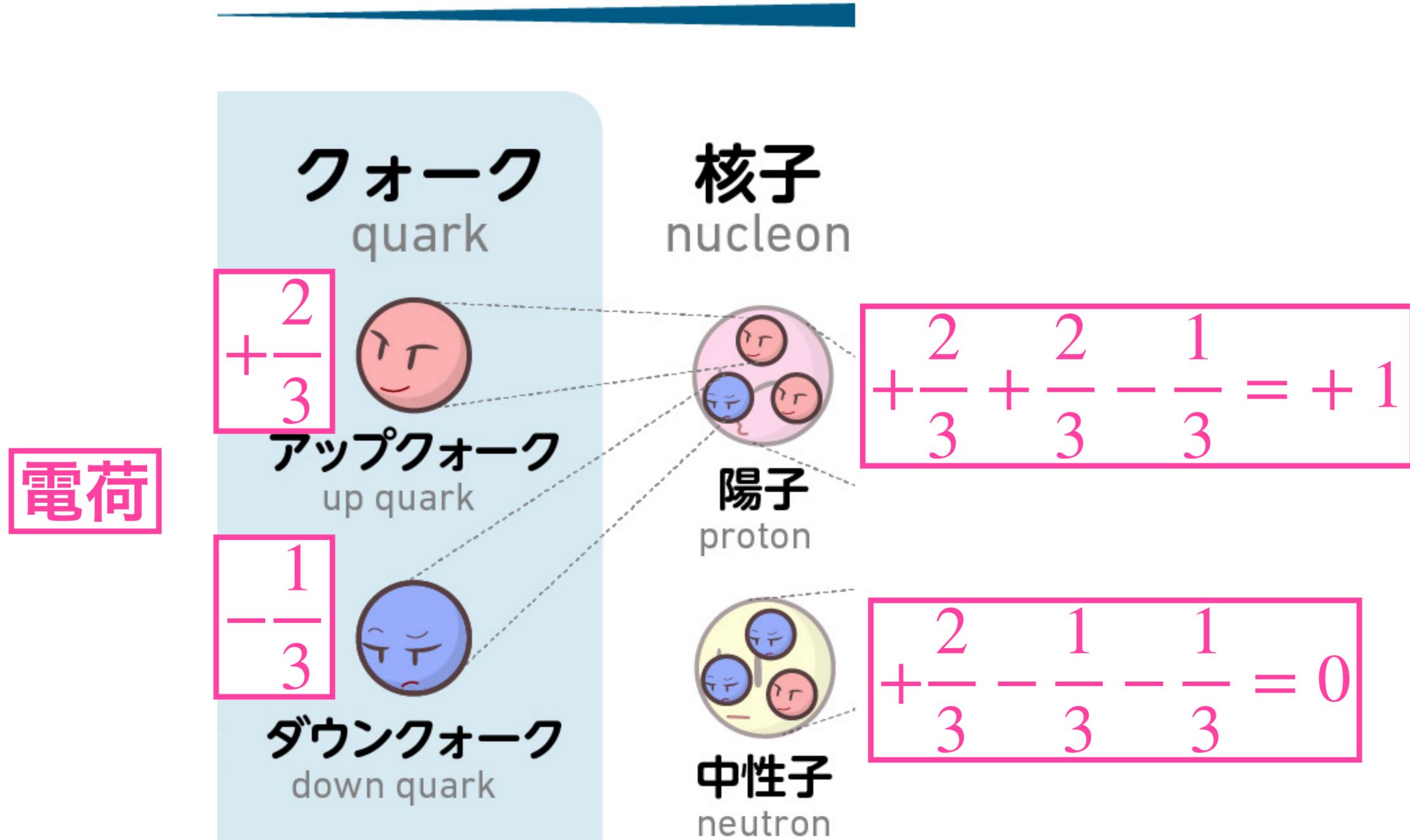


ヒッグスたん

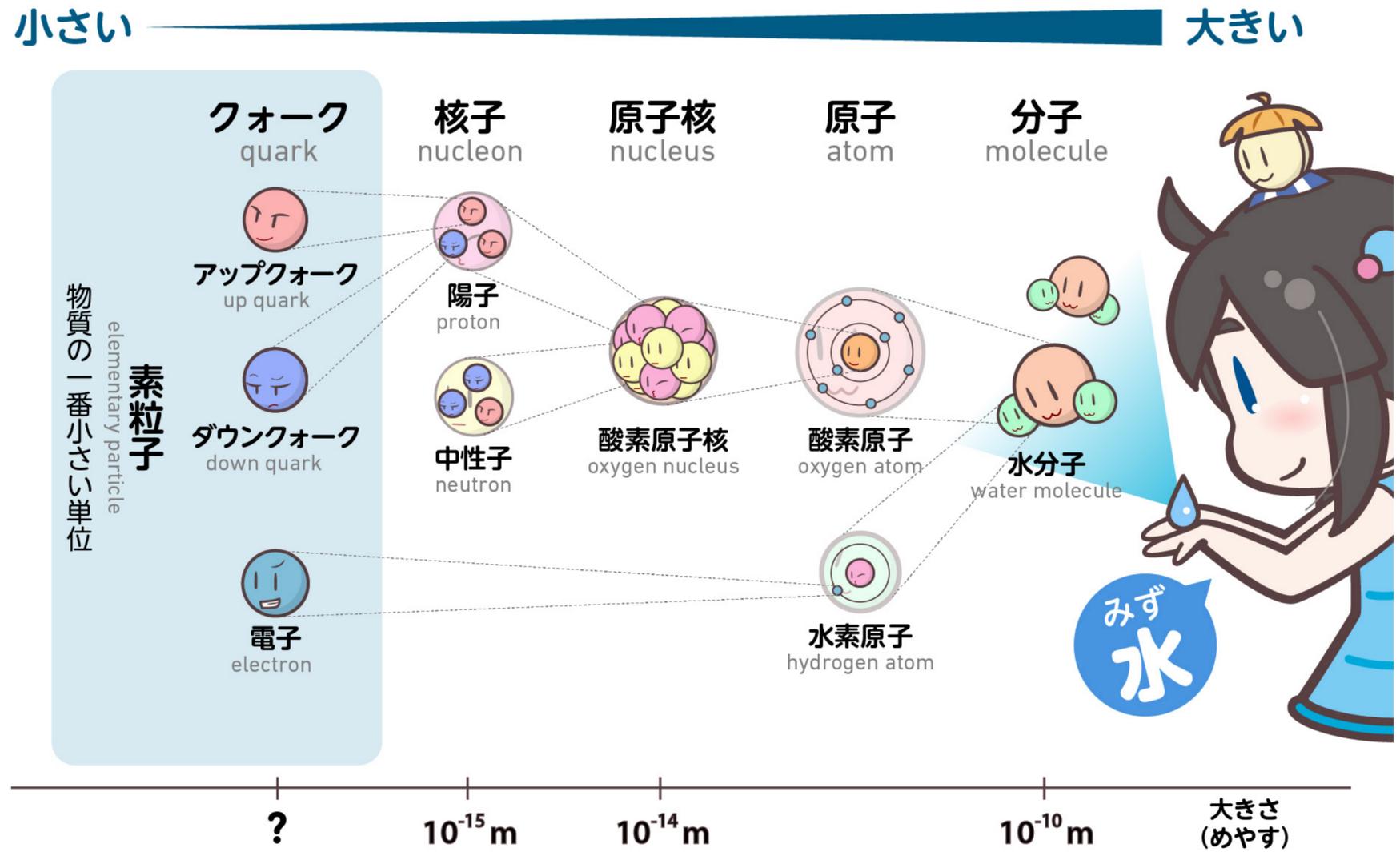
<https://higgstan.com/>

導入

素粒子・・・物質の最小単位



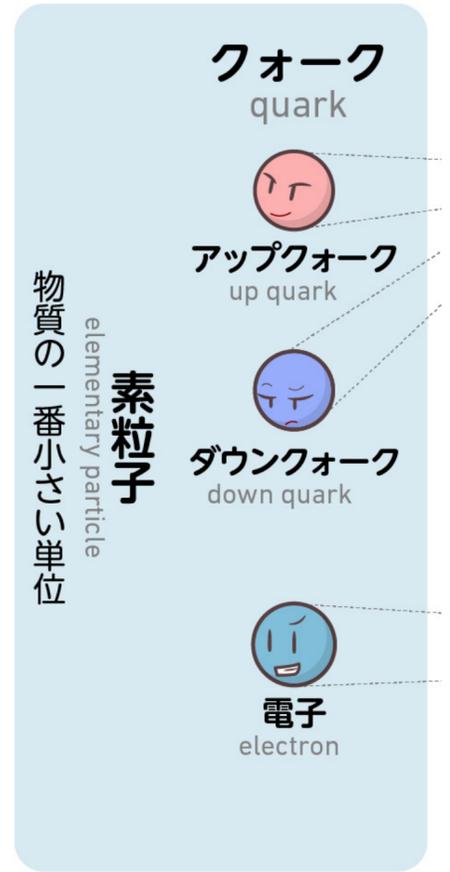
素粒子・・・物質の最小単位



ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

素粒子・・・物質の最小単位



導入



アップ
クォーク



ダウン
クォーク



電子

ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

導入



ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

導入

「3世代 (generations)」
「3フレーバー (flavors)」



物質粒子 matter (fermions)

	1 世代	2 世代	3 世代	電荷
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	$+\frac{2}{3}$
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	$-\frac{1}{3}$
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	-1
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	0

ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

「3世代 (generations)」 「3フレーバー (flavors)」

物質粒子 matter (fermions)

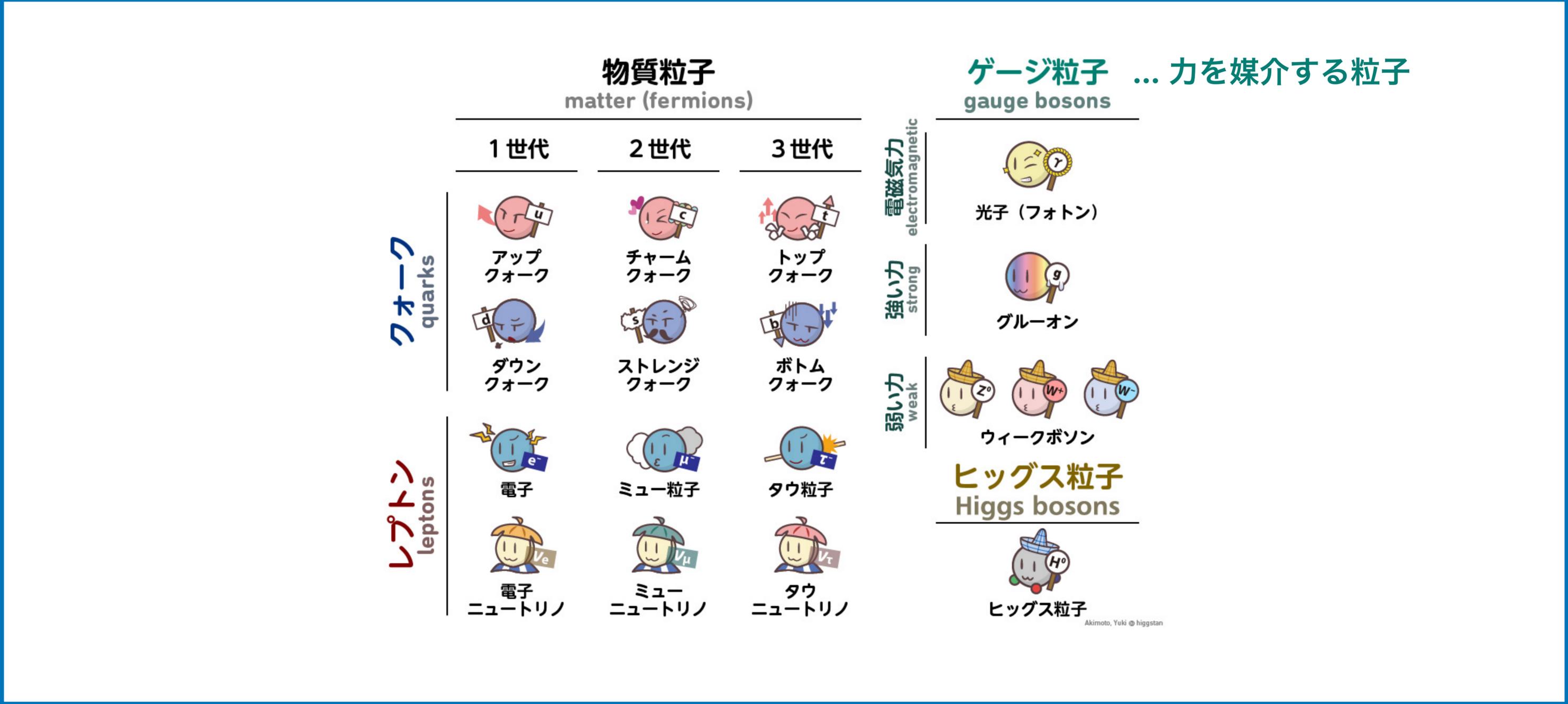
	1 世代	2 世代	3 世代
クォーク quarks	アップクォーク	チャームクォーク	トップクォーク
	ダウンクォーク	ストレンジクォーク	ボトムクォーク
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子
	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ

なぜ3世代？

... 答えは分かっていません。

これも標準模型の残された最大の謎の一つ。
(この講義ではこれ以上は掘り下げない予定です。)

素粒子の標準模型



ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

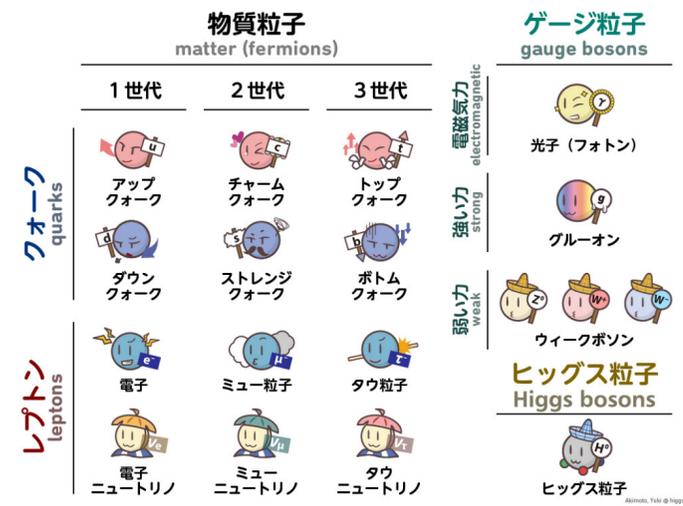
素粒子の標準模型

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} && \dots \text{ゲージ場} \\
 & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi && \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) && \dots \text{ヒッグス場} \\
 & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} && \dots \text{湯川相互作用}
 \end{aligned}$$

「場の量子論」で記述されている。

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

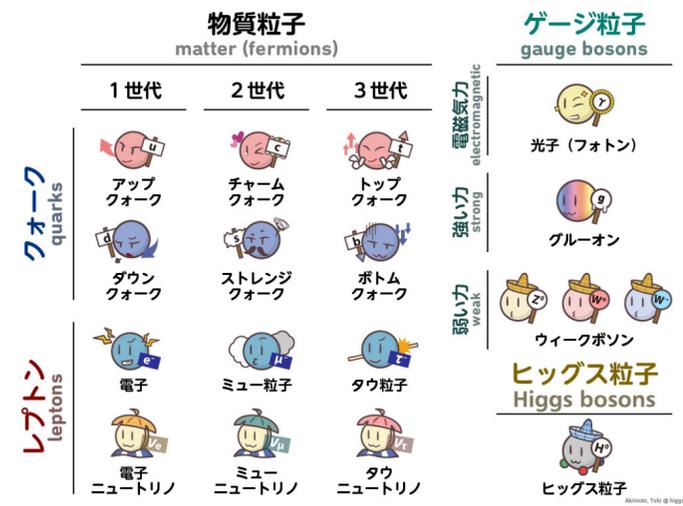
現時点で最も成功している素粒子物理の理論。



素粒子の標準模型

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} && \dots \text{ゲージ場} \\
 & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi && \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) && \dots \text{ヒッグス場} \\
 & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} && \dots \text{湯川相互作用}
 \end{aligned}$$

「場の量子論」で記述されている。



しかし、この標準模型では説明できない観測事実や未解決の謎がある

- 暗黒物質の謎
- 宇宙の物質と反物質の非対称性の謎
- インフレーション
- ニュートリノ質量
- Strong CP problem,
- などなど、、、

👉この辺りのトピックをこの講義で紹介したいと思っています。

シラバス より

主題と目標

主に素粒子物理の理論的側面について解説する。素粒子標準模型の構成およびその問題点について解説し、それぞれの問題点に対する「標準模型を超える物理」の候補をいくつか紹介する。

授業計画

概ね以下の内容を15回の授業で扱う。授業の進み具合によって適宜調整、変更することがある。

- ・素粒子の標準模型
 - 場の量子論の基礎
- ・素粒子の標準模型を超える物理
 - 大統一理論
 - ニュートリノ質量とシーソー機構
 - 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とバリオジェネシス/レプトジェネシス
 - 暗黒物質
 - strong CP問題とアクシオン
 - 超対称性模型

時間外学習

授業中によく理解できなかったところは復習しましょう。講義時間以外の質問も歓迎します。

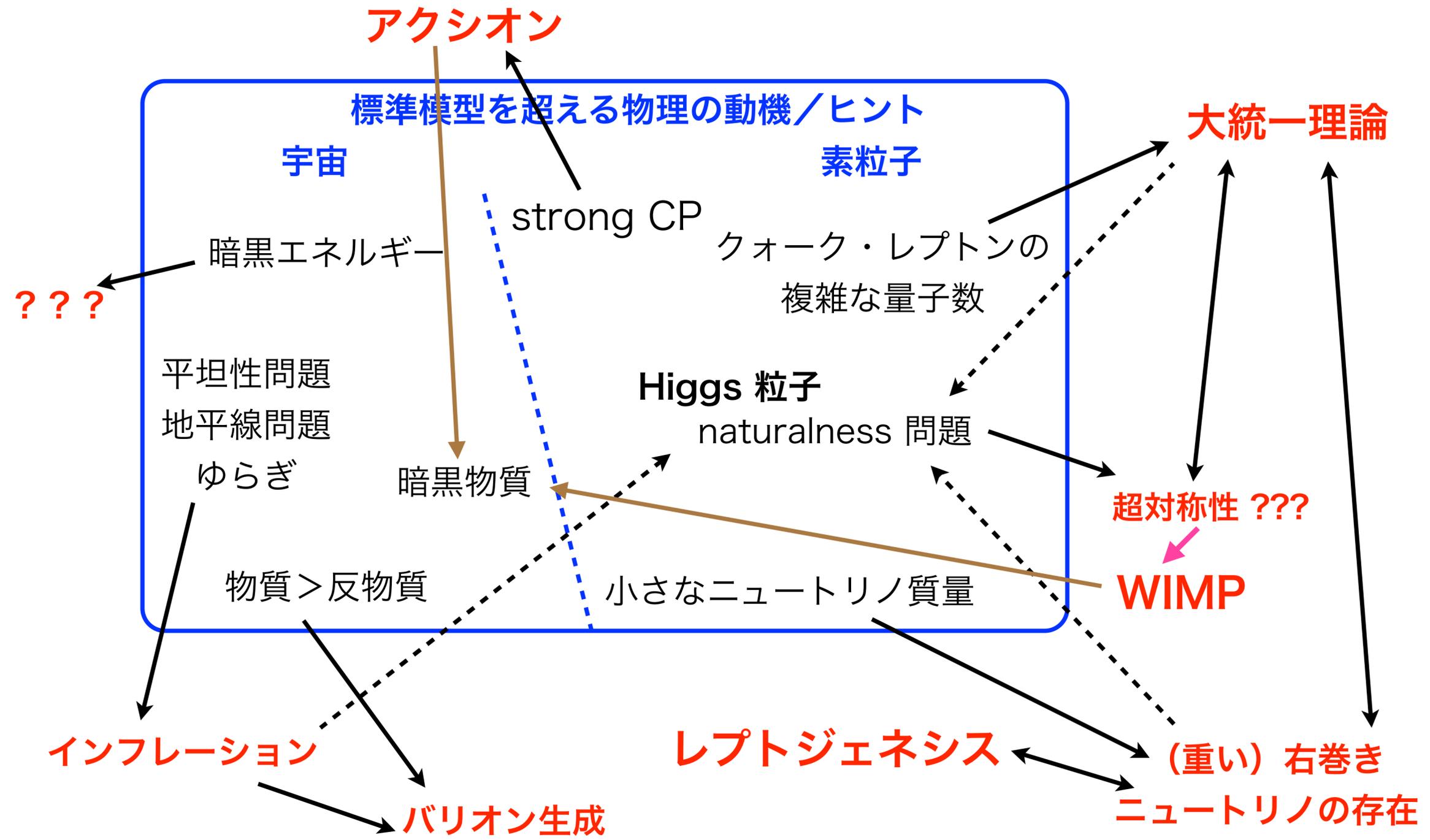
学生へのメッセージ

授業を通して、少しでも興味を持ったことや疑問に思ったことがあれば、ぜひ気軽に質問してください。「何となくよくわからない」「自分の理解が合っているのか自信がない」といった素朴な疑問から、誤字脱字の指摘まで、どんな些細なことでも構いません。授業中でも授業後でも、いつでも質問を歓迎します。

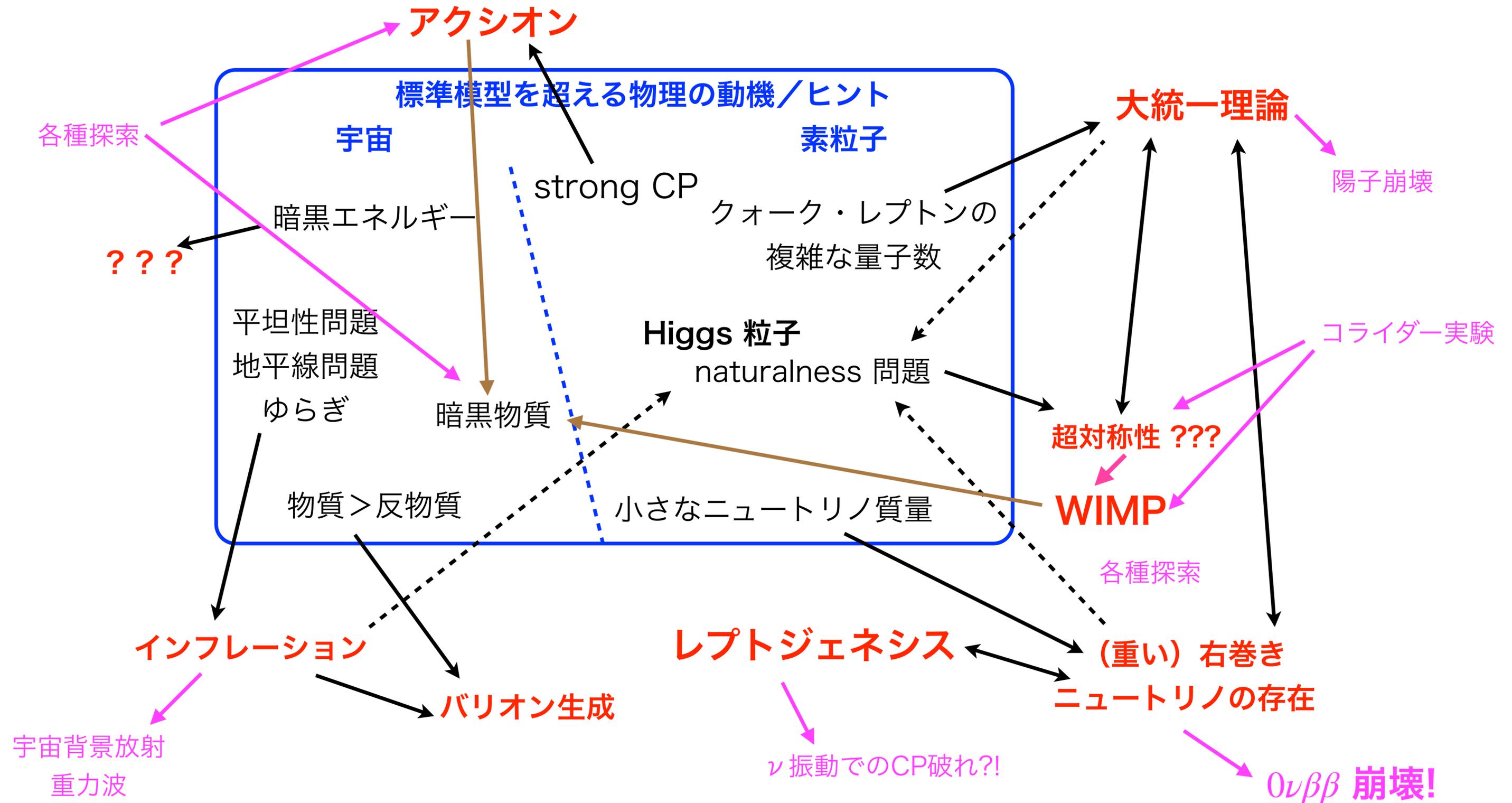
途中でどんどん質問して下さい！



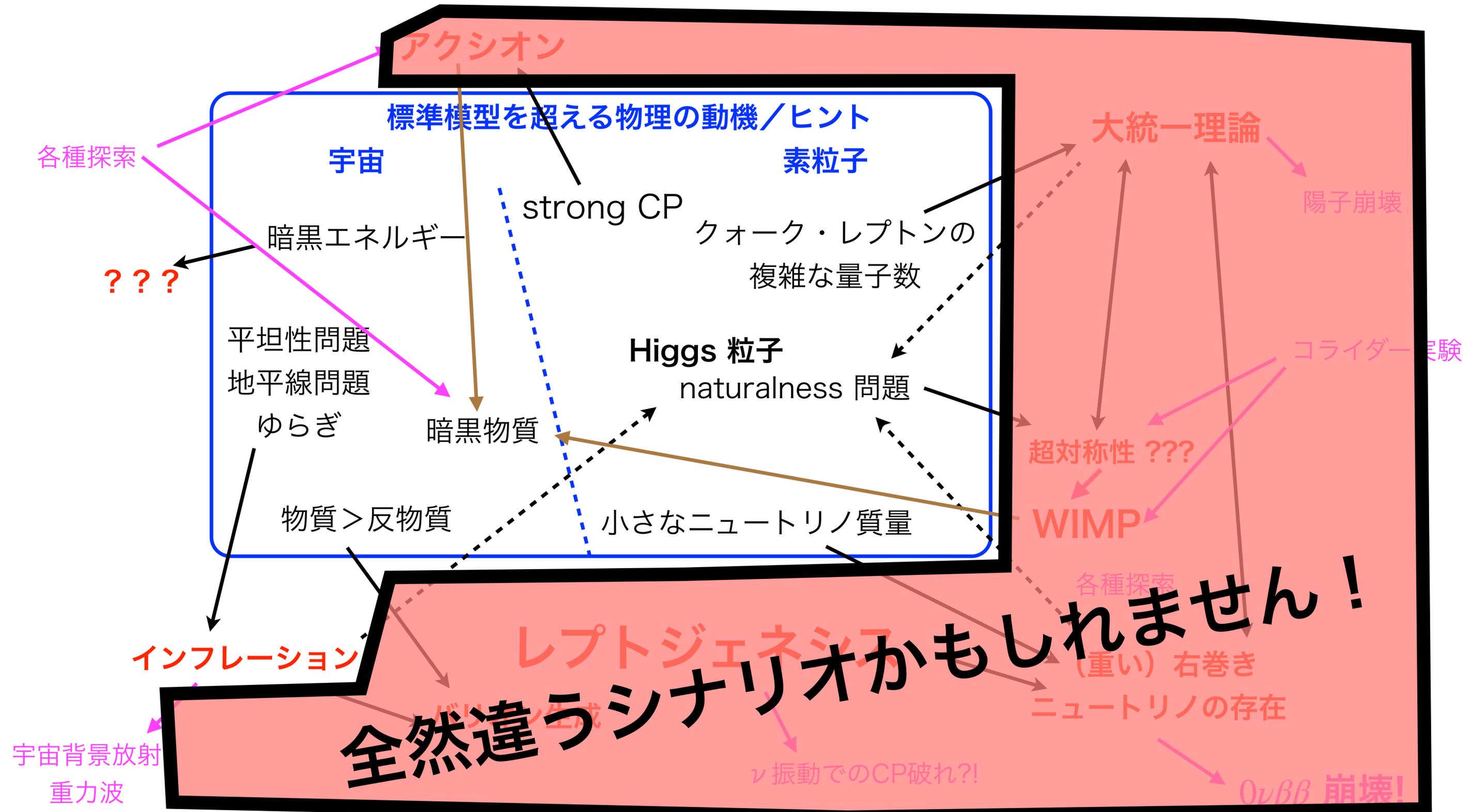
まず今週と来週で、こんな↓イメージ図を埋めながら概要を話そうと思います。



まず今週と来週で、こんな↓イメージ図を埋めながら概要を話そうと思います。



まず今週と来週で、こんな↓イメージ図を埋めながら概要を話そうと思います。



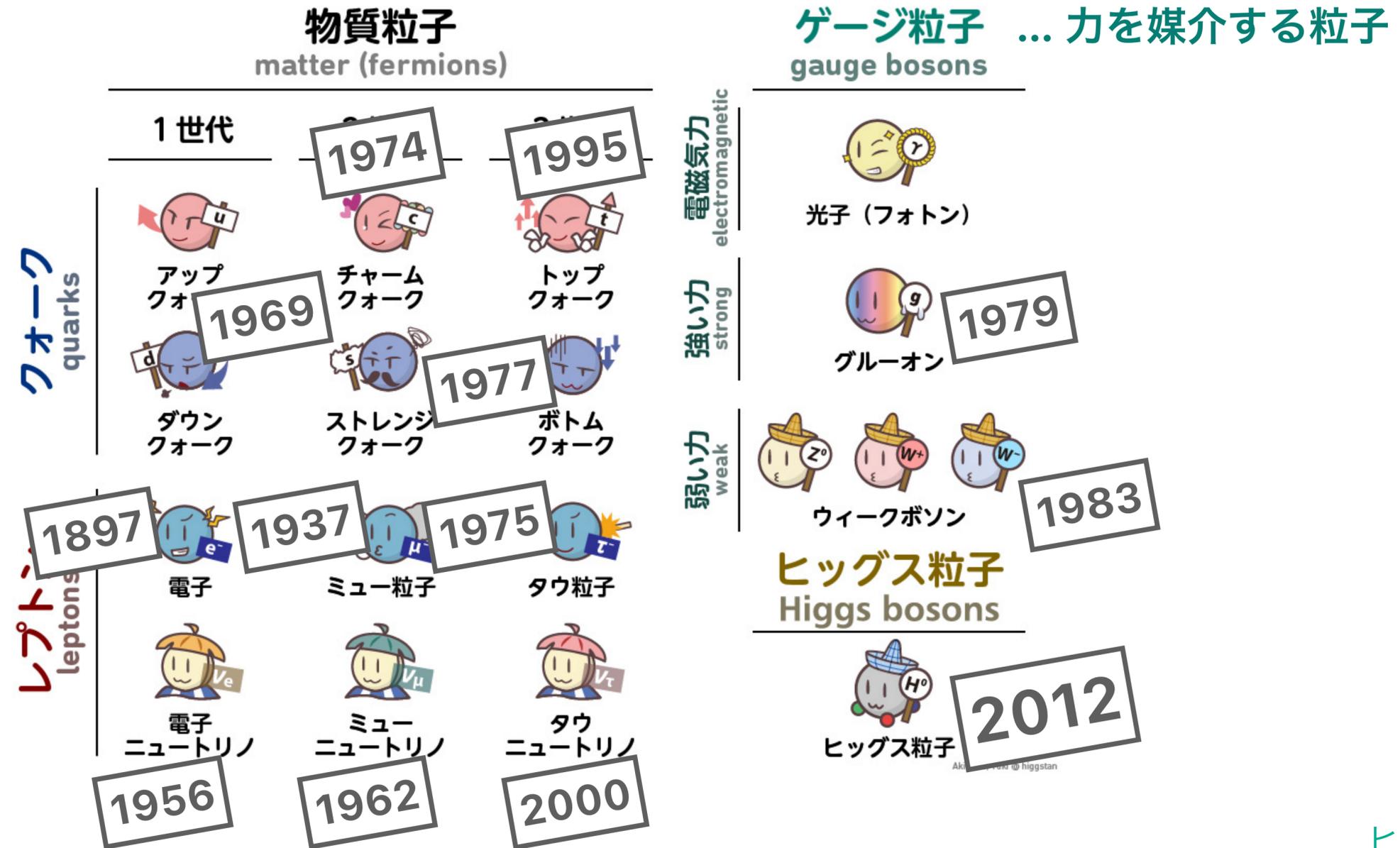
再び slido を使ってみます

素粒子の標準模型についてもう少し



素粒子の標準模型についてもう少し

発見された年

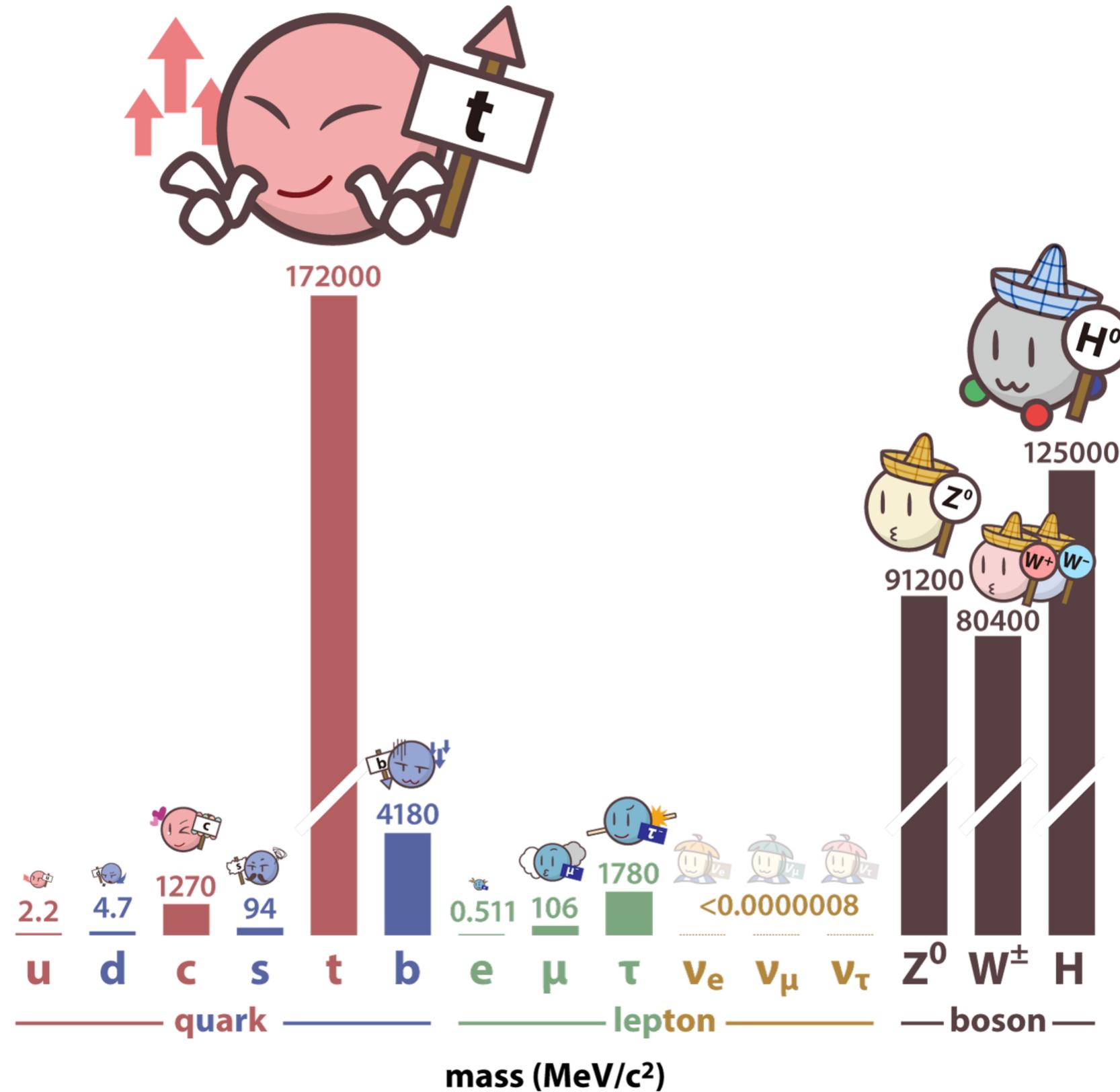


ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

素粒子の標準模型についてもう少し

素粒子の
重さ比べ

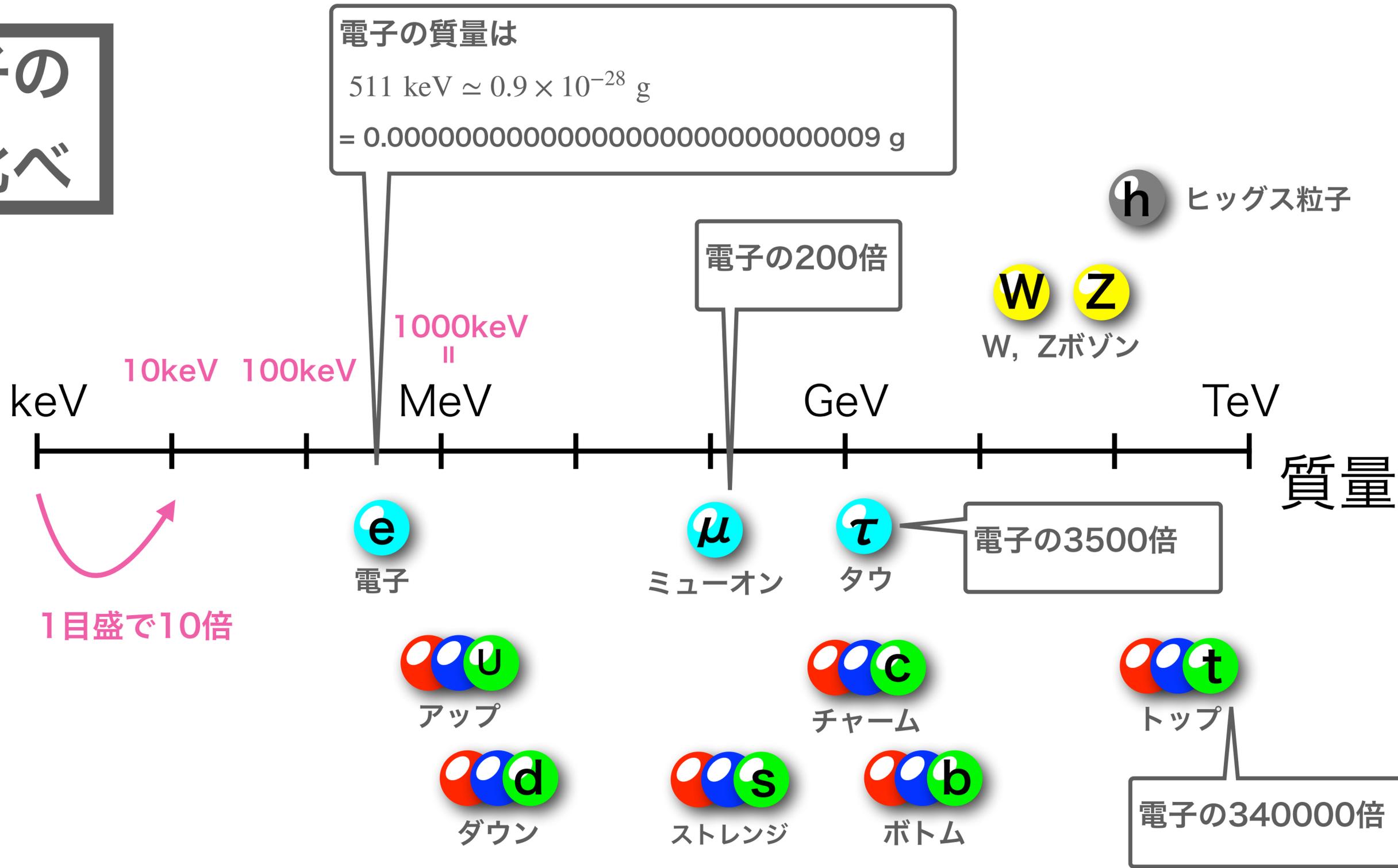


ヒッグスたん

<https://higgstan.com/>

素粒子の標準模型についてもう少し

素粒子の
重さ比べ



素粒子の標準模型についてもう少し

はいはいはい！
この「力を伝える粒子」ってのは何？

クォーク
quarks

レプトン
leptons

	1世代	2世代	3世代
アップクォーク	アップクォーク (u)	チャームクォーク (c)	トップクォーク (t)
ダウルクォーク	ダウルクォーク (d)	ストレンジクォーク (s)	ボトムクォーク (b)
電子	電子 (e)	ミュー粒子 (μ)	タウ粒子 (τ)
電子ニュートリノ	電子ニュートリノ (ν _e)	ミューニュートリノ (ν _μ)	タウニュートリノ (ν _τ)

ゲージ粒子 ... 力を媒介する粒子 gauge bosons

電磁気力 electromagnetic
強い力 strong
弱い力 weak

光子 (フォトン) γ

グルーオン g

ウィークボソン Z^0, W^+

ヒッグス粒子 Higgs bosons

ヒッグス粒子 H^0

えーっと

ヒック
<https://www.higgsboson.com/>

素粒子にはたらく相互作用（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）
- ・重力相互作用（重力）



素粒子にはたらく相互作用（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）

素粒子にはたららく相互作用（力）

- 電磁相互作用（電磁気力）



- 弱い相互作用（弱い力）

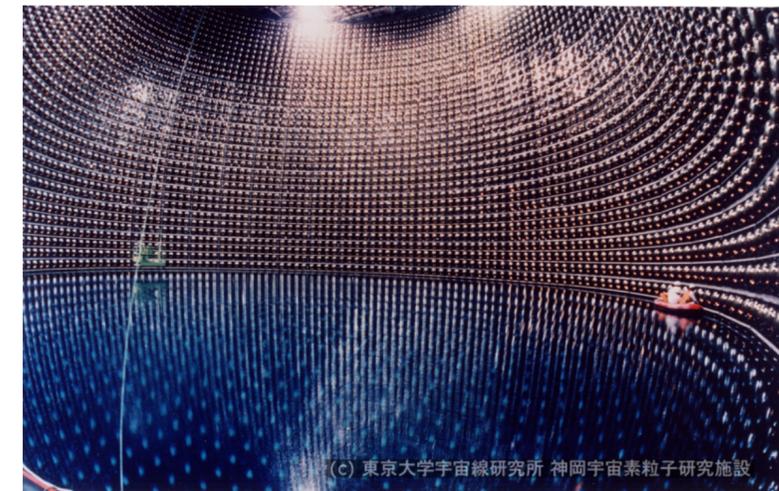


ニュートリノは電荷を持っていないけど「弱い相互作用」によって電子を弾き飛ばせる。

- 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）



素粒子にはたららく相互作用（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）



- ・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!)

素粒子にはたららく相互作用（力）

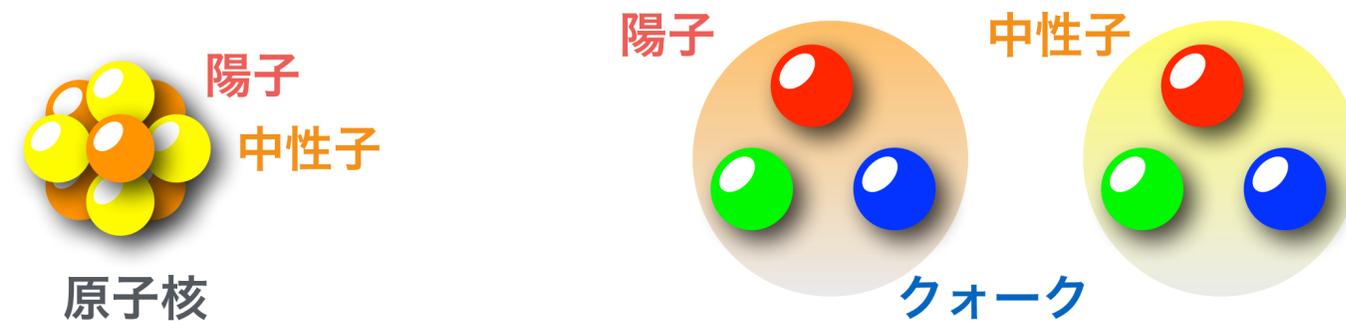
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



- ・強い相互作用（強い力）

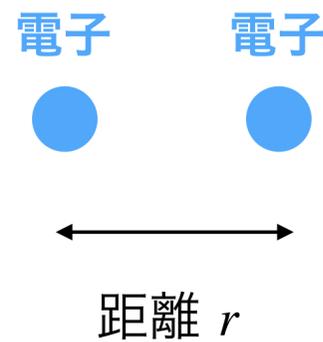


- ・重力相互作用（重力）



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！

重力がどれくらい弱いかわ、電磁気力と比較してみると、、、



$$\text{重力} : F_G = G \frac{m_e^2}{r^2} \quad (G : \text{Newton定数}, m_e : \text{電子質量})$$

$$\text{電磁気力} : F_E = \frac{e^2}{4\pi r^2} \quad (\text{自然単位系}, \frac{e^2}{4\pi} \simeq \frac{1}{137})$$

$$\rightarrow \text{比を取ると}, \frac{F_G}{F_E} = \frac{Gm_e^2}{e^2/(4\pi)} = \dots = 2.4 \times 10^{-43}$$

・・・電子どうしの場合、0.00000... (ゼロが43個) ...0001倍、重力の方が弱い。

素粒子にはたららく相互作用（力）

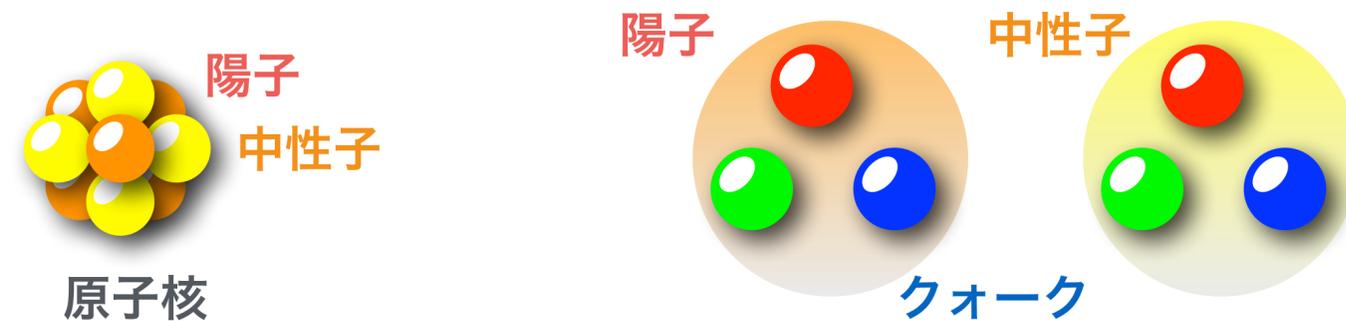
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



- ・強い相互作用（強い力）



- ・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！

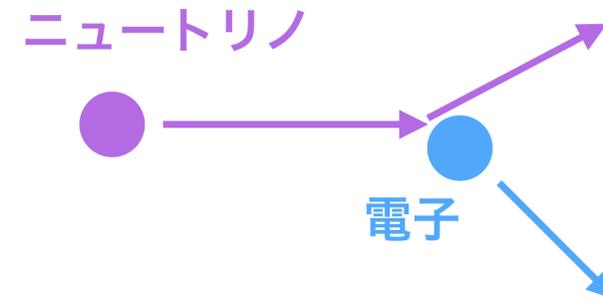
しかも、他の相互作用と違って**量子論的な記述**が未完。
(・・・この講義は重力の量子についてはこれ以上触れません・・・。)

素粒子にはたららく相互作用（力）

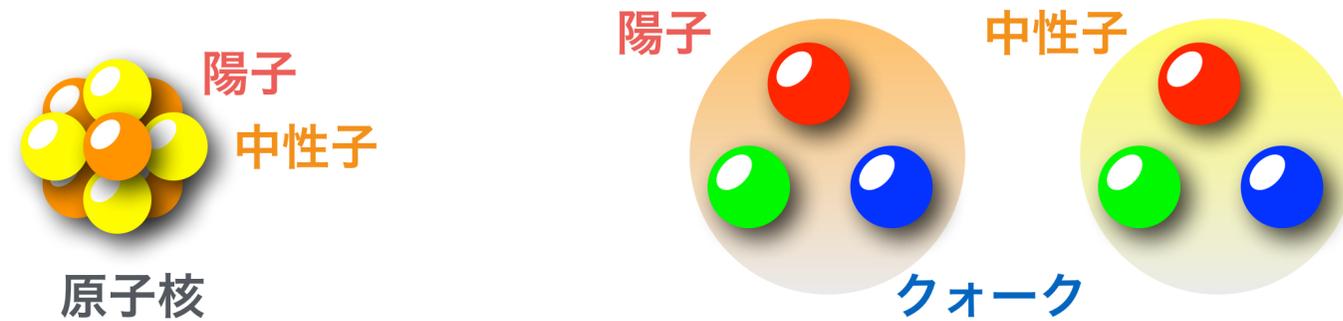
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



- ・強い相互作用（強い力）



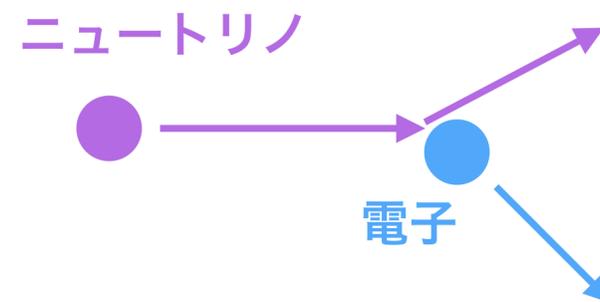
実は素粒子どうしの相互作用（力）も、素粒子によって媒介されている。

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。

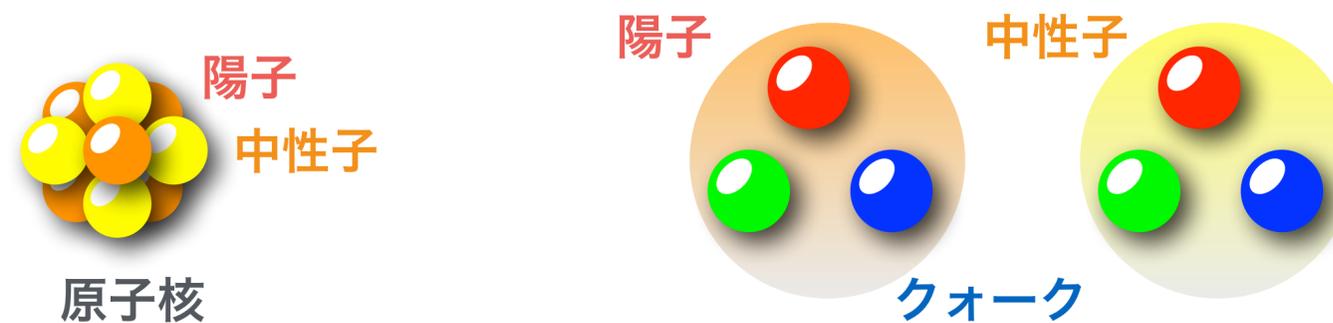
・電磁相互作用（電磁気力）



・弱い相互作用（弱い力）

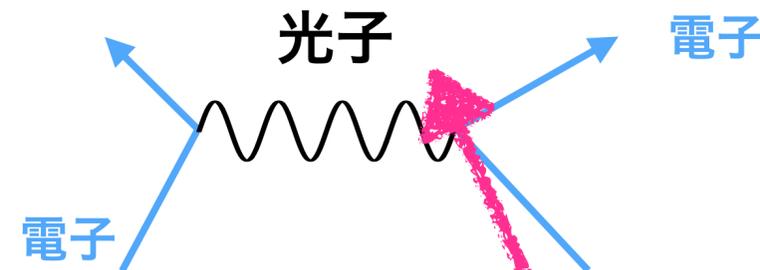


・強い相互作用（強い力）

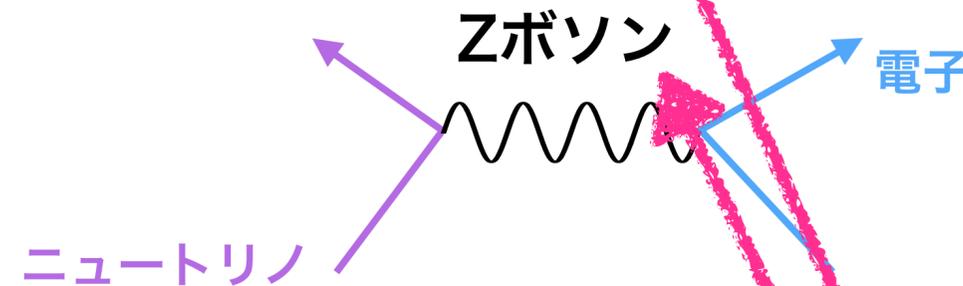


実は素粒子どうしの相互作用（力）も、素粒子によって媒介されている。

・電磁相互作用（電磁気力）



・弱い相互作用（弱い力）



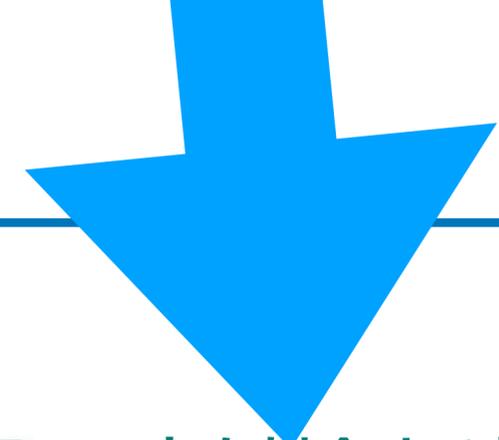
・強い相互作用（強い力）



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」。

素粒子の標準模型についてもう少し



物質粒子 matter (fermions)

ゲージ粒子 ... 力を媒介する粒子 gauge bosons

		1 世代	2 世代	3 世代			
クォーク quarks	電磁気力 electromagnetic				強い力 strong		
		アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク		光子 (フォトン)	
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク		グルーオン			
	レプトン leptons	Higgs bosons					
			電子	ミュー粒子		タウ粒子	
電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ						

・・・というわけです。

もうちょっとちゃんと
記述しようとする「場の量子論」が
必要になります。。



ヒッグス
<https://...om/>

素粒子の標準模型についてもう少し

- 標準模型は「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。
- 標準模型のラグランジアン↓

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} && \dots \text{ゲージ場} \\
 & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi && \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) && \dots \text{ヒッグス場} \\
 & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} && \dots \text{湯川相互作用}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

現時点で最も成功している素粒子物理の理論。

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons				
クォーク quarks	1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic		光子 (フォトン)	
					強い力 strong		グルーオン
						弱い力 weak	
				ヒッグス粒子 Higgs bosons			ヒッグス粒子
							

素粒子の標準模型についてもう少し

- 標準模型は「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。
- 標準模型のラグランジアン↓

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} \quad \dots \text{ゲージ場} \\
 & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \quad \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) \quad \dots \text{ヒッグス場} \\
 & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} \quad \dots \text{湯川相互作用}
 \end{aligned}$$

例えば電子と光子の相互作用は・・・

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

現時点で最も成功している素粒子物理の理論。

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
	1 世代	2 世代	3 世代	
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	電磁気力 electromagnetic 光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	強い力 strong グルーオン
	電子	ミュー粒子	タウ粒子	弱い力 weak ウィークボソン
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子 Higgs bosons
				ヒッグス粒子

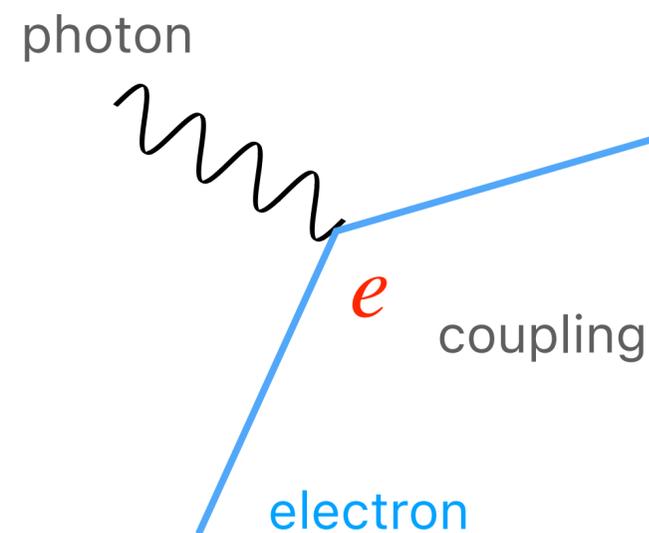
素粒子の標準模型

		物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
		1世代	2世代	3世代		
クォーク quarks	電磁気力 electromagnetic	アップ クォーク 	チャーム クォーク 	トップ クォーク 	強い力 strong	光子 (フォトン)
	強い力	ダウン クォーク 	ストレンジ クォーク 	ボトム クォーク 		グルーオン
	弱い力 weak	電子 	ミュー粒子 	タウ粒子 		ウィークボソン
レプトン leptons					ヒッグス粒子 Higgs bosons	
					ヒッグス粒子 	

例えば電子と光子の
相互作用は・・・

$$+ \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \ni$$

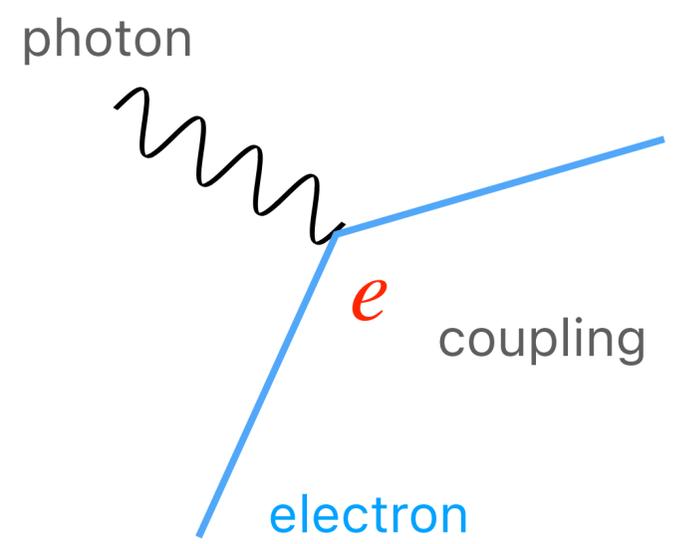
$$e A_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu\psi$$



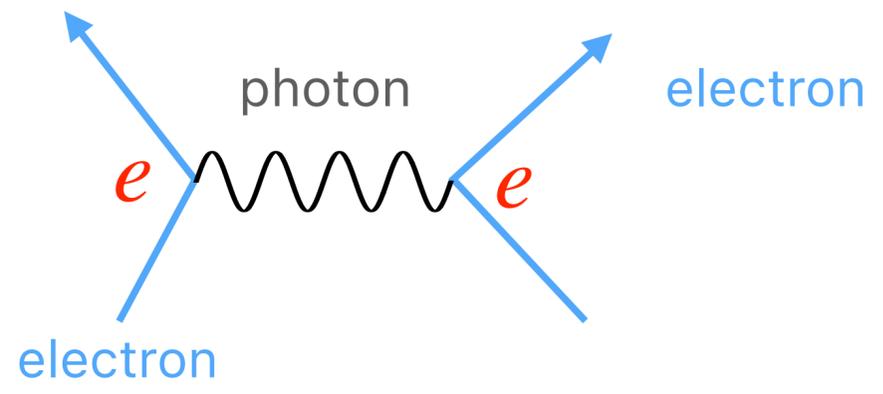
$$(e = 0.3028\dots)$$

素粒子の標準模型

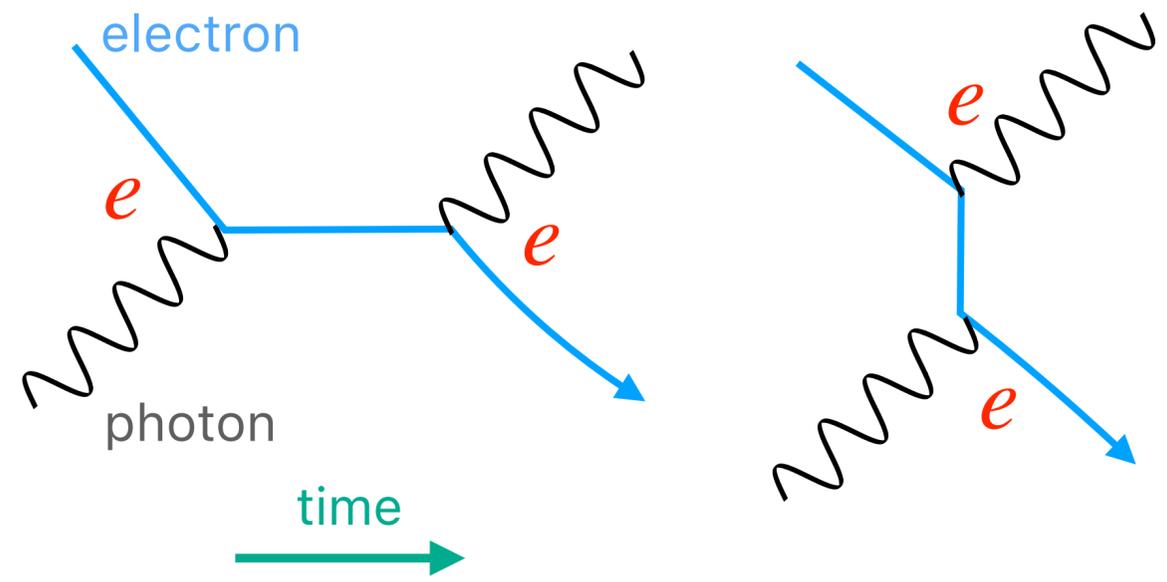
$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$



		物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
		1世代	2世代	3世代		
クォーク quarks	電磁気力 electromagnetic					光子 (フォトン)
		アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク		
		強い力 strong				
	ダウン クォーク		ストレンジ クォーク	ボトム クォーク		
	弱い力 weak					
		電子	ミュー粒子	タウ粒子		
電子 ニュートリノ		ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ		ヒッグス粒子 Higgs bosons	
電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子			



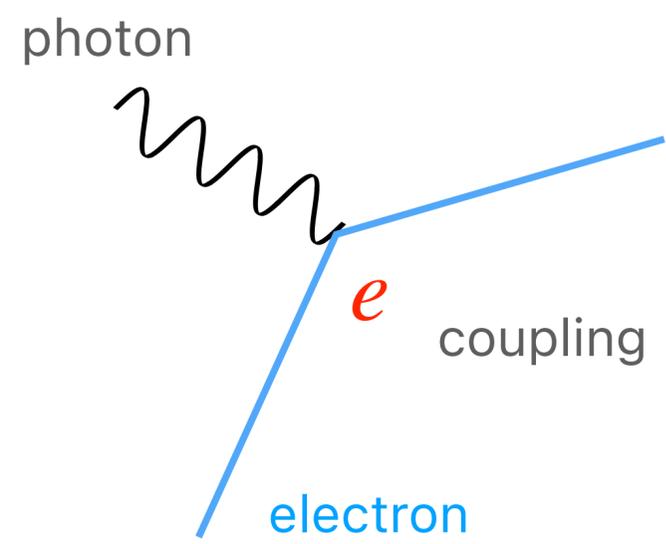
電子は互いに反発する



コンプトン散乱
 $e + \gamma \rightarrow e + \gamma$

同じ相互作用項が異なるプロセスを記述している

素粒子の標準模型

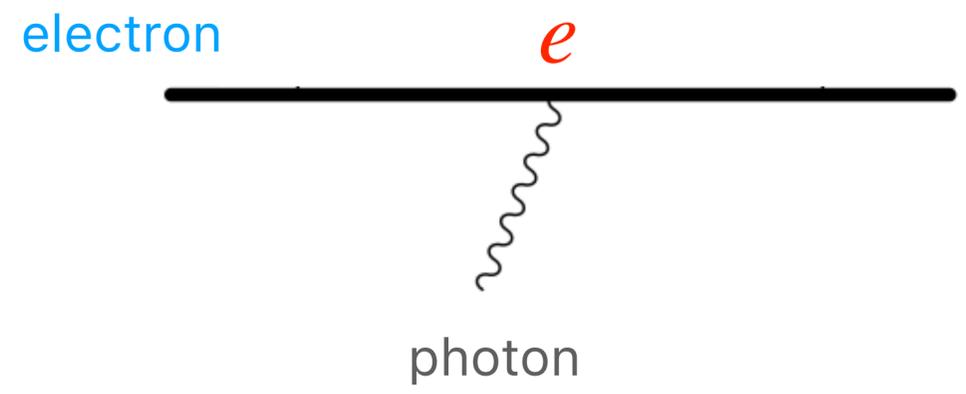


$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

• 電子の磁気モーメント

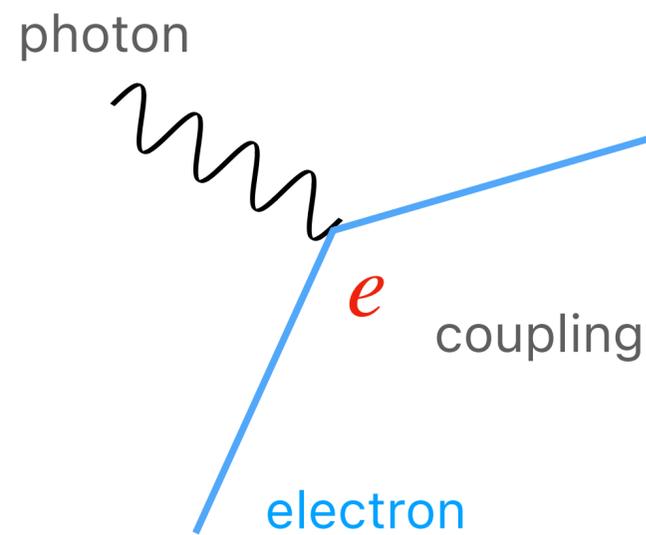
ハミルトニアン: $H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

$g = 2$



		物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
		1世代	2世代	3世代		
クォーク quarks	電磁気力 electromagnetic	 アップ クォーク	 チャーム クォーク	 トップ クォーク	 光子 (フォトン)	
	強い力 strong	 ダウン クォーク	 ストレンジ クォーク	 ボトム クォーク		 グルーオン
	弱い力 weak	 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子		 ウィークボソン
レプトン leptons	強い力 strong	 電子 ニュートリノ	 ミュー ニュートリノ	 タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子 Higgs bosons	
	弱い力 weak				 ヒッグス粒子	

素粒子の標準模型



$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

• 電子の磁気モーメント

ハミルトニアン: $H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

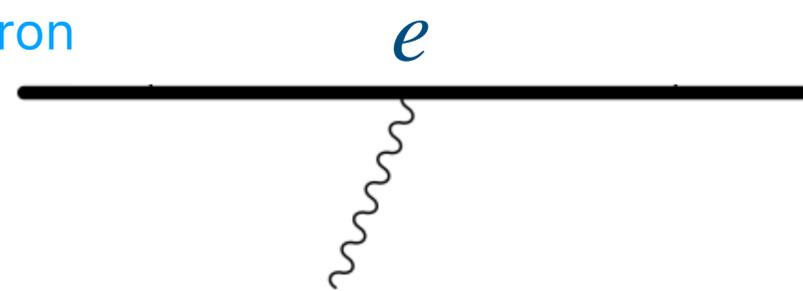
$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \dots \right)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137.0\dots}$$

微細構造定数

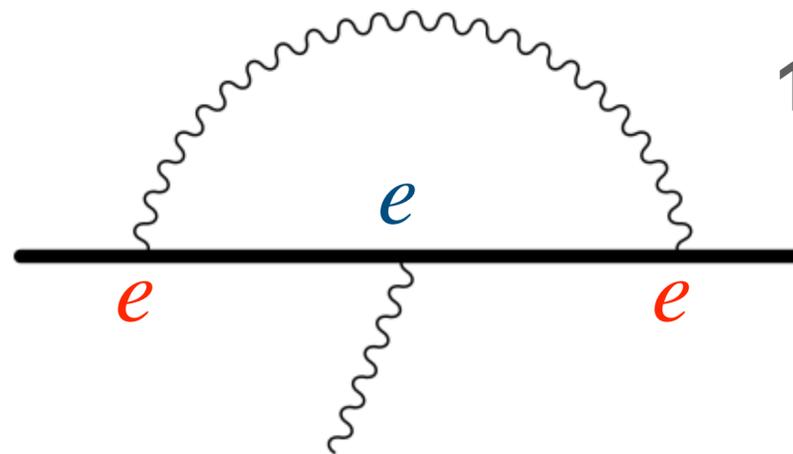
物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)
アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	強い力 strong	グルーオン
ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク		弱い力 weak
電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子 Higgs bosons	
			ヒッグス粒子	

electron



photon

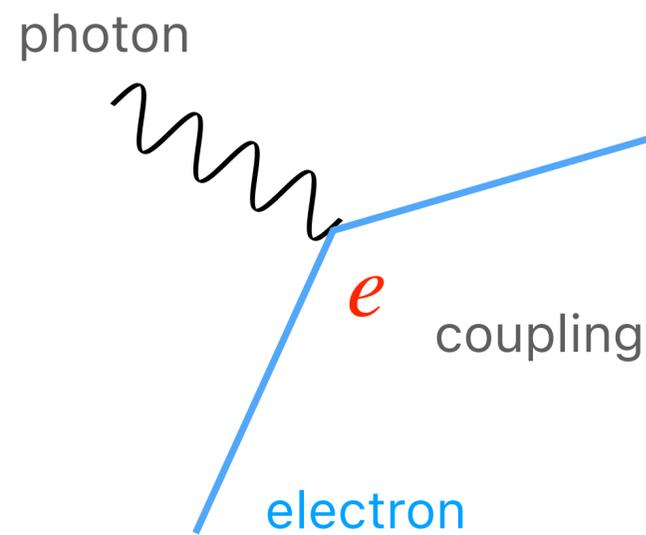
+



1-loop 補正.

👉 場の量子論の教科書に計算あり

素粒子の標準模型



$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

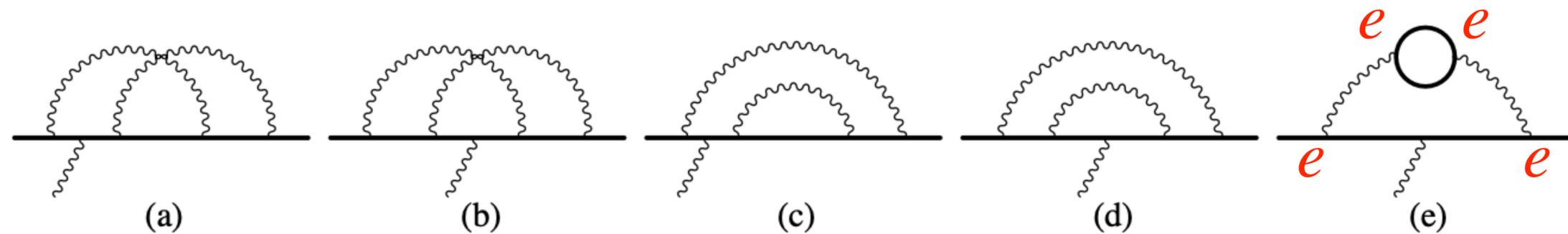
• 電子の磁気モーメント

$$\text{ハミルトニアン: } H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$$

$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 A^{(4)} + \dots \right)$$

$$A^{(4)} = -0.328\dots$$

• 2-loop, 7 diagrams in total



物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	1 世代	2 世代	3 世代	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	強い力 strong	グルーオン
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	弱い力 weak	ウィークボソン
レプトン leptons	電子 ニュートリノ	ミュー粒子 ニュートリノ	タウ粒子 ニュートリノ	ヒッグス粒子 Higgs bosons	
					ヒッグス粒子

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137.0\dots}$$

素粒子の標準模型

$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

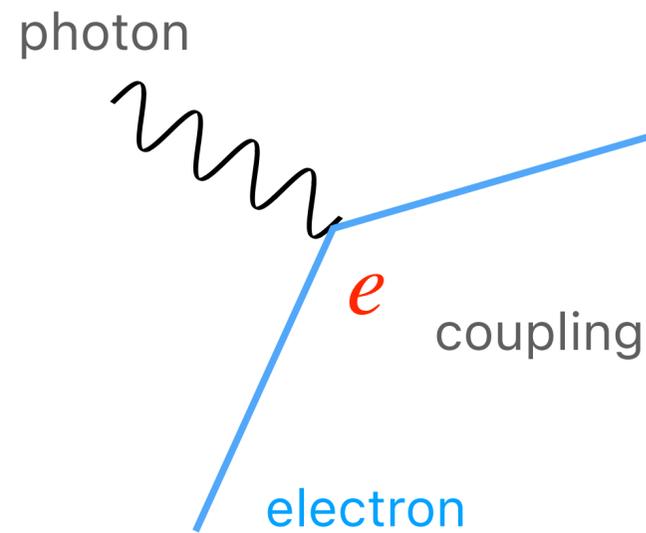
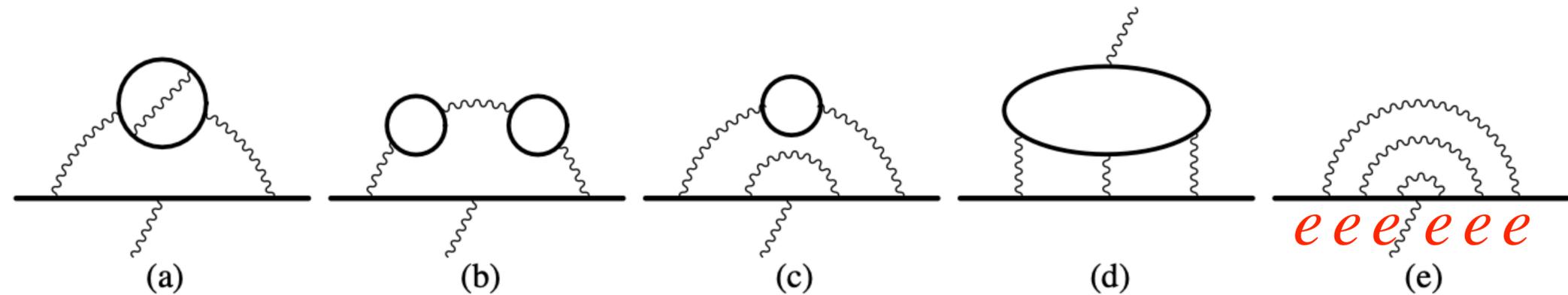
• 電子の磁気モーメント

$$\text{ハミルトニアン: } H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$$

$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 A^{(4)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 A^{(6)} + \dots \right)$$

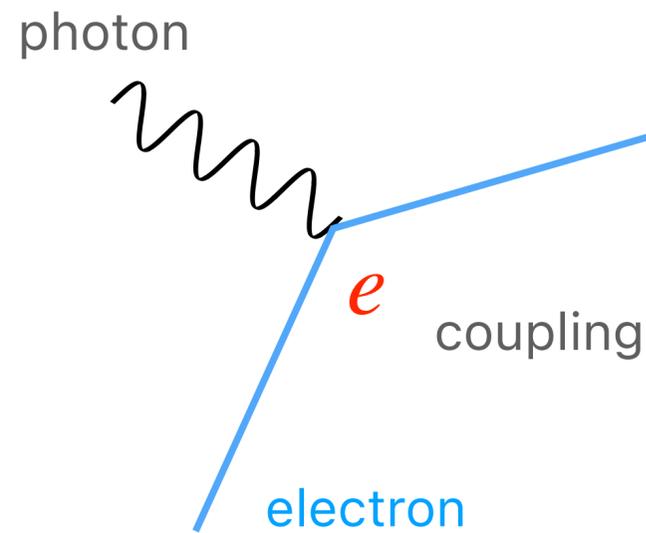
$$A^{(6)} = 1.182\dots$$

• **3-loop**, 72 diagrams in total



物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	1 世代	2 世代	3 世代	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	強い力 strong	グルーオン
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク		弱い力 weak
レプトン leptons	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ		ヒッグス粒子 Higgs bosons
					ヒッグス粒子

素粒子の標準模型



$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

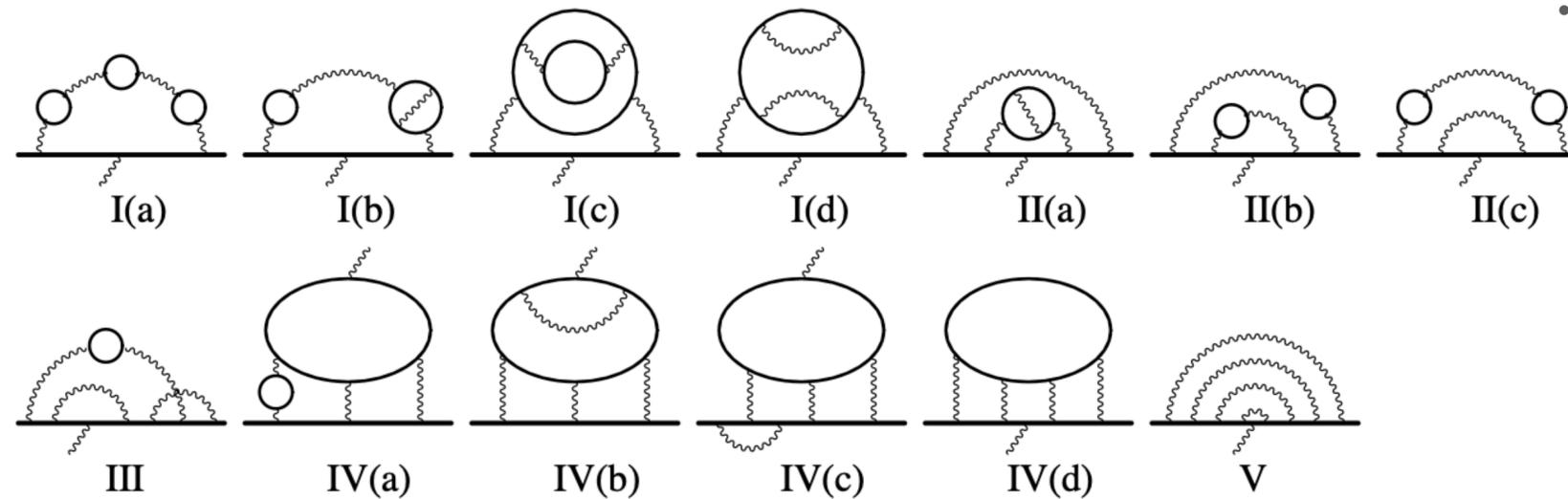
• 電子の磁気モーメント

ハミルトニアン: $H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 A^{(4)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 A^{(6)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^4 A^{(8)} + \dots \right)$$

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	1 世代	2 世代	3 世代	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	強い力 strong	グルーオン
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク		弱い力 weak
レプトン leptons	電子 ニュートリノ	ミュー粒子 ニュートリノ	タウ粒子 ニュートリノ		ヒッグス粒子 Higgs bosons
					ヒッグス粒子

• 4-loop, 891 diagrams in total

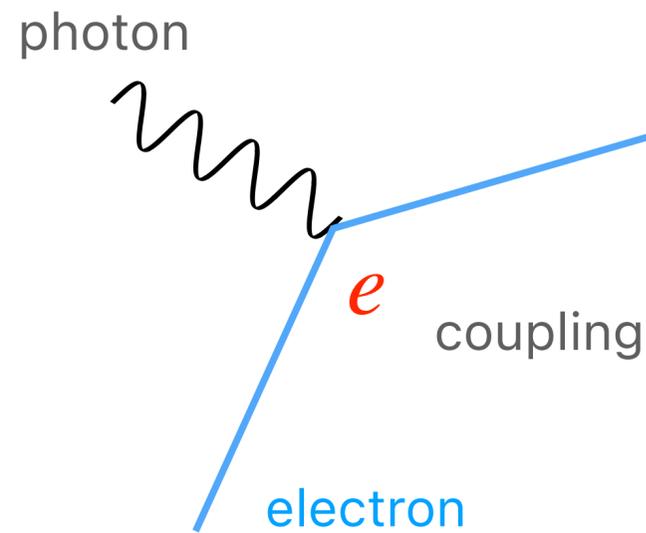


素粒子の標準模型

$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

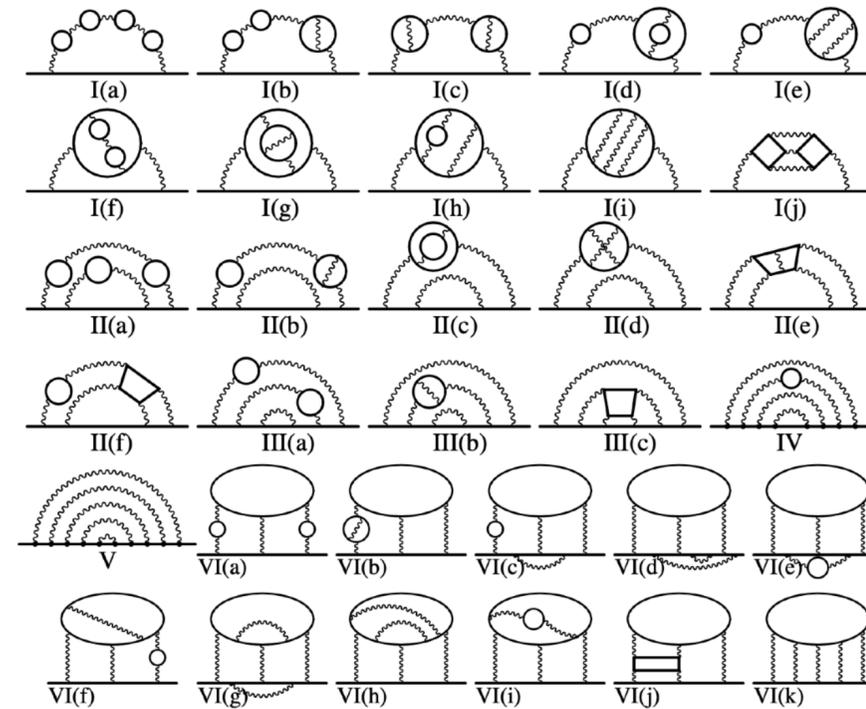
• 電子の磁気モーメント

$$\text{ハミルトニアン: } H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$$



物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
	1世代	2世代	3世代	
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	電磁気力 electromagnetic 光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	強い力 strong グルーオン
				弱い力 weak ウィークボソン
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子

$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 A^{(4)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 A^{(6)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^4 A^{(8)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^5 A^{(10)} + \dots \right)$$

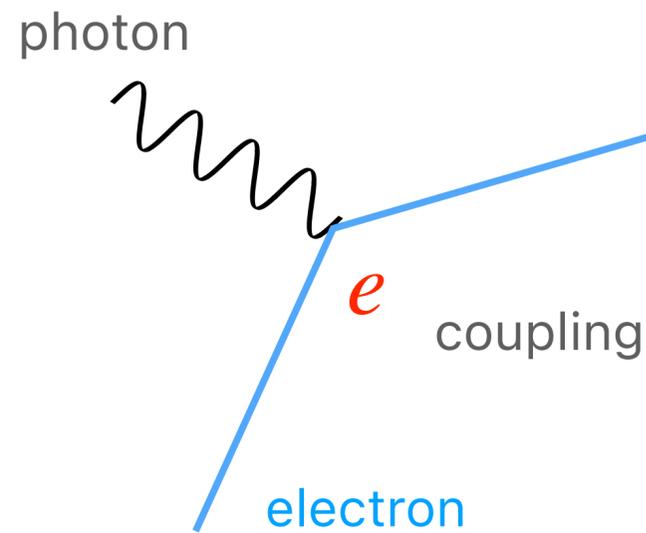


• 5-loop,
12672 diagrams in total

素粒子の標準模型

$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

• 電子の磁気モーメント



ハミルトニアン: $H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 A^{(4)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 A^{(6)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^4 A^{(8)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^5 A^{(10)} + \dots \right)$$

一方で、電子の磁気モーメントは実験的にも超精密測定が行われている

$$g = 2(1.001\,159\,652\,180\,59 \pm 0.000\,000\,000\,000\,13) \quad [\text{Fan et. al. } 2209.13084]$$

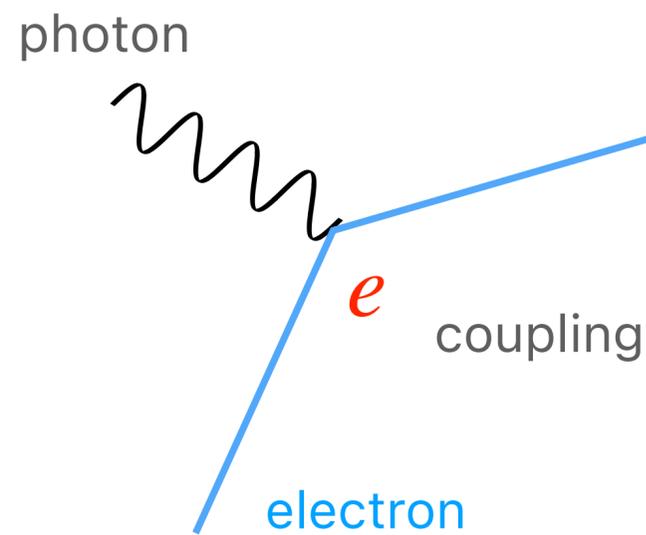
実験と理論の比較により、微細構造定数 α の値を決めることができる

$$\alpha^{-1} = 137.035\,999\,166 \pm 0.000\,000\,015$$

👉 最も精密な α の測定の1つ.

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	強い力 strong	グルーオン
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	弱い力 weak	ウィークボソン
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons	
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子	

素粒子の標準模型



$$e A_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

• 電子の磁気モーメント

ハミルトニアン: $H = -g \frac{e}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

$$g = 2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 A^{(4)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 A^{(6)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^4 A^{(8)} + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^5 A^{(10)} + \dots \right)$$

一方で、電子の磁気モーメントは実験的にも超精密測定が行われている

$$g = 2(1.001\ 159\ 652\ 180\ 59 \pm 0.000\ 000\ 000\ 000\ 13) \text{ [Fan et. al. 2209.13084]}$$

実験と理論の比較により、微細構造定数 α の値を決めることができる

$$\alpha^{-1} = 137.035\ 999\ 166 \pm 0.000\ 000\ 015$$

👉 最も精密な α の測定の1つ.

$\mathcal{O}(10^{-10})$ の精度で一致!

さらに独立した α の超精密測定の測定結果もある

$$\alpha^{-1} = 137.035\ 999\ 046 \pm 0.000\ 000\ 027 \text{ (Cs) [Parker et. al. 1812.04130]}$$

$$\alpha^{-1} = 137.035\ 999\ 206 \pm 0.000\ 000\ 011 \text{ (Rb) [Morel et. al. Nature, 2020]}$$

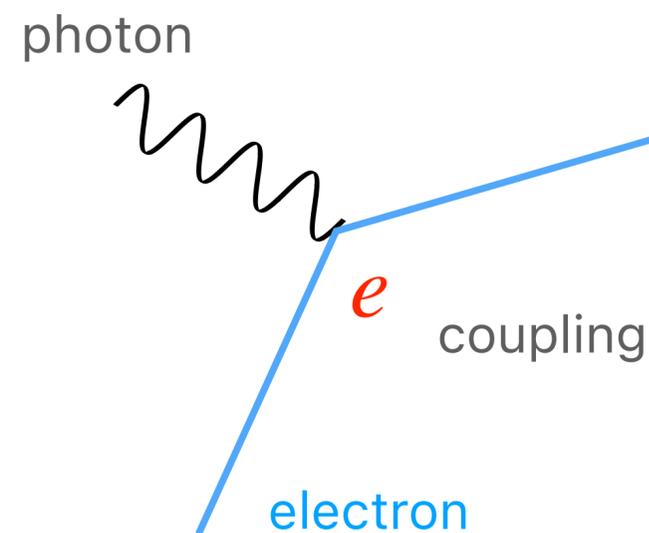
物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
	1世代	2世代	3世代	
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	電磁気力 electromagnetic 光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	強い力 strong グルーオン
				弱い力 weak ウィークボソン
レプトン leptons	電子 ニュートリノ	ミュー粒子 ニュートリノ	タウ粒子 ニュートリノ	ヒッグス粒子 Higgs bosons ヒッグス粒子

素粒子の標準模型

		物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
		1世代	2世代	3世代		
クォーク quarks	電磁気力 electromagnetic	アップ クォーク 	チャーム クォーク 	トップ クォーク 	光子 (フォトン) 	
	強い力 strong	ダウン クォーク 	ストレンジ クォーク 	ボトム クォーク 	グルーオン 	
	弱い力 weak	電子 	ミュー粒子 	タウ粒子 	ウィークボソン 	
レプトン leptons	電子 ニュートリノ 	ミュー ニュートリノ 	タウ ニュートリノ 	ヒッグス粒子 Higgs bosons 		

$$+ \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \ni$$

$$e A_\mu \bar{\psi}\gamma^\mu\psi$$



$$(e = 0.3028\dots)$$

素粒子の標準模型についてもう少し

- 標準模型は「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。
- 標準模型のラグランジアン↓

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} \quad \dots \text{ゲージ場} \\
 & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \quad \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) \quad \dots \text{ヒッグス場} \\
 & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} \quad \dots \text{湯川相互作用}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

現時点で最も成功している素粒子物理の理論。

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
	1世代	2世代	3世代		
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	強い力 strong	グルーオン
				弱い力 weak	ウィークボソン
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons	
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子	

素粒子の標準模型についてもう少し

- 標準模型は「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。
- 標準模型のラグランジアン↓

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} \quad \dots \text{ゲージ場} \\
 & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \quad \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\
 & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) \quad \dots \text{ヒッグス場} \\
 & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} \quad \dots \text{湯川相互作用}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

現時点で最も成功している素粒子物理の理論。

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
	1 世代	2 世代	3 世代		
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	electromagnetic strong weak	光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク		グルーオン
	電子	ミュー粒子	タウ粒子		ウィークボソン
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ		ヒッグス粒子 Higgs bosons
					ヒッグス粒子

素粒子の標準模型についてもう少し

- 標準模型は「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。
- 標準模型のラグランジアン↓

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} \quad \dots \text{ゲージ場} \\ & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \quad \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\ & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) \quad \dots \text{ヒッグス場} \\ & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} \quad \dots \text{湯川相互作用} \end{aligned}$$

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

現時点で最も成功している素粒子物理の理論。

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
クォーク quarks	1世代 アップ クォーク u	2世代 チャーム クォーク c	3世代 トップ クォーク t	電磁気力 electromagnetic 光子 (フォトン) γ
	ダウン クォーク d	ストレンジ クォーク s	ボトム クォーク b	強い力 strong グルーオン g
	アップ クォーク u	チャーム クォーク c	トップ クォーク t	弱い力 weak W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰ ウィークボソン
レプトン leptons	電子 e	ミュー粒子 μ	タウ粒子 τ	ヒッグス粒子 Higgs bosons ヒッグス粒子 H ⁰
	電子 ニュートリノ ν_e	ミュー ニュートリノ ν_μ	タウ ニュートリノ ν_τ	

素粒子の標準模型についてもう少し

- 標準模型は「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。
- 標準模型のラグランジアン↓

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} \quad \dots \text{ゲージ場} \\ & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi \quad \dots \text{物質粒子 + ゲージ相互作用} \\ & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) \quad \dots \text{ヒッグス場} \\ & + \sum y\phi\bar{\psi}\psi + \text{h.c.} \quad \dots \text{湯川相互作用} \end{aligned}$$

このたったの数行で無数の素粒子物理の実験事実をとんでもない精度で記述出来ている。

現時点で最も成功している素粒子物理の理論。

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
クォーク quarks	1 世代	2 世代	3 世代	電磁気力 electromagnetic
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	強い力 strong
				弱い力 weak
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	

**ヒッグス粒子
Higgs bosons**

ヒッグス粒子

素粒子の標準模型についてもう少し

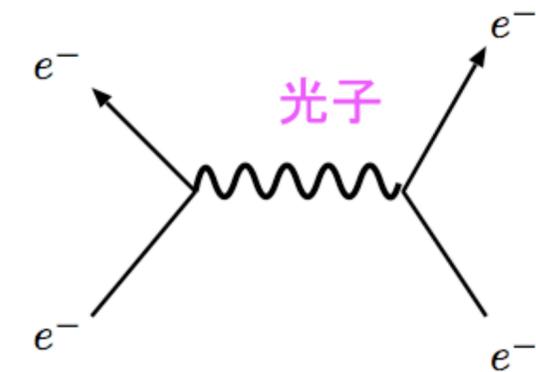
物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons				
クォーク quarks	1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン)		
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク		強い力 strong	グルーオン	
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク			弱い力 weak	ウィークボゾン
	レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons		ヒッグス粒子
		電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ			

▶ 粒子同士に働く「力」も素粒子によって媒介されている。

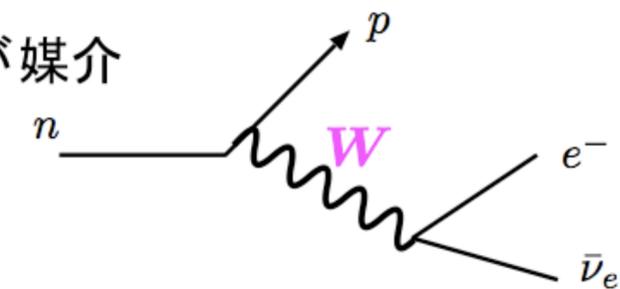
「3つの力」 = ゲージ相互作用

ゲージ粒子 (ゲージボゾン)
が媒介している。

- 電磁気力 ... 光子が媒介



- 弱い力 ... W, Z ボゾンが媒介



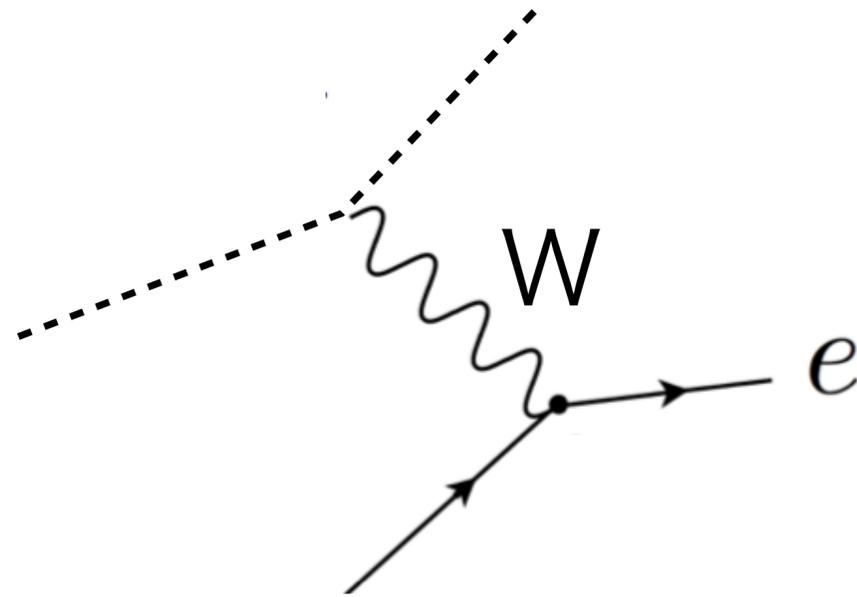
- 強い力 ... グルーオンが媒介



素粒子の標準模型についてもう少し

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
	1世代	2世代	3世代	
クォーク quarks	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク	電磁気力 electromagnetic 光子 (フォトン)
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	強い力 strong グルーオン
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	弱い力 weak ウィークボソン
レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons ヒッグス粒子

▶ 相互作用は粒子の種類を変えることもある。



ニュートリノ

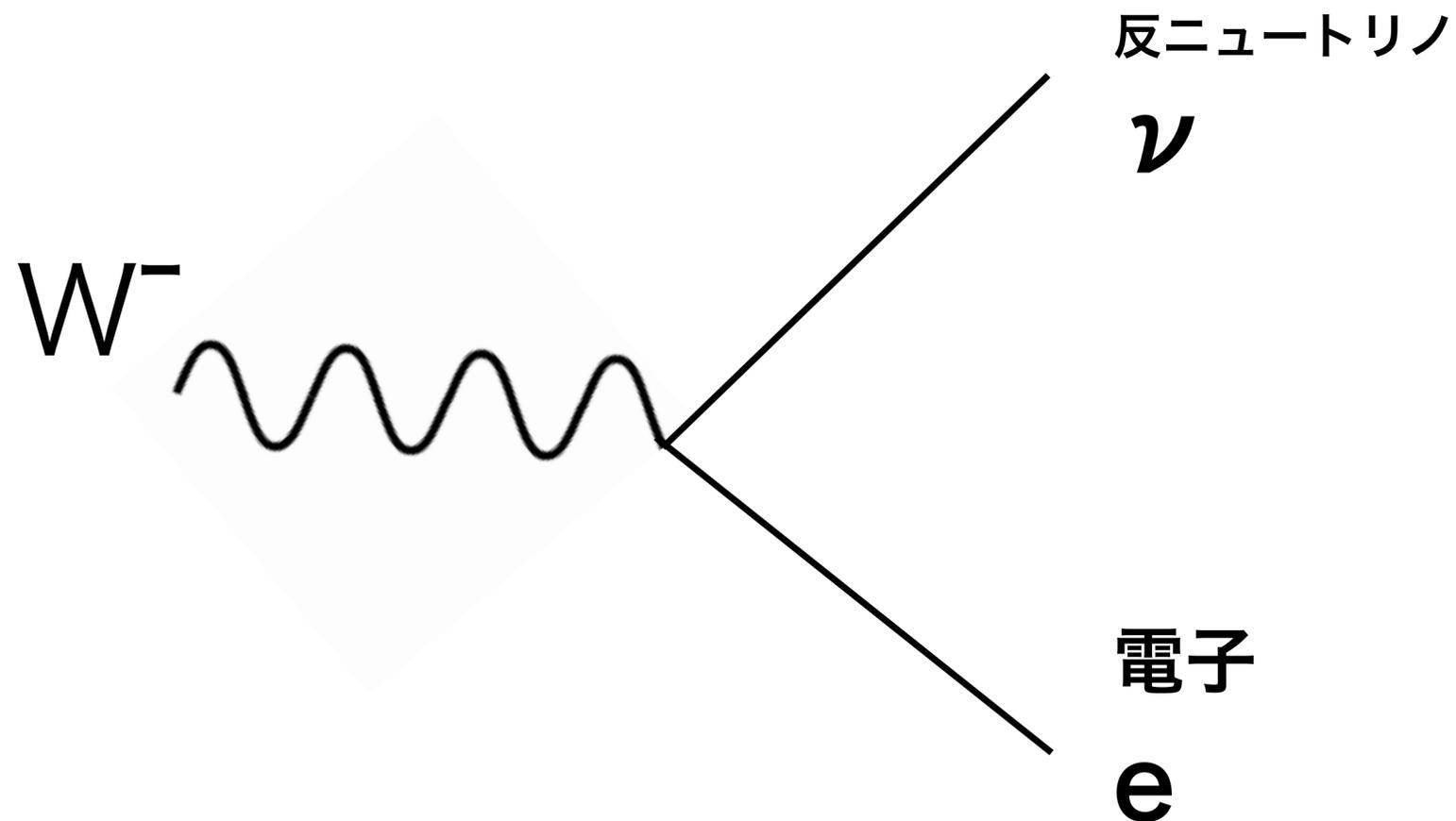
ν

W との相互作用で
ニュートリノが電子に化ける

素粒子の標準模型についてもう少し

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons			
クォーク quarks	1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic	 光子 (フォトン)	
	アップ クォーク	チャーム クォーク	トップ クォーク		強い力 strong	 グルーオン
	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク			弱い力 weak
	レプトン leptons	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ヒッグス粒子 Higgs bosons	
		電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	 ヒッグス粒子	

▶ 相互作用は粒子同士の散乱だけでなく「崩壊」も引き起こす。



W^- 粒子 は電子と
反ニュートリノに
崩壊する

素粒子の標準模型についてもう少し

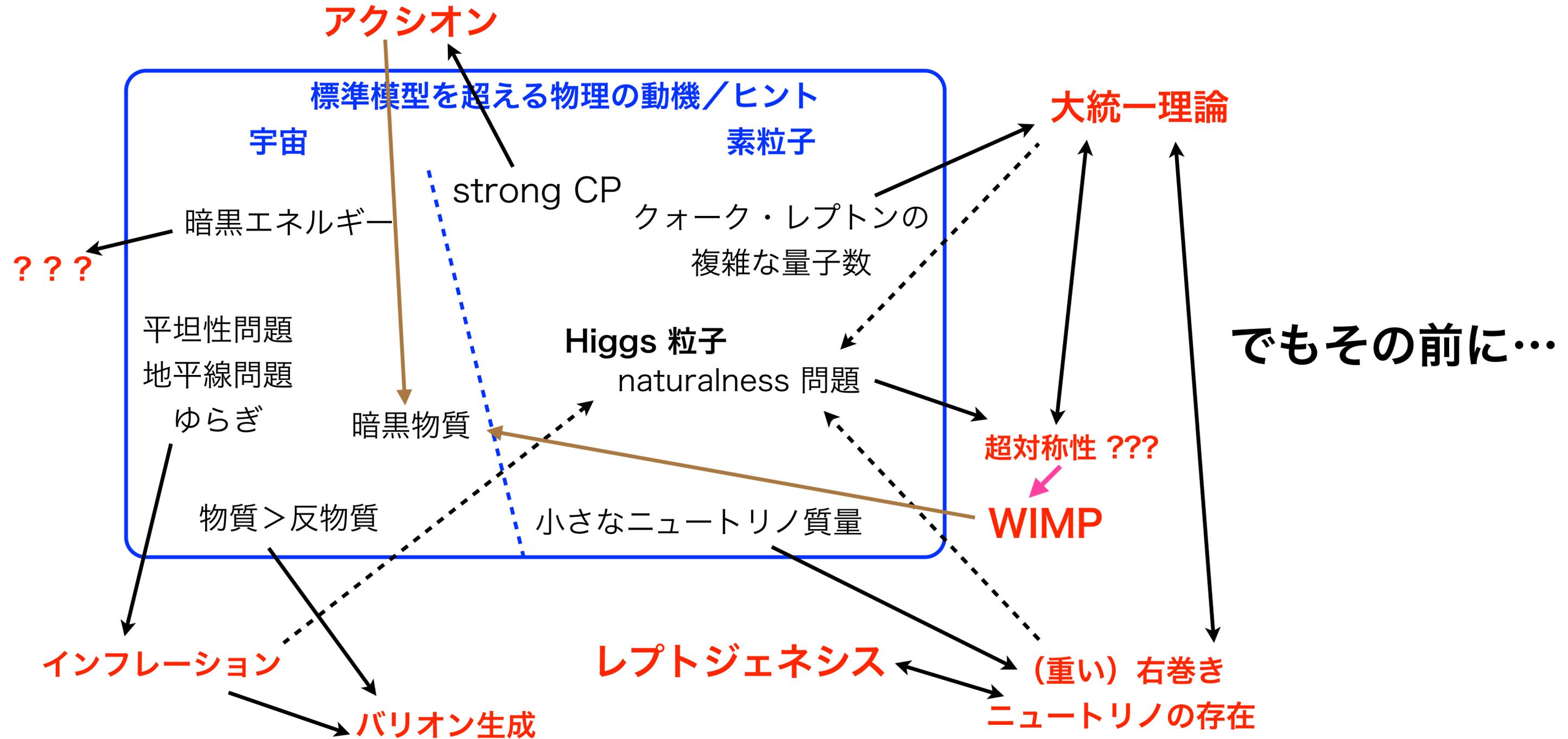
物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
クォーク quarks	1世代	2世代	3世代	電磁気力 electromagnetic
	 アップ クォーク	 チャーム クォーク	 トップ クォーク	 光子 (フォトン)
 ダウン クォーク	 ストレンジ クォーク	 ボトム クォーク	 グルーオン	
レプトン leptons	 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子	強い力 strong
	 電子 ニュートリノ	 ミュー ニュートリノ	 タウ ニュートリノ	 ウィークボソン
				弱い力 weak
			 ヒッグス粒子	

※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

ではいよいよ「標準模型を超える物理」の話をしてしたいと思います。



再び slido

再度読み込みをお願いします。

(無料版で1回あたりの質問が限られているので…)

お手数かけてすみません。

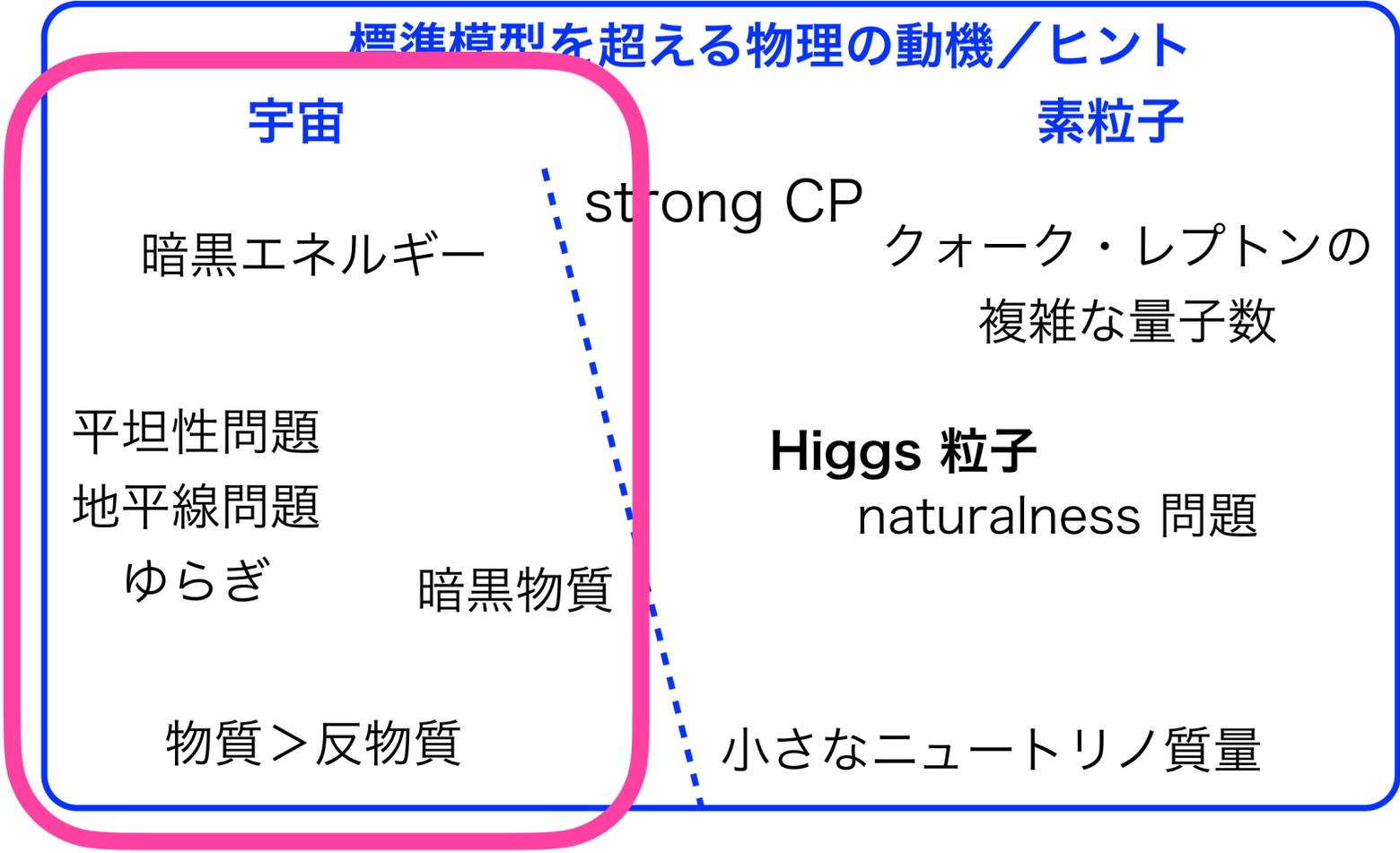
講義の資料を置いておくためのWebページ

今日のスライドをこちらに置いておきます 🖱️

来週以降も同様です。

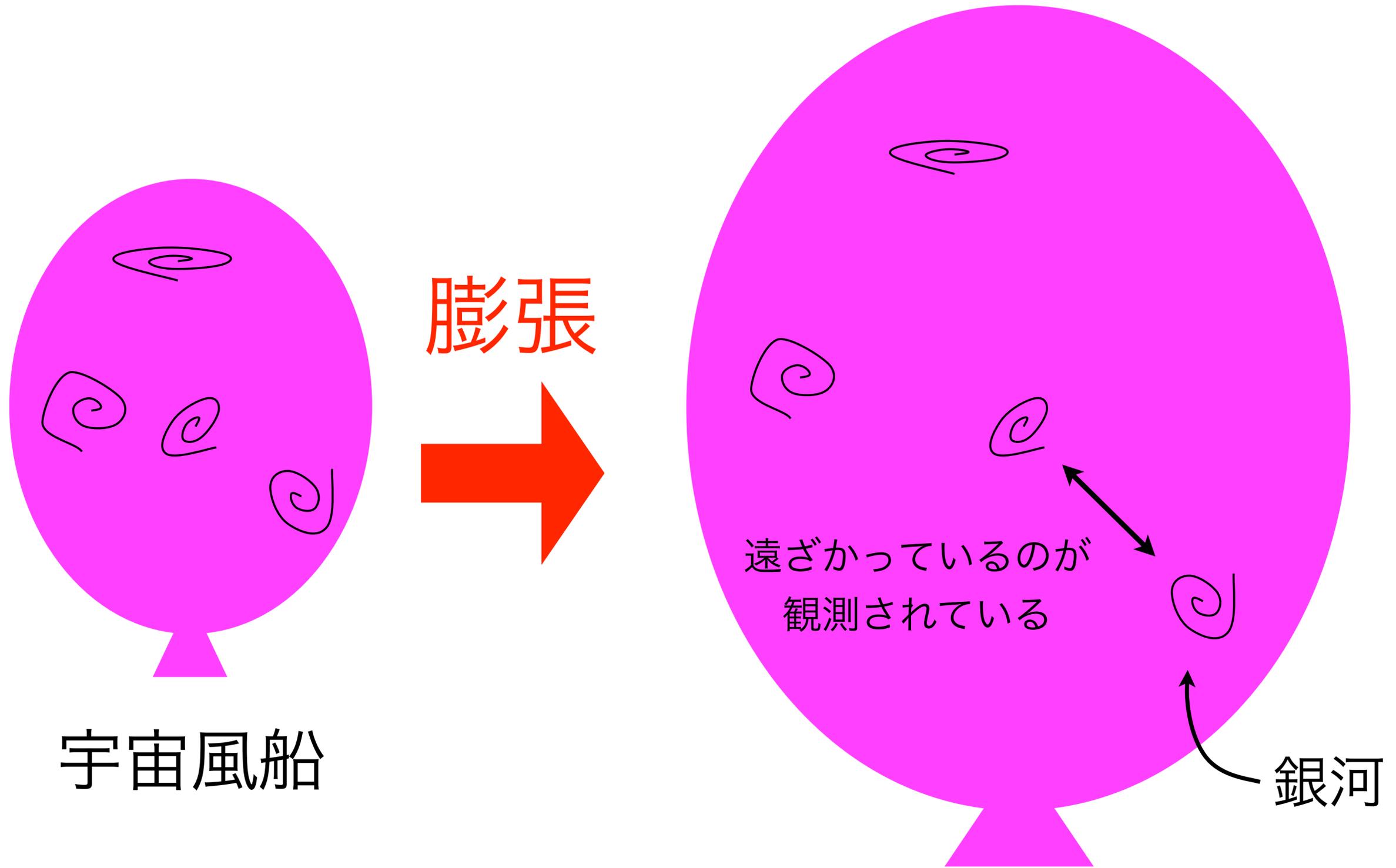


ではいよいよ「標準模型を超える物理」の話をしてしたいと思います。



まず宇宙の話から

宇宙は膨張している。



宇宙風船

膨張

遠ざかっているのが
観測されている

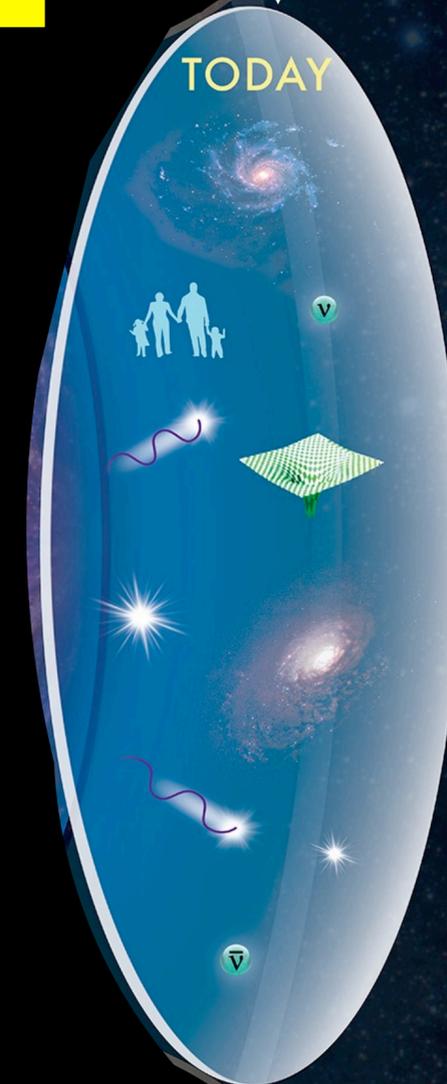
銀河

宇宙は膨張している。

時間を巻き戻すと・・・



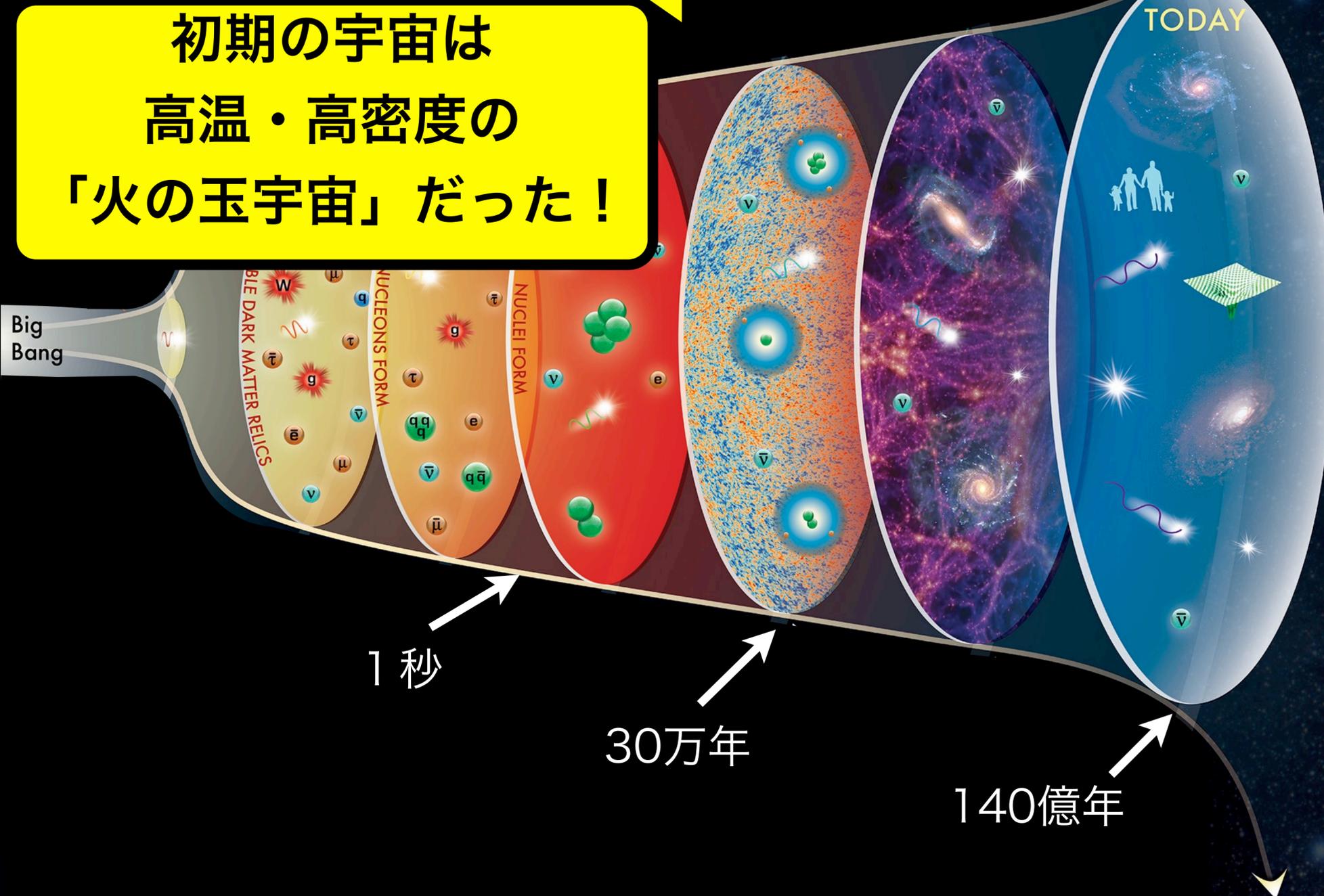
現在の宇宙



宇宙は膨張している。

時間を巻き戻すと・・・

現在の宇宙



宇宙は膨張している。

時間を巻き戻すと・・・

現在の宇宙

初期の宇宙は
高温・高密度の
「火の玉宇宙」だった！

証拠あります！

ホント??
証拠はあるの???



1秒

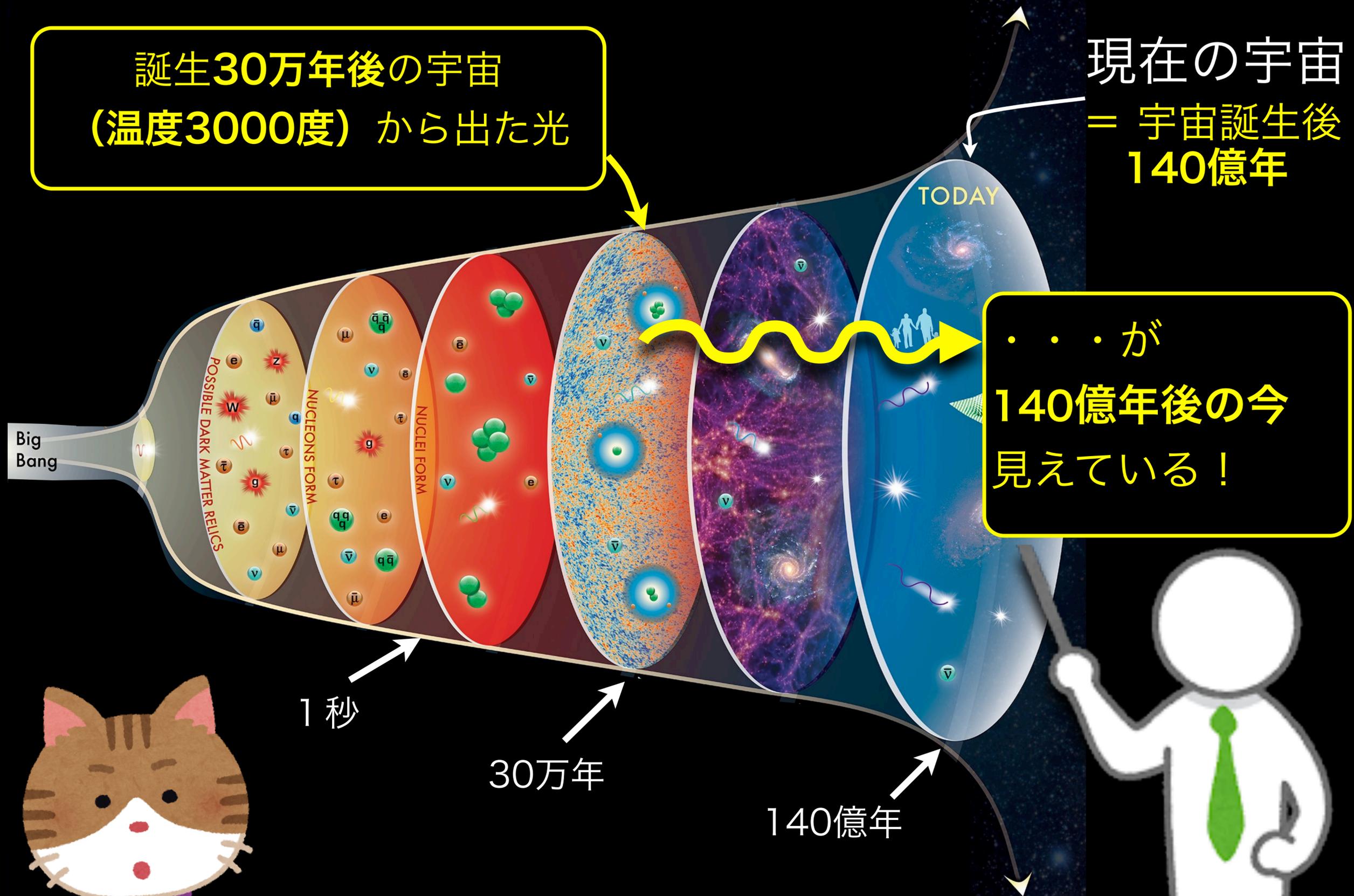
30万年

140億年



誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

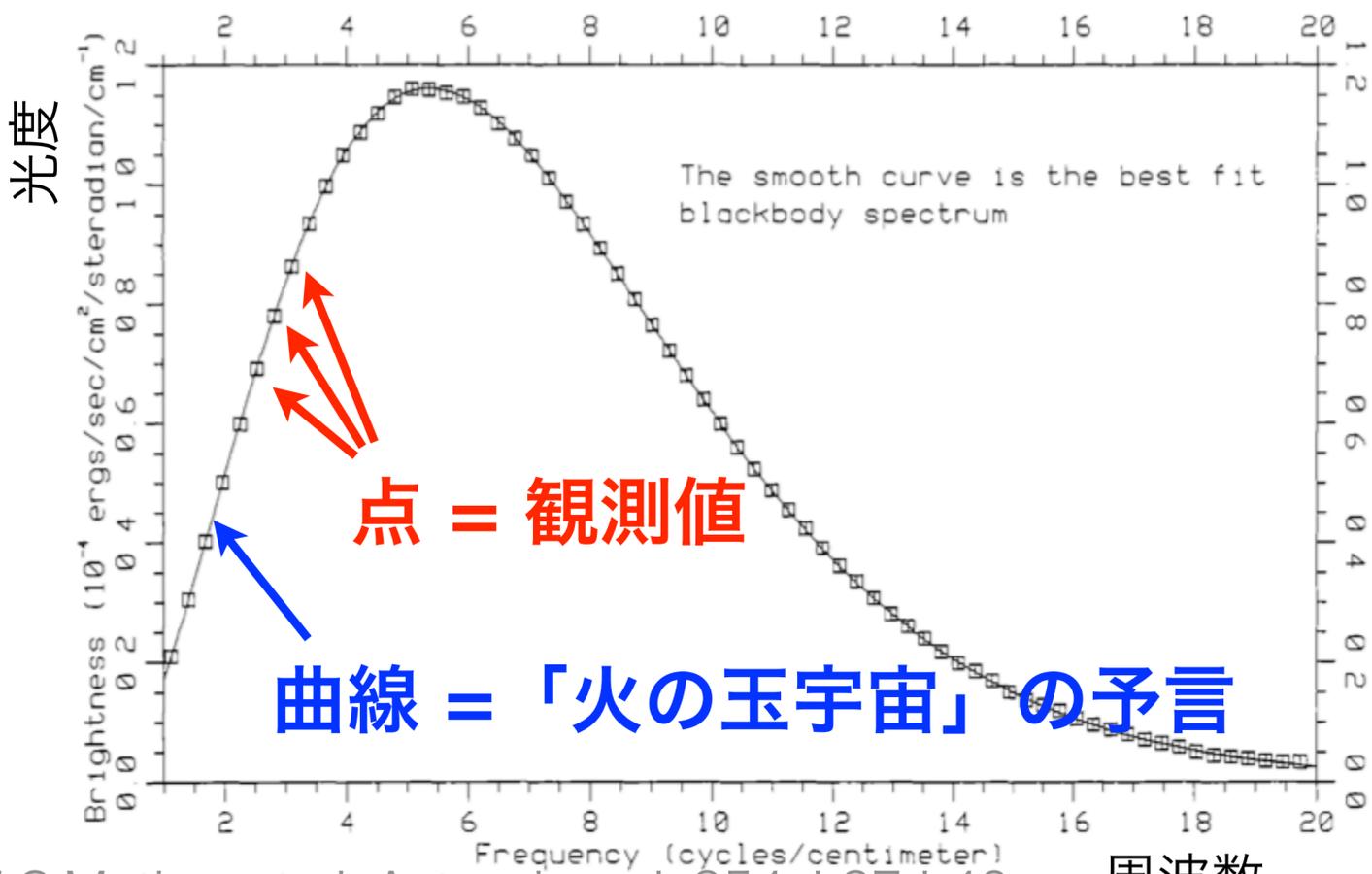
現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



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
140億年

宇宙背景放射



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

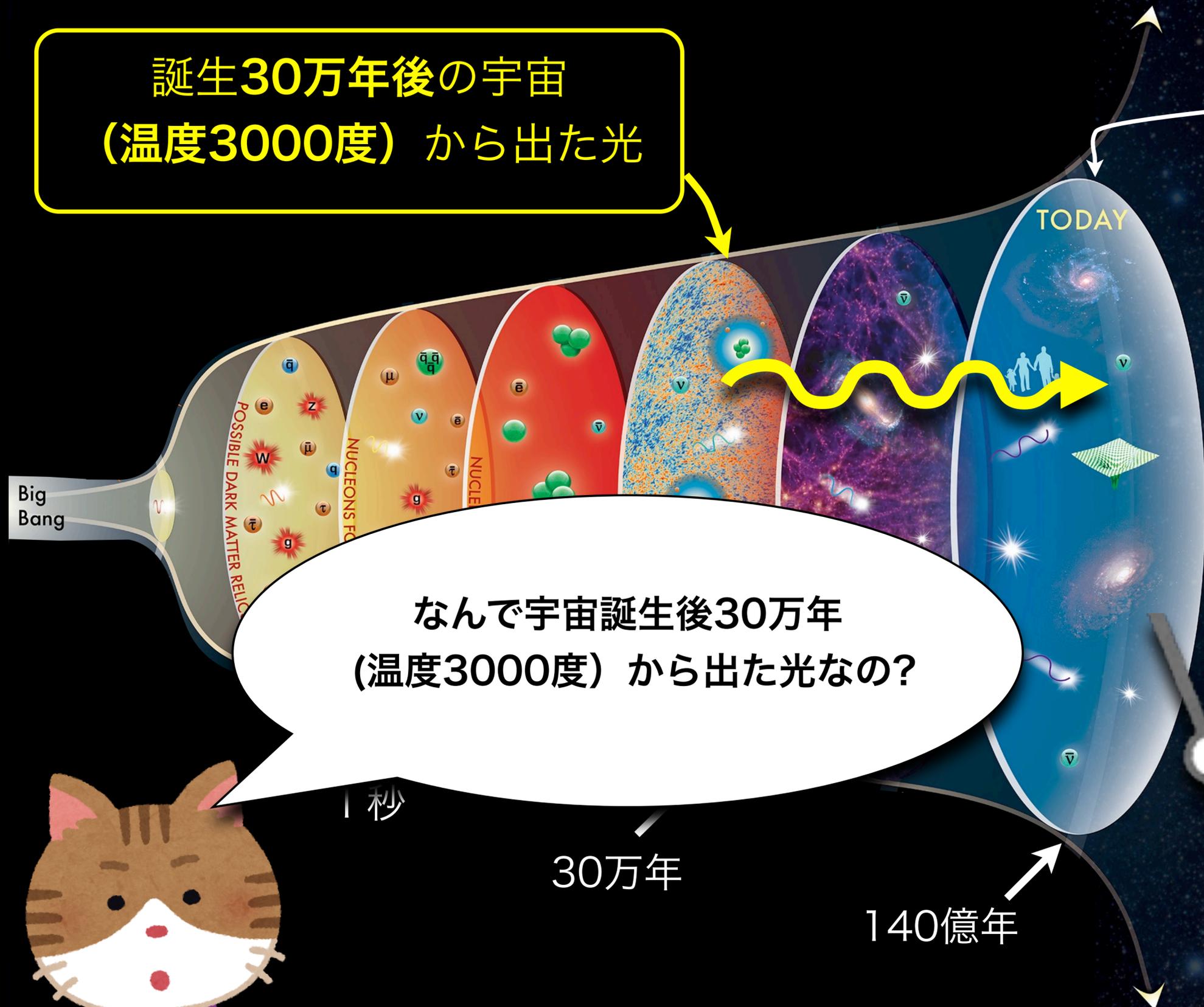
・・・が
140億年後の今
見えている！

億年



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
140億年

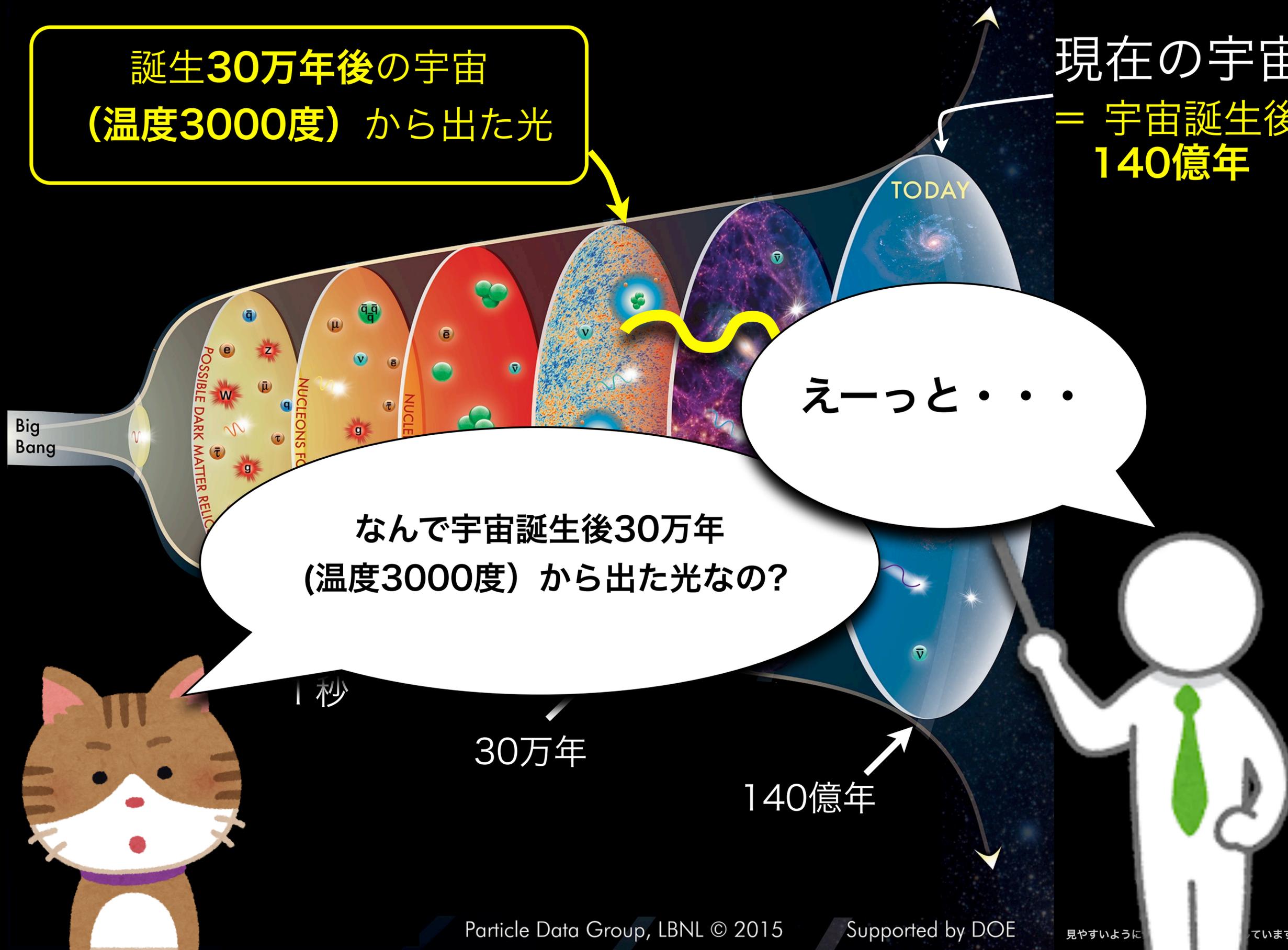


なんで宇宙誕生後30万年
(温度3000度) から出た光なの？



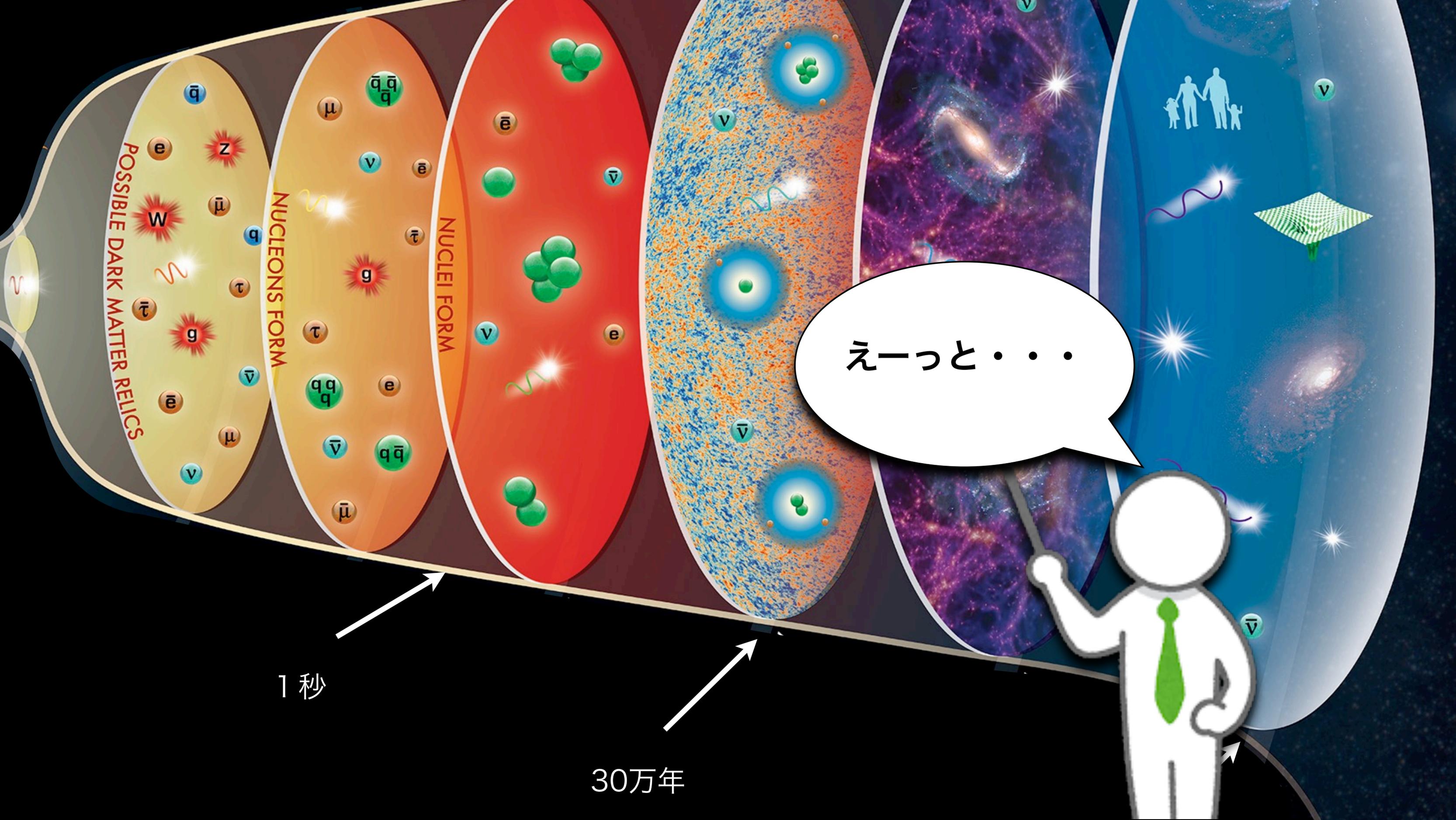
誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



なんで宇宙誕生後30万年
(温度3000度) から出た光なの？





POSSIBLE DARK MATTER RELICCS

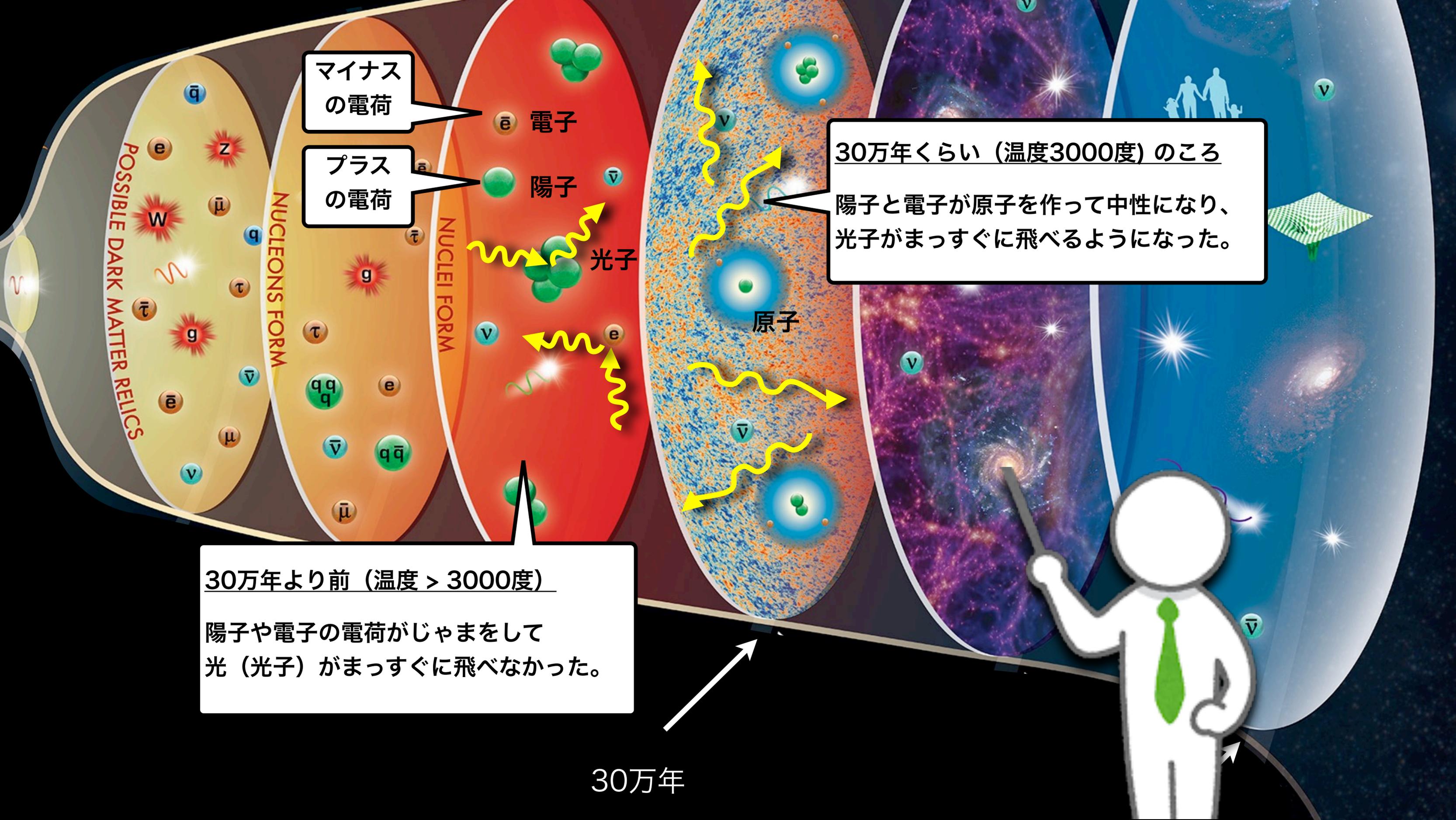
NUCLEONS FORM

NUCLEI FORM

1 秒

30万年

えーっと...



マイナス
の電荷

プラス
の電荷

30万年くらい (温度3000度) のころ
陽子と電子が原子を作って中性になり、
光子がまっすぐに飛べるようになった。

30万年より前 (温度 > 3000度)
陽子や電子の電荷がじゃまをして
光 (光子) がまっすぐに飛べなかった。

30万年

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
140億年

Big Bang

なるほど

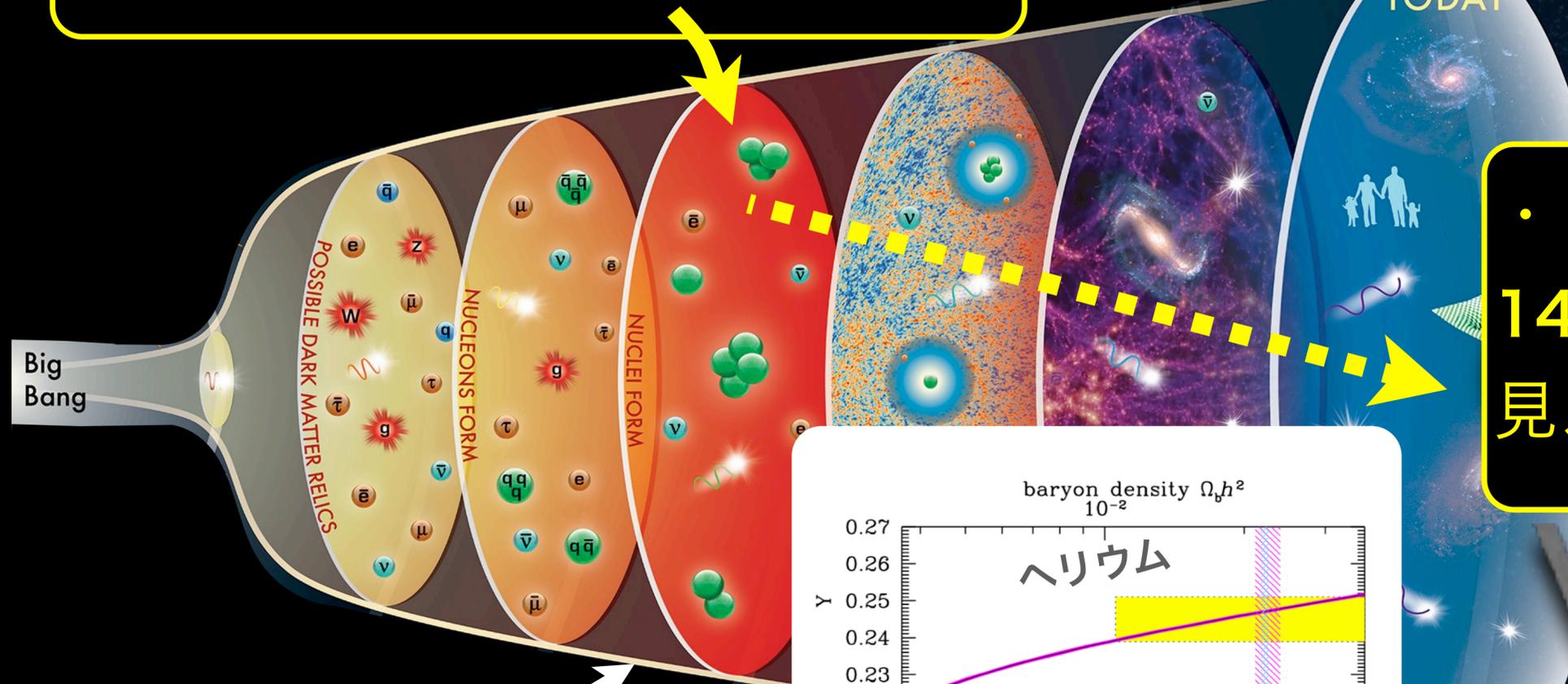
じゃあどこまで時間を
さかのぼって証拠があるの？

・・・が
140億年後の今
見えている！

140億年

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

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

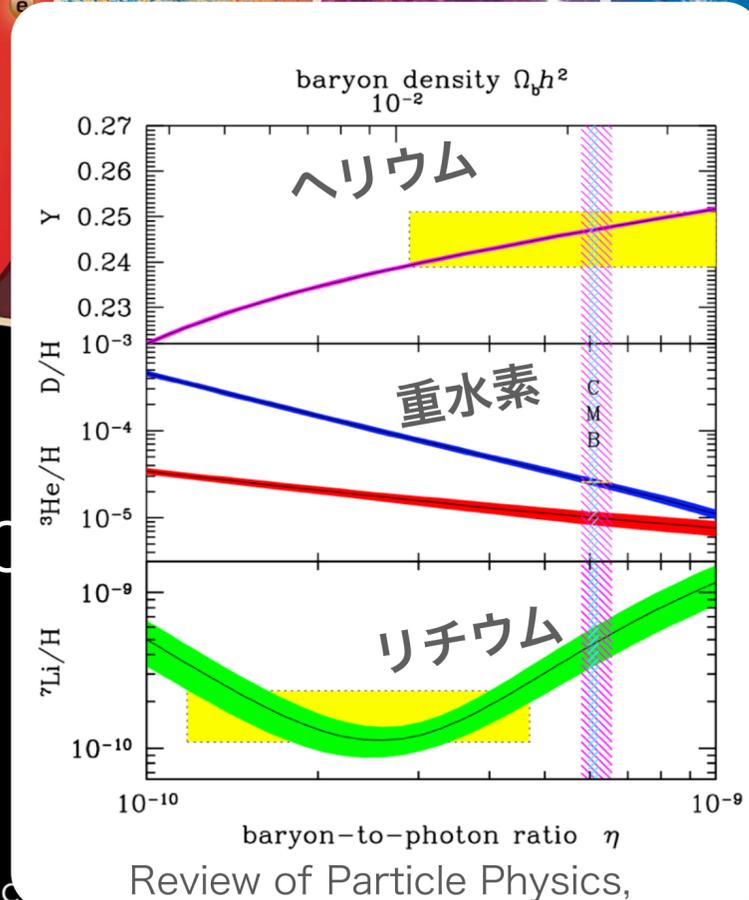


・・・が
140億年後の今
見えている！



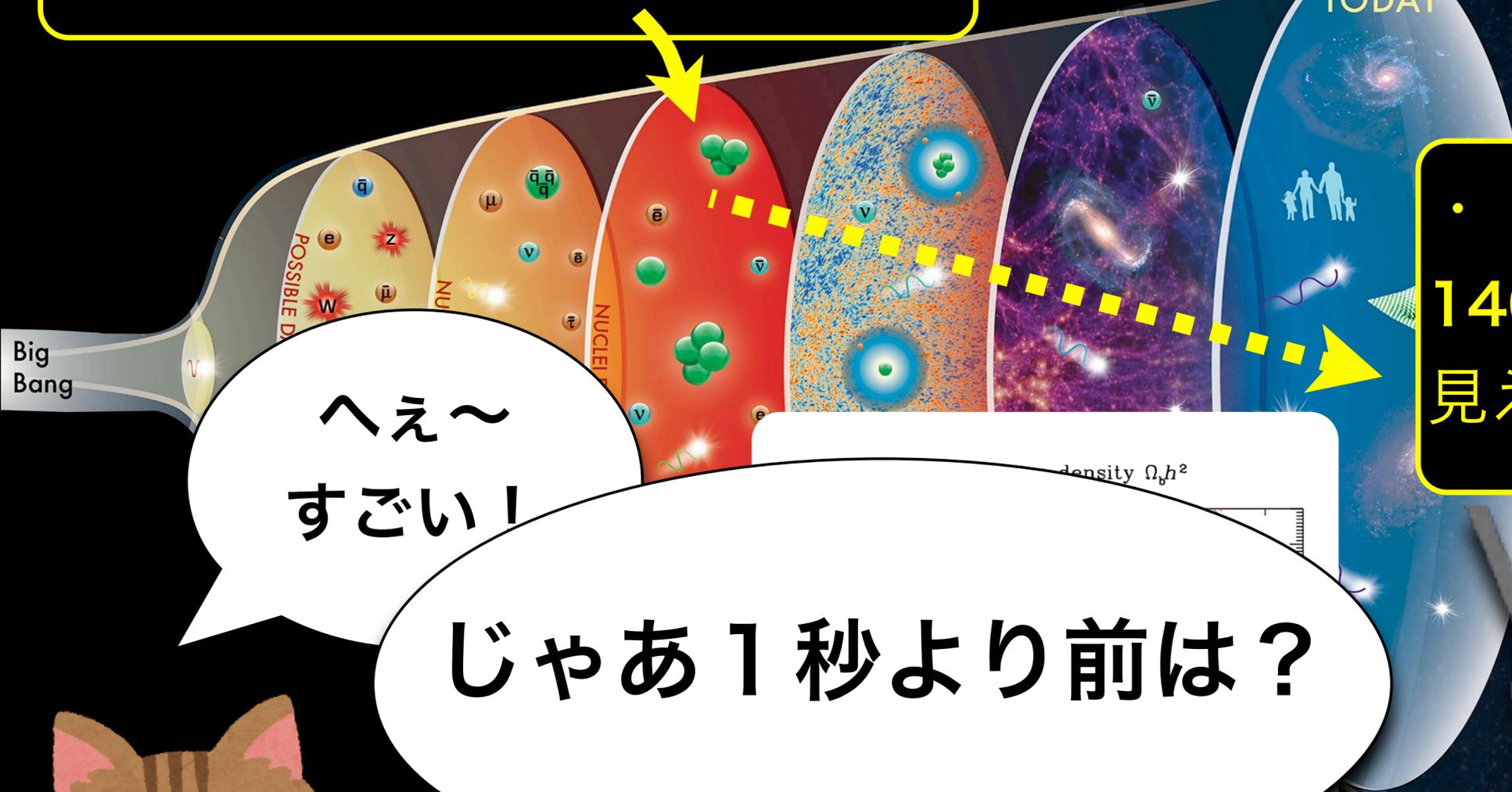
1 秒

30



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

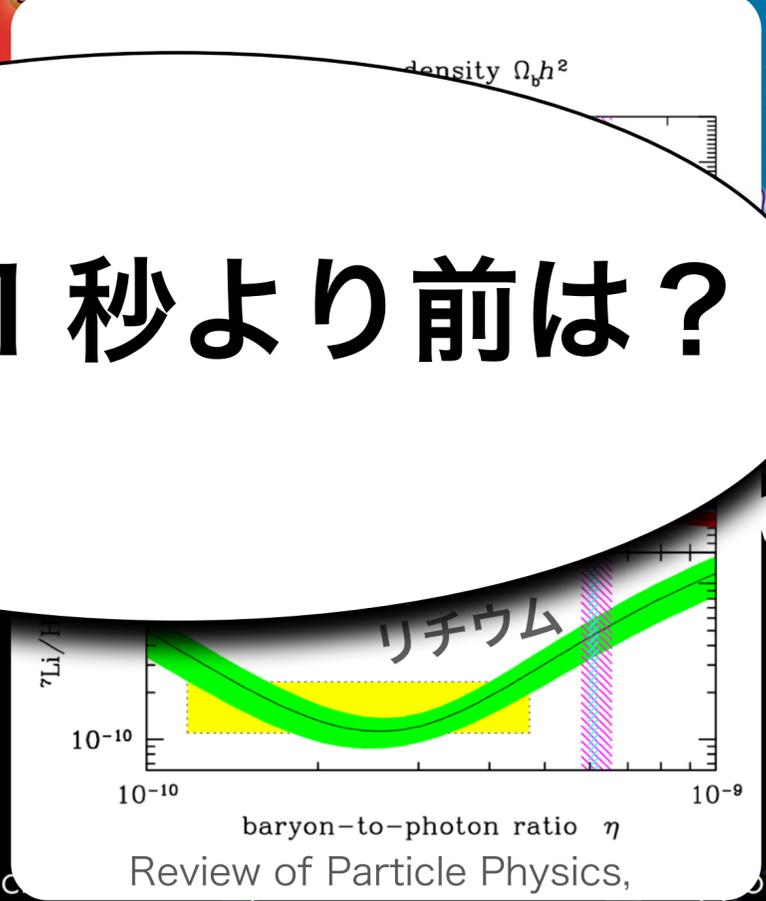
現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



・・・が
140億年後の今
見えている！

へえ～
すごい！

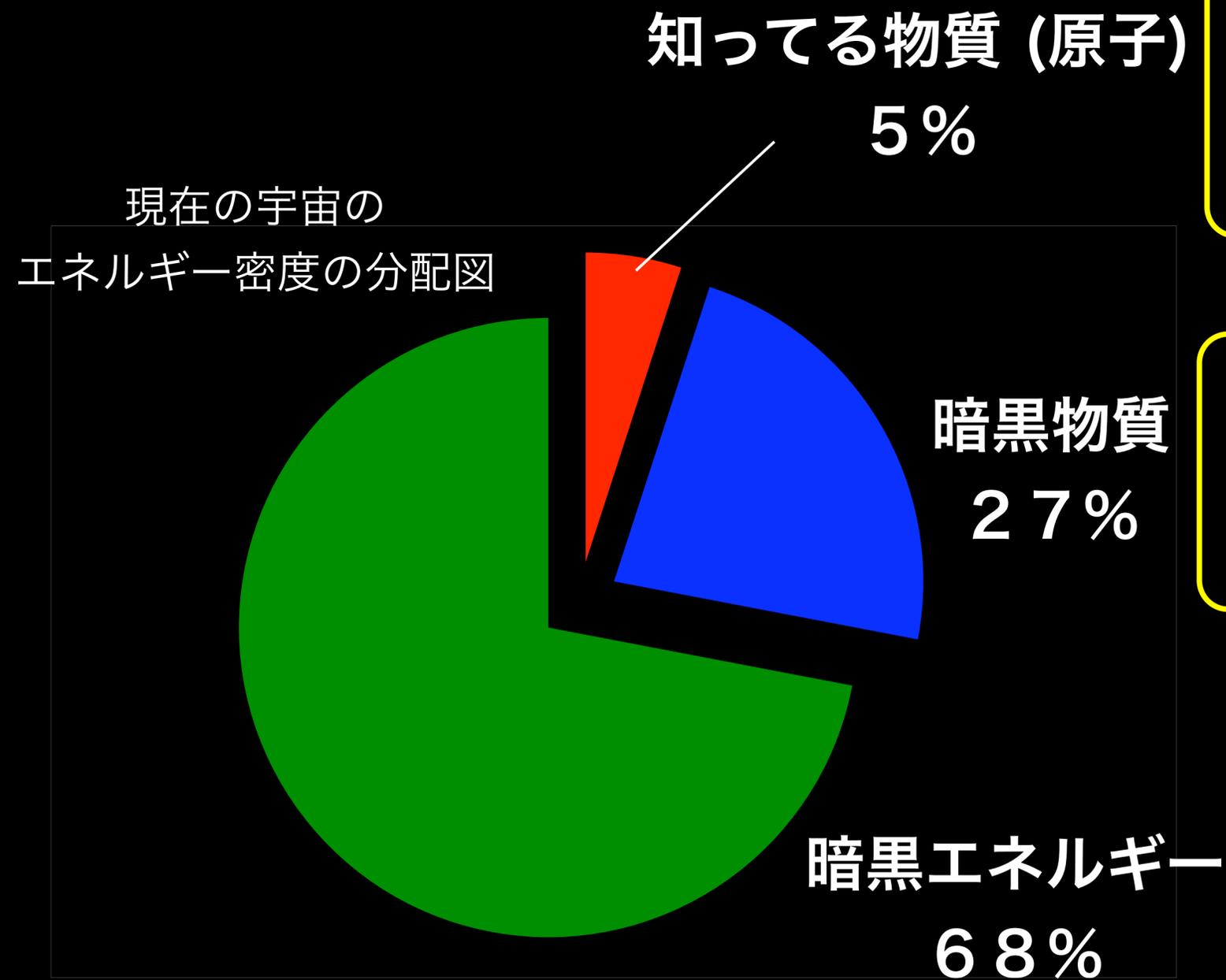
じゃあ1秒より前は？



宇宙誕生後最初の1秒に何が起きたか
直接的な証拠はない。

しかしこの1秒の事を理解しないと
解けない謎がある・・・。

宇宙に残された謎



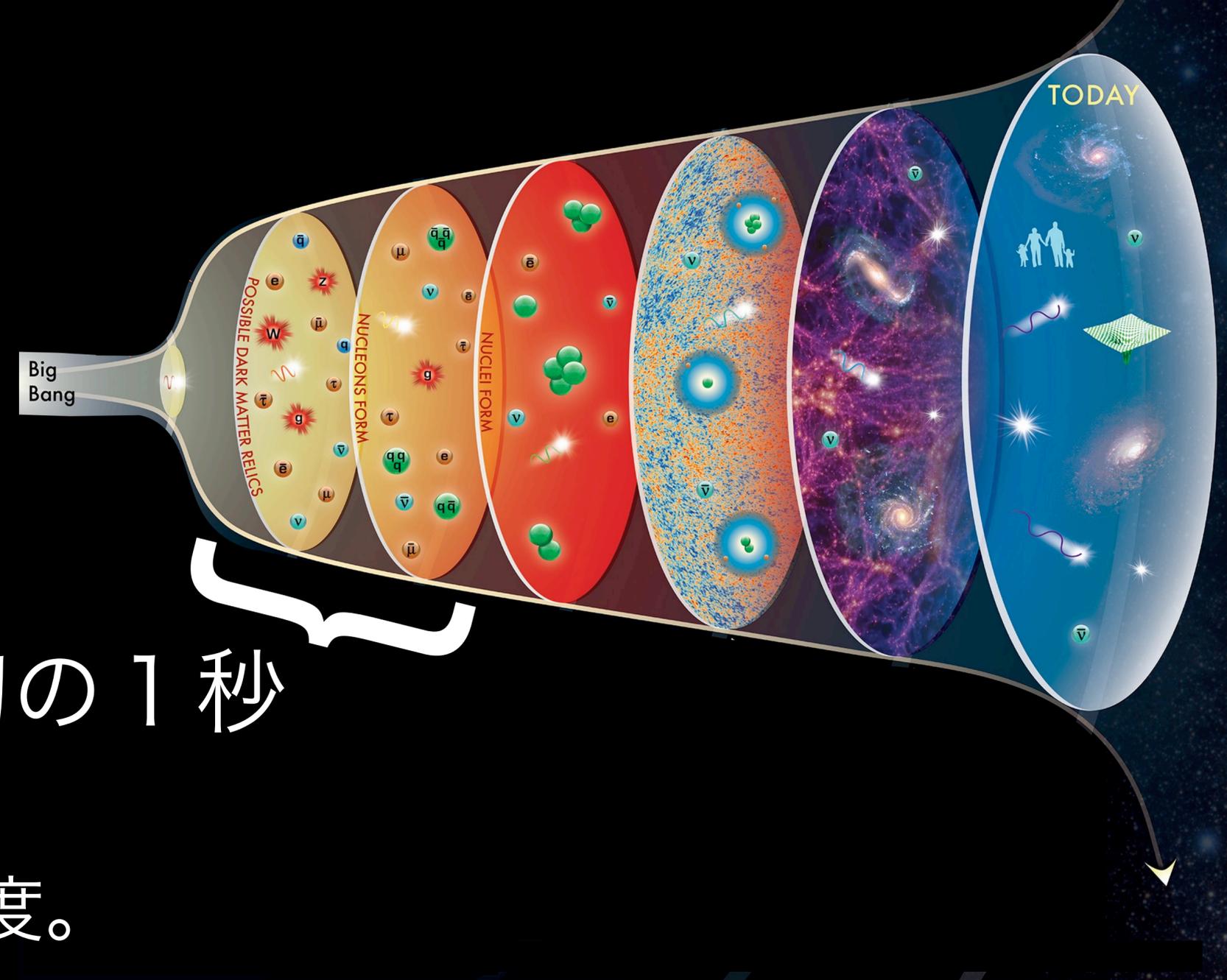
消えた
反物質の謎

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。

1日目 (4/15) はここまで