

# 標準模型、強いCP問題、アクシオン



[<http://higgstan.com>]

佐藤 亮介 (大阪大学)

2023. 5. 18 + 19 @ 高エネルギー物理春の学校

# 自己紹介

佐藤 亮介

2013年3月  
2013年4月 – 2021年11月

Ph.D. @ 東京大学  
ポスドク

- KEK (つくば)
- Weizmann Inst. (イスラエル)
- DESY (ドイツ)
- 上海交通大T.D.Lee Inst. (中国)

2021年12月

大阪大学

やってること：素粒子現象論、標準模型を超える物理全般

- 暗黒物質
- 超対称性模型
- アクシオン
- ...

# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

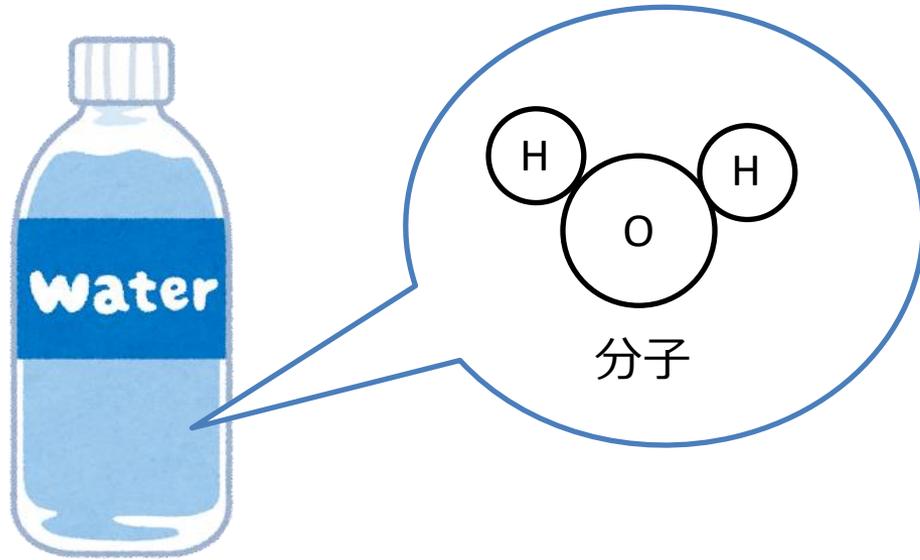
# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

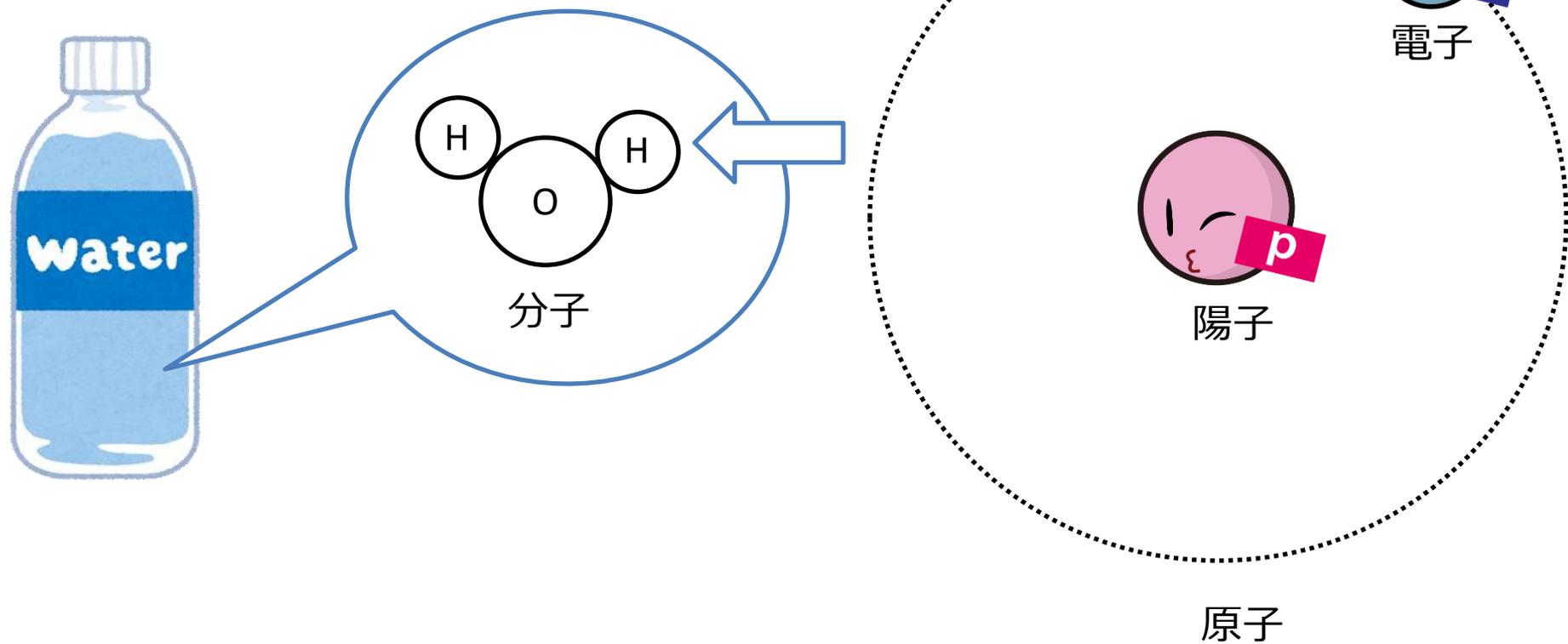
素粒子ってなに？



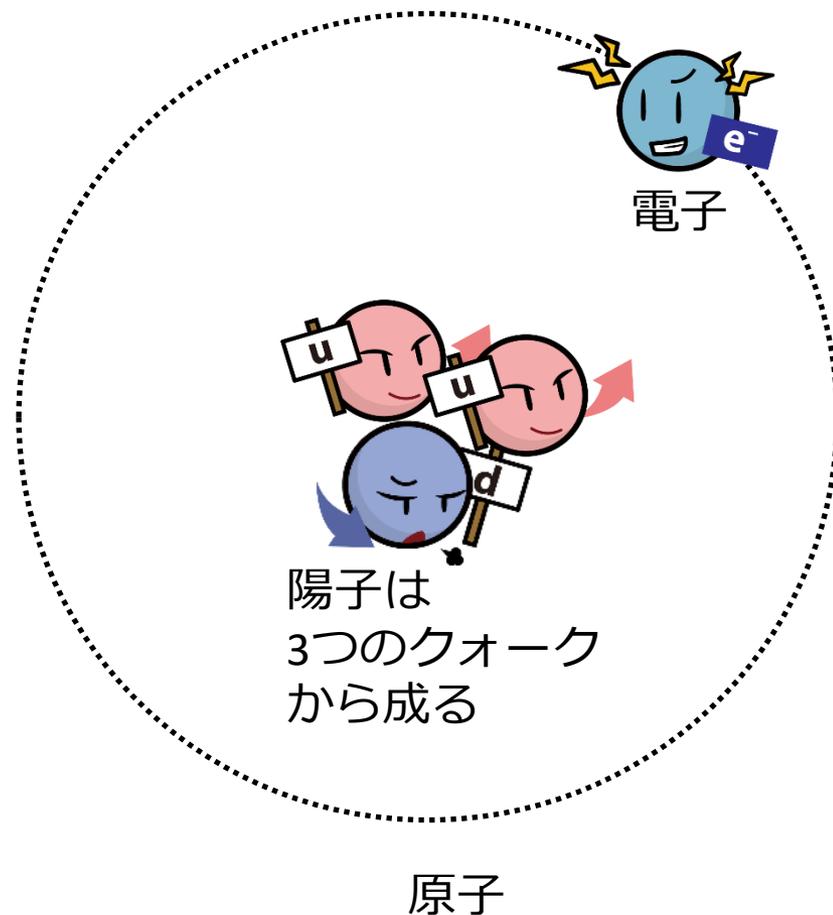
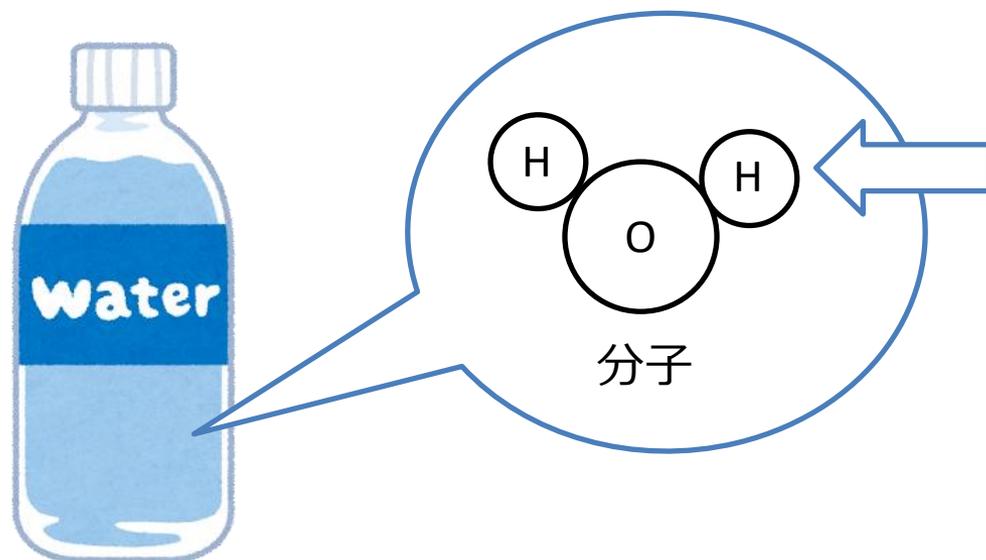
# 素粒子ってなに？



# 素粒子ってなに？



# 素粒子ってなに？



素粒子：物質の一番基本的な構成要素

# 素粒子論ってなに？

- 素粒子には、どんな種類のものがあるか
- 素粒子は、どんな性質を持っているか、どんな相互作用をするか

などを明らかにすることをめざす

この世界を理解したい...

宇宙がどうやって始まったか知りたい...



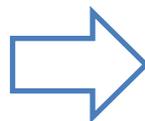
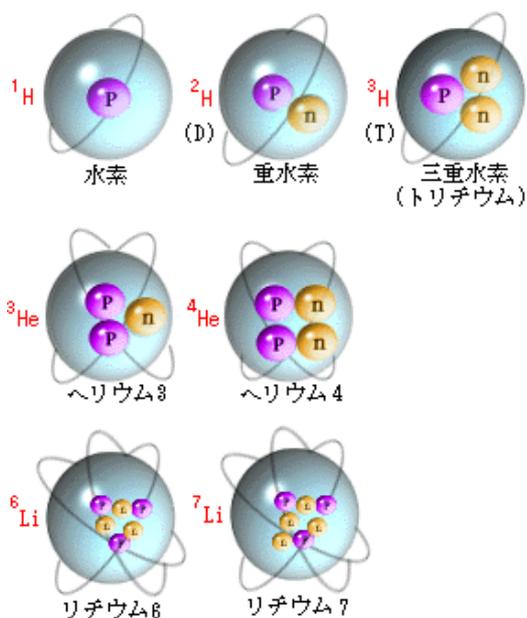
この世界を理解したい...



# 部品の組み合わせで理解する

原子核の周りを電子がまわる

原子の性質が統一的に理解できる



Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

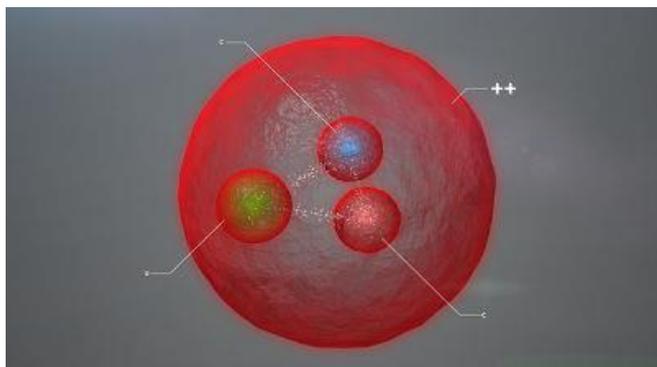
[ [https://en.wikipedia.org/wiki/Periodic\\_table](https://en.wikipedia.org/wiki/Periodic_table) ]

[ <https://www2.kek.jp/kids/class/atom/class04-01.html> ]

# 部品の組み合わせで理解する

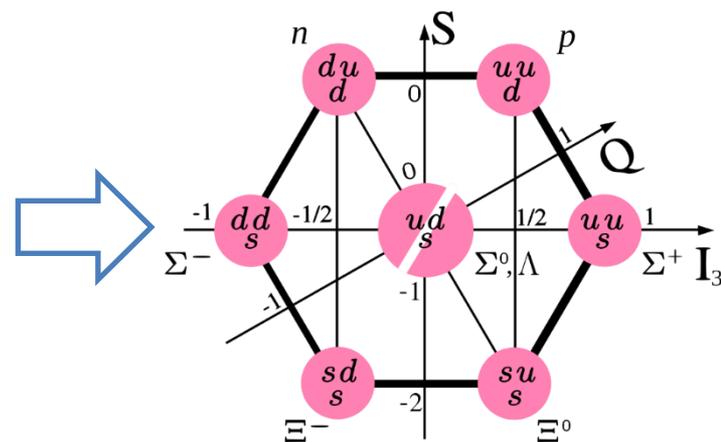
素粒子から作ったものがよく理解できる

クォーク（素粒子）3つでバリオン



<https://gigazine.net/news/20170707-xi-cc-double-plus/>

バリオン八重項



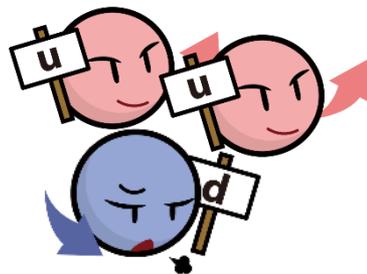
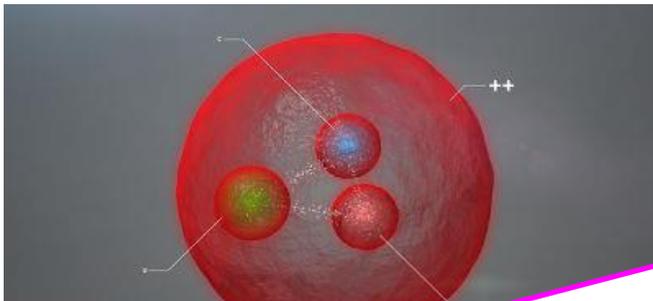
[ [https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold\\_Way](https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold_Way) ]

# 部品の組み合わせで理解する

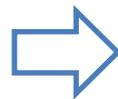
素粒子から作ったものがよく理解できる

クォーク（素粒子）3つでバリオン

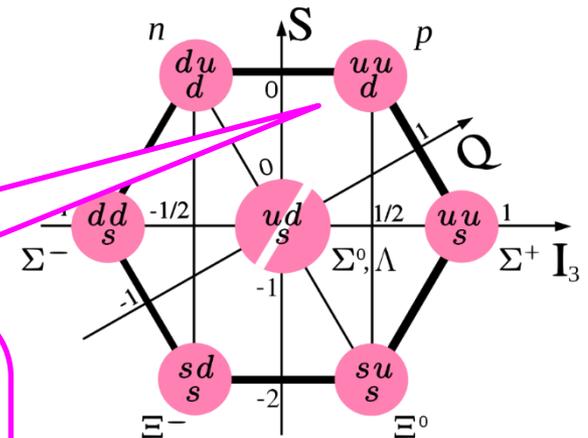
バリオン八重項



アップ、アップ、ダウン



陽子



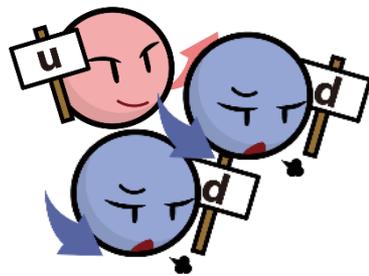
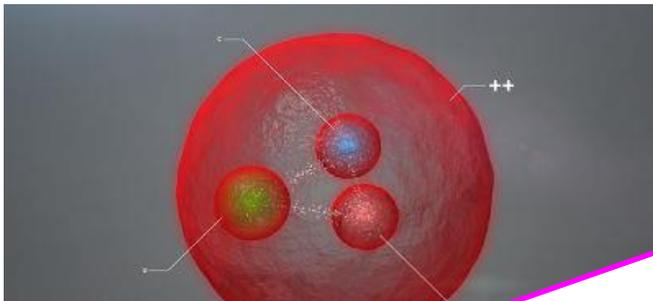
[ [https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold\\_Way](https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold_Way) ]

# 部品の組み合わせで理解する

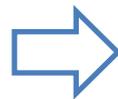
素粒子から作ったものがよく理解できる

クォーク（素粒子）3つでバリオン

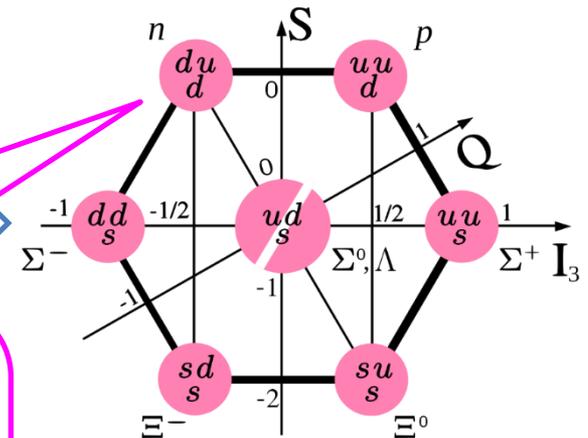
バリオン八重項



アップ、ダウン、ダウン



陽子



[ [https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold\\_Way](https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold_Way) ]



宇宙がどうやって始まったか知りたい...

# 宇宙がどうやって始まったか知りたい

**ハッブルの法則**

**宇宙マイクロ波背景放射**

# 宇宙がどうやって始まったか知りたい

## ハッブルの法則

宇宙は膨張している！

- 今後もっとでかくなる
- 昔はもっと小さかった

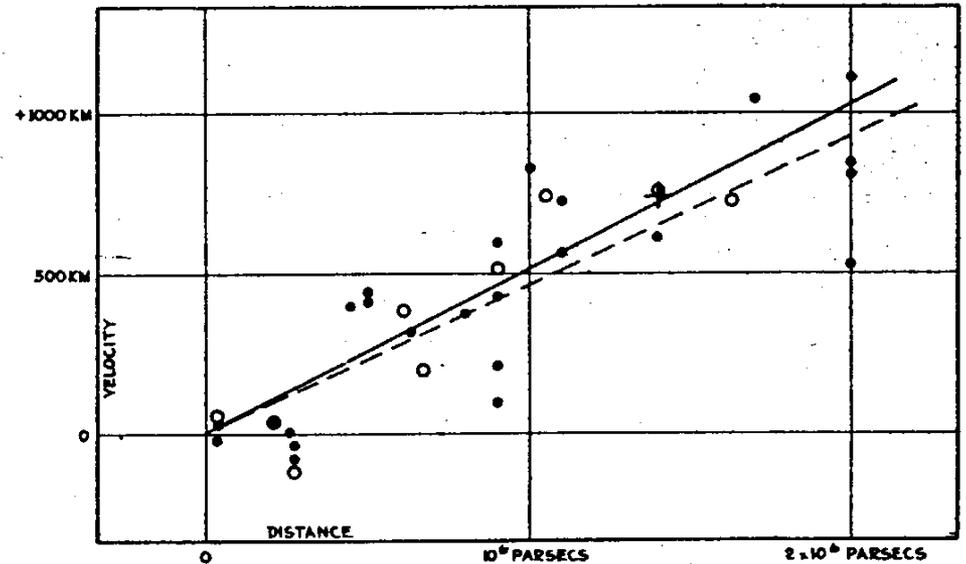


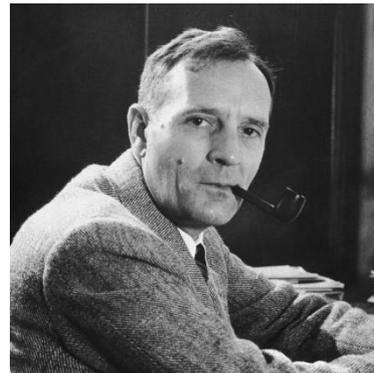
FIGURE 1

## 宇宙マイクロ波背景放射

$$v = H_0 d$$

$$H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$$

(1 Mpc = 326万光年)



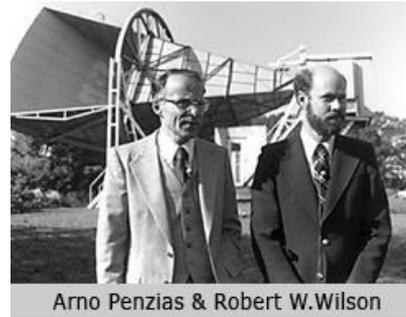
Edwin Hubble

# 宇宙がどうやって始まったか知りたい

## ハッブルの法則

宇宙は膨張している！

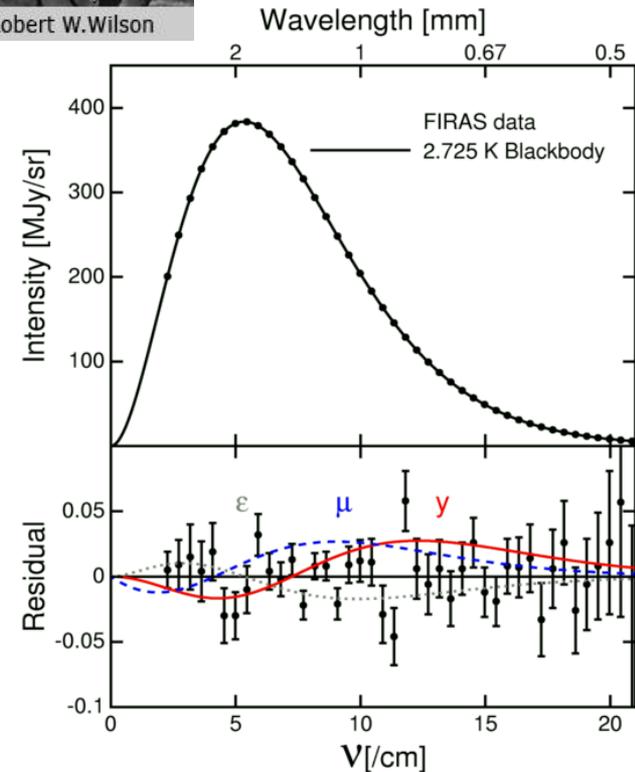
- 今後もっとでかくなる
- 昔はもっと小さかった



## 宇宙マイクロ波背景放射

全宇宙からほぼ等方的にやってくる

温度2.725 Kの黒体輻射にほぼ一致



[ <https://www.astro.ucla.edu/~wright/CMB.html> ]

# 宇宙がどうやって始まったか知りたい

## ハッブルの法則

宇宙は膨張している！

- 今後もっとでかくなる
- 昔はもっと小さかった

## 宇宙マイクロ波背景放射

全宇宙からほぼ等方的にやってくる

温度2.725 Kの黒体輻射にほぼ一致



昔は熱平衡にあった名残

# 宇宙がどうやって始まったか知りたい

## ハッブルの法則

宇宙は膨張している！

- 今後もっとでかくなる
- 昔はもっと小さかった

## 宇宙マイクロ波背景放射

全宇宙からほぼ等方的にやってくる

温度2.725 Kの黒体輻射にほぼ一致



昔は熱平衡にあった名残

## ビッグバン宇宙論

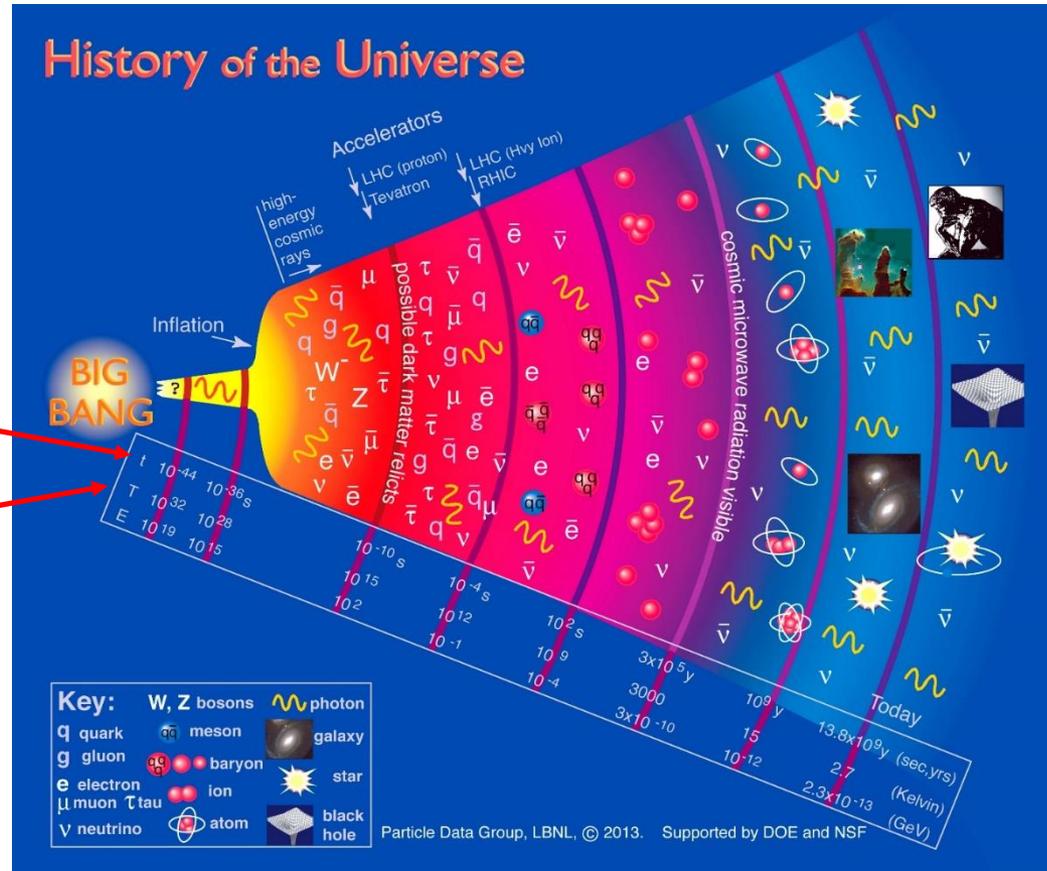
- 昔の宇宙は高温
- 断熱膨張で徐々に冷えた

# 宇宙がどうやって始まったか知りたい

宇宙はむかしむかし**高温**だった。高温のせいで**素粒子レベルでバラバラ**。

宇宙のはじまり  
からの時間

宇宙の温度  
(ケルビン)



宇宙の始まりを知るには、**素粒子**のこと知る必要アリ。

理論的な道具が必要。 : 場の量子論、標準模型

この世界を理解したい...

宇宙がどうやって始まったか知りたい...



# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

# 素粒子を記述するために

素粒子はミクロな世界 → **量子力学**

高エネルギー → **特殊相対論**

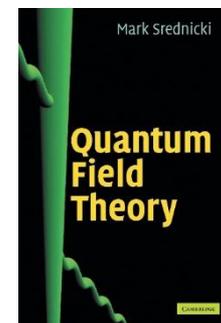
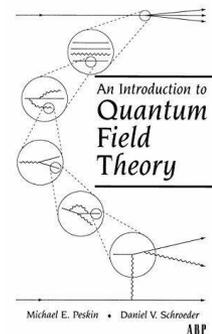
# 素粒子を記述するために

## 合体!!

素粒子はミクロな世界 → **量子力学**

高エネルギー → **特殊相対論**

(相対論的) **場の量子論**



# 場の量子論で何が計算できる？

素粒子にまつわる詳しい情報

- 質量（ヒッグス機構など）
- 相互作用の詳細（磁気双極子モーメント、電気双極子モーメント、など）

$$H = -\mu \frac{\vec{s} \cdot \vec{B}}{|\vec{s}|} - d \frac{\vec{s} \cdot \vec{E}}{|\vec{s}|}$$

素粒子がどんな反応をどれくらい起こすか

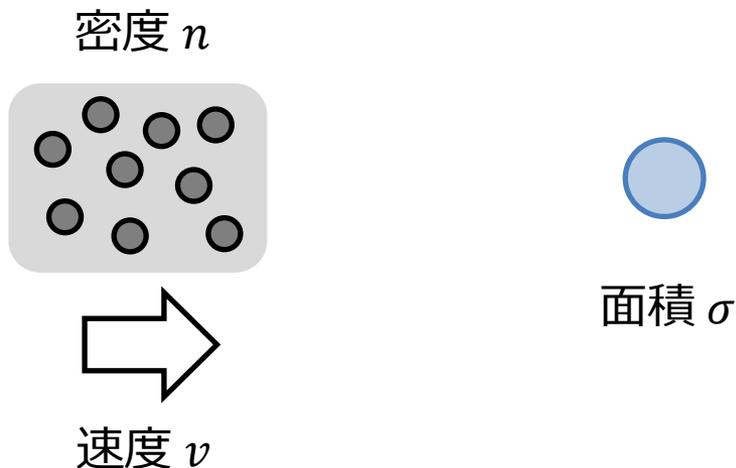
- 散乱断面積
- 崩壊幅

# 散乱断面積

散乱の起こりやすさを示す量：

$$\sigma = \frac{1}{nv} \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

$P$ : 散乱が起きる確率  
 $n$ : ビーム粒子の数密度  
 $v$ : ビームと標的の相対速度



標的の粒子を、面積  $\sigma$  の大きさを持った古典的的なと見立てる。

単位面積に突っ込んでくるビーム粒子のレート（単位時間あたりの数）： $nv$

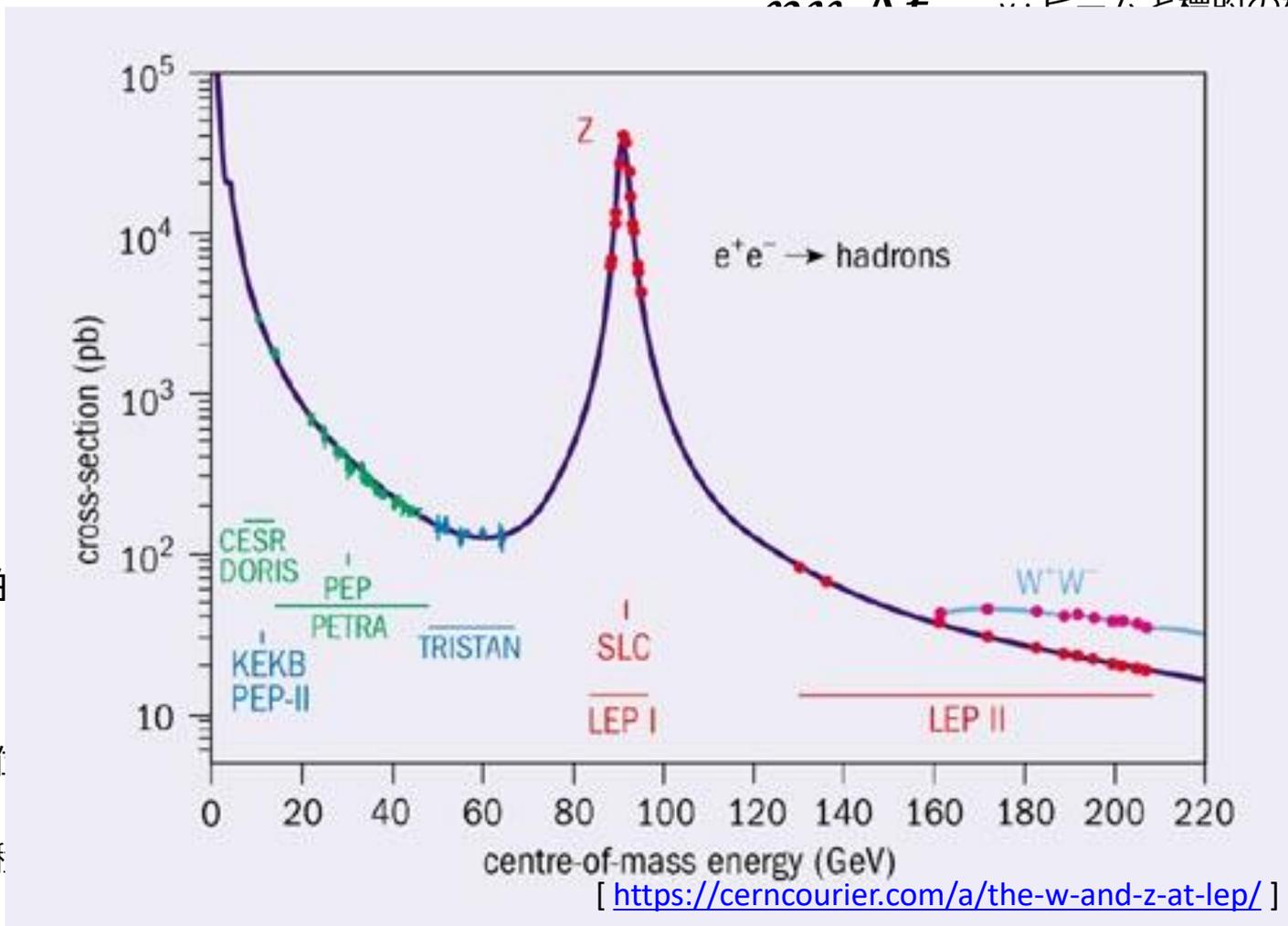
面積  $\sigma$  の大きさの的にあたるレート： $nv \times \sigma$

# 散乱断面積

散乱の起こりやすさを示す量：
$$\sigma = \frac{1}{n_1 n_2 v_{rel}} \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

$P$ : 散乱が起きる確率  
 $n$ : ビーム粒子の数密度  
 $v$ : ビームと標的の相対速度

標  
単  
面  
積



# 崩壊幅

崩壊の起こりやすさを示す量（単位時間当たりの遷移確率）： $\Gamma$

短い時間に起こる崩壊： $\Delta P = \Gamma \cdot \Delta t$

全崩壊幅： $\Gamma_{tot} = \sum_i \Gamma_i$       崩壊率： $\frac{1}{\Gamma_{tot}}$

全崩壊幅： $\frac{dN}{dt} = -\Gamma_{tot} \cdot N$        $N = e^{-\Gamma_{tot}t}$

# 場の量子論の計算は大変

量子力学の調和振動子みたいに綺麗に解ききれることは基本的にない。  
近似とか数値計算を駆使して頑張る。

- 摂動論

相互作用の強さ ( $\alpha \simeq 1/137$ とか) を小さいパラメーターとして展開。

$$\sigma = c_1 \alpha + c_2 \alpha^2 + c_3 \alpha^3 + \dots$$

1次          2次          3次

c.f.) 学部で習う量子力学の摂動論

$$E = E_0 + \langle \psi | V | \psi \rangle - \left\langle \psi \left| V \frac{1}{H_0 - E_0} V \right| \psi \right\rangle + \dots$$

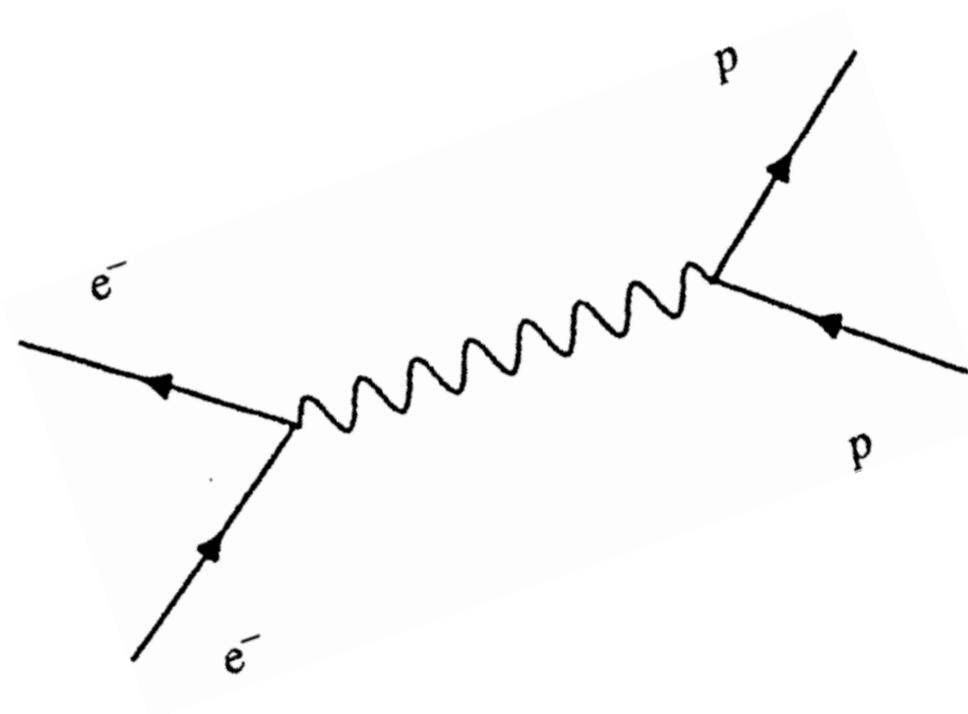
0次          1次                          2次

- 数値計算を用いた非摂動論

Lattice QCD

# ファインマンダイアグラム

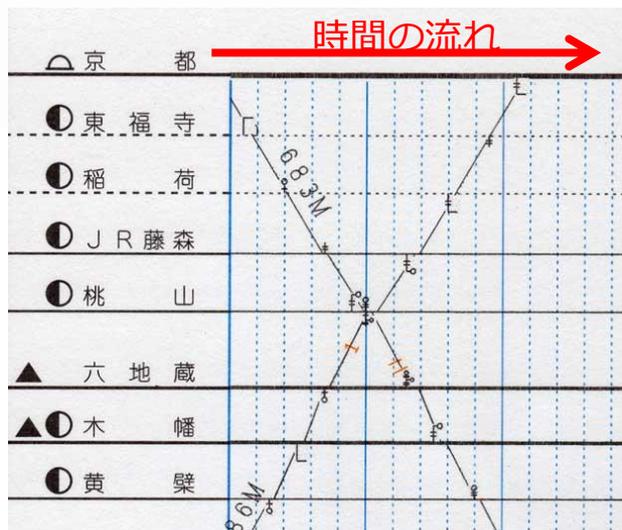
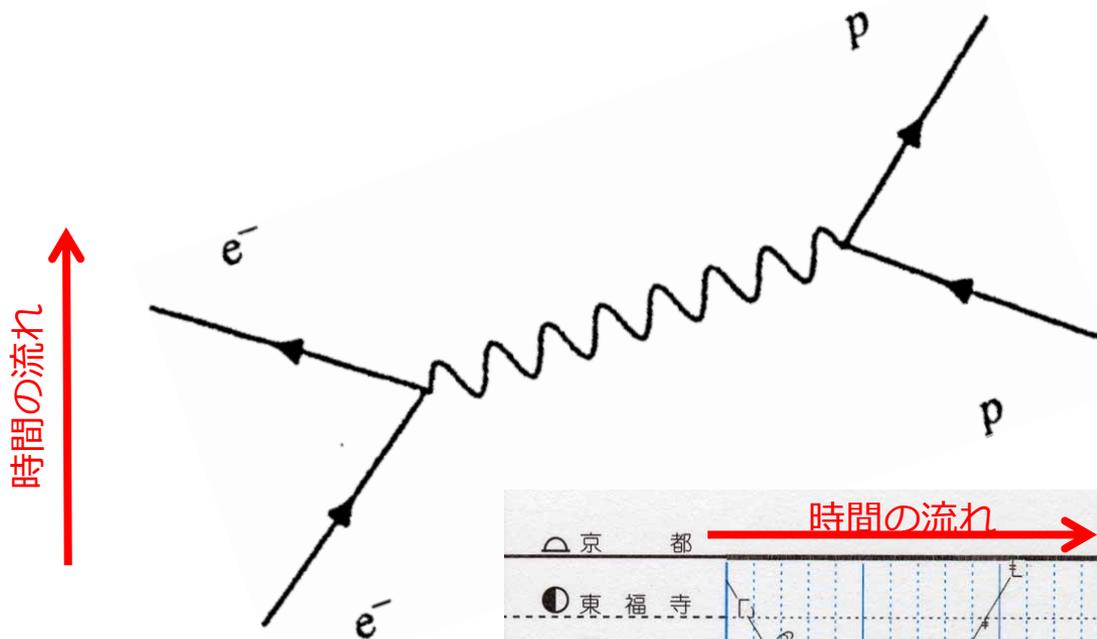
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



Richard P. Feynman

# ファインマンダイアグラム

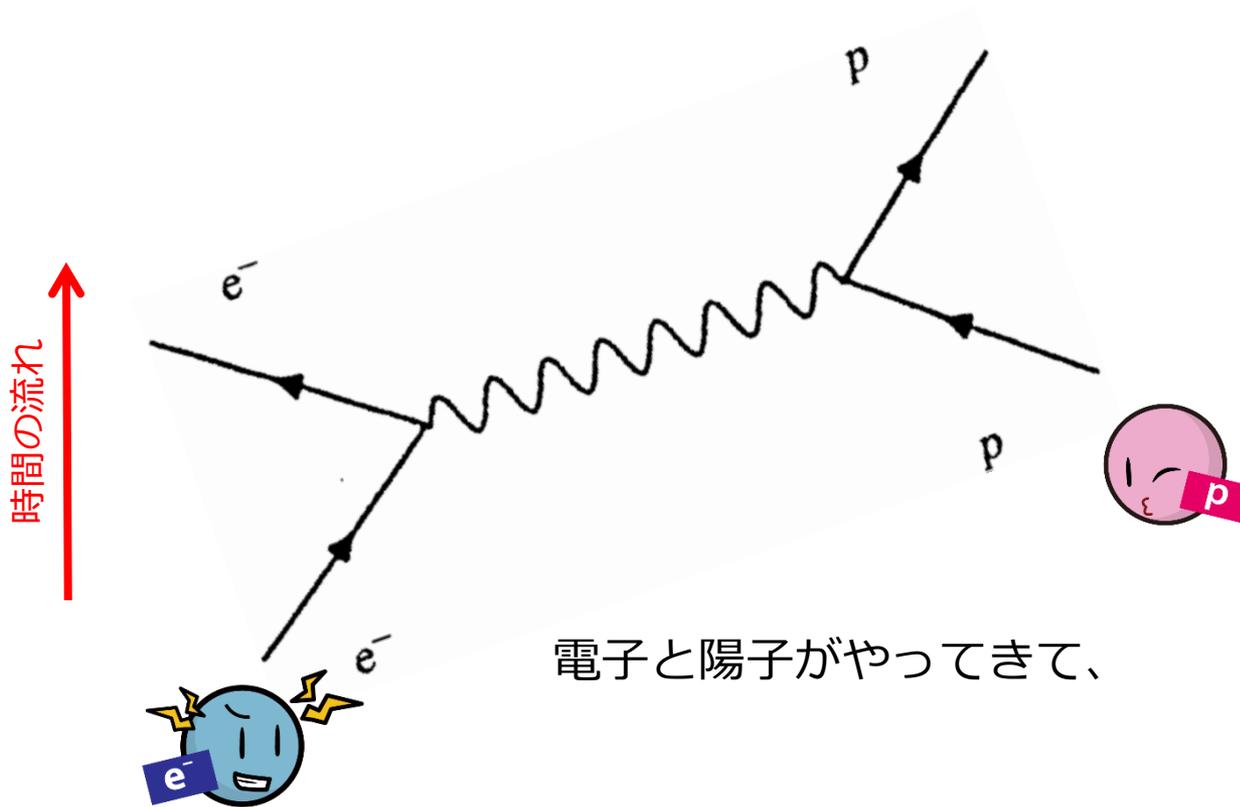
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



Richard P. Feynman

# ファインマンダイアグラム

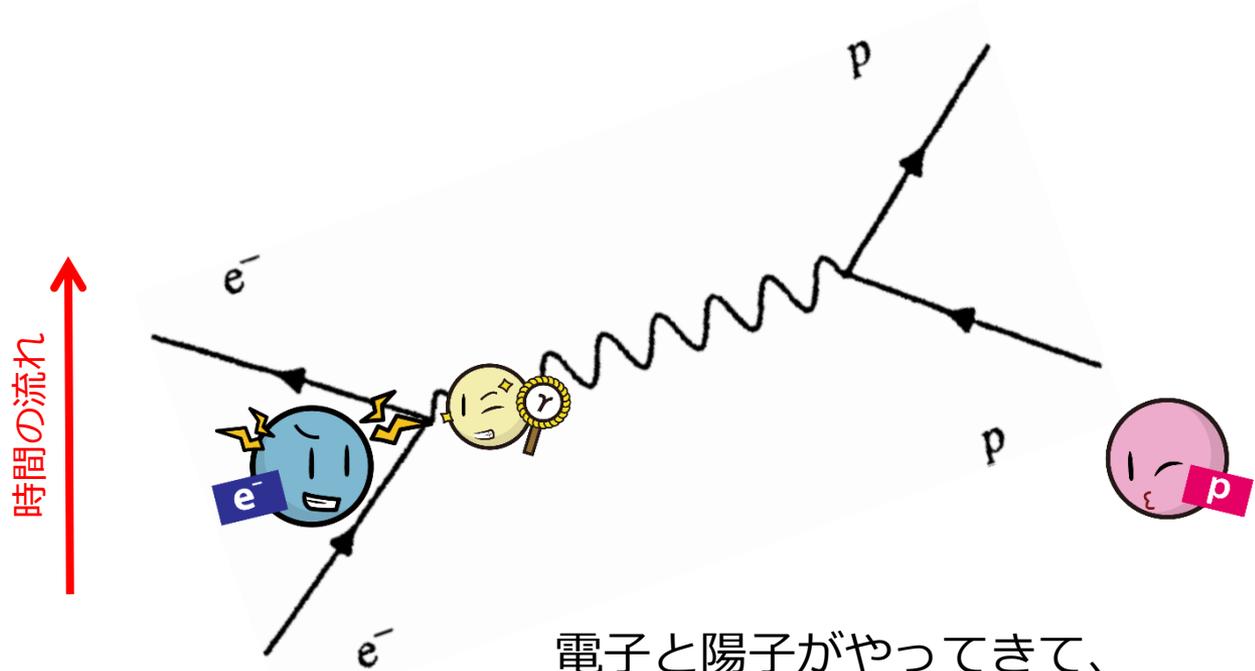
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、

# ファインマンダイアグラム

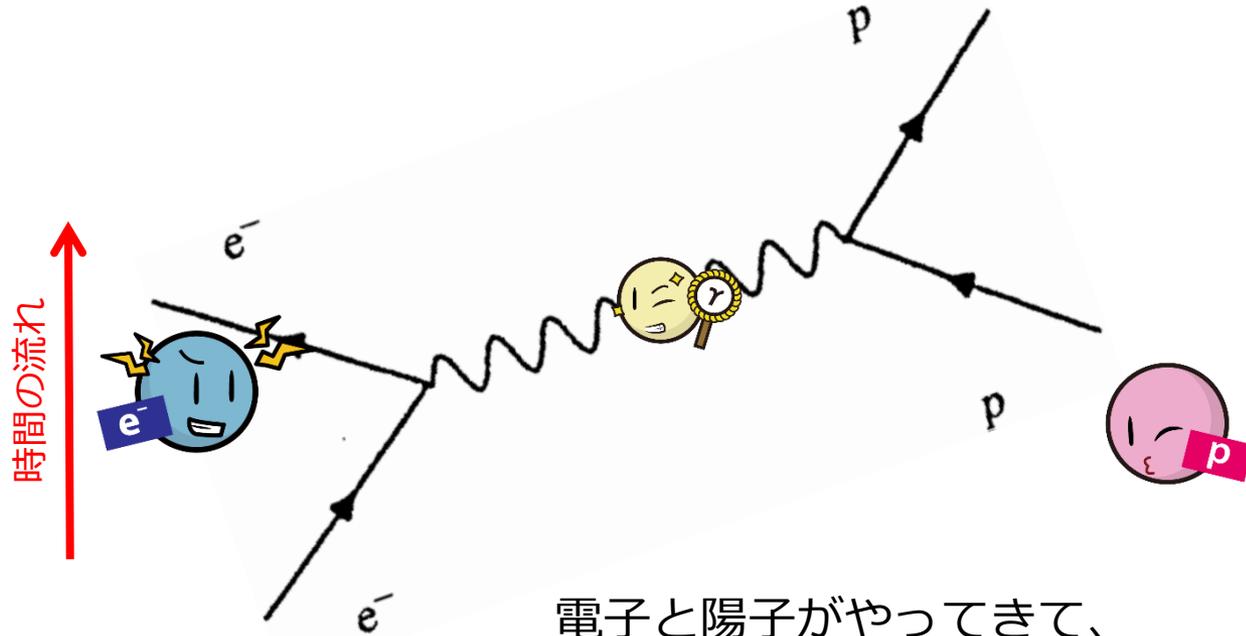
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、  
電子が（仮想）光子を放出。

# ファインマンダイアグラム

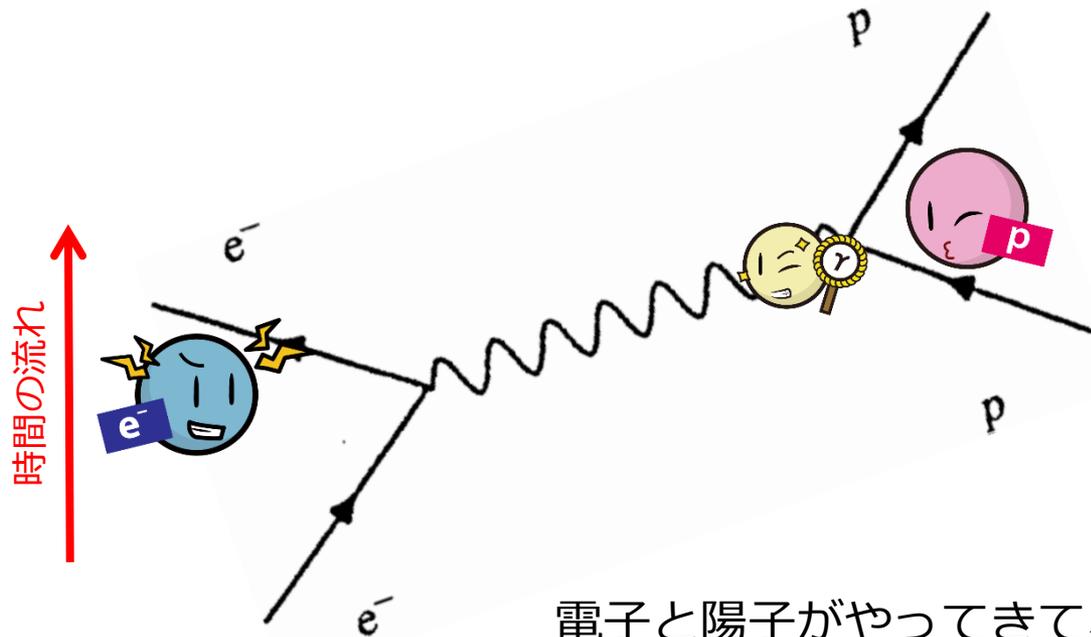
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、  
電子が（仮想）光子を放出。  
（仮想）光子が伝播して、

# ファインマンダイアグラム

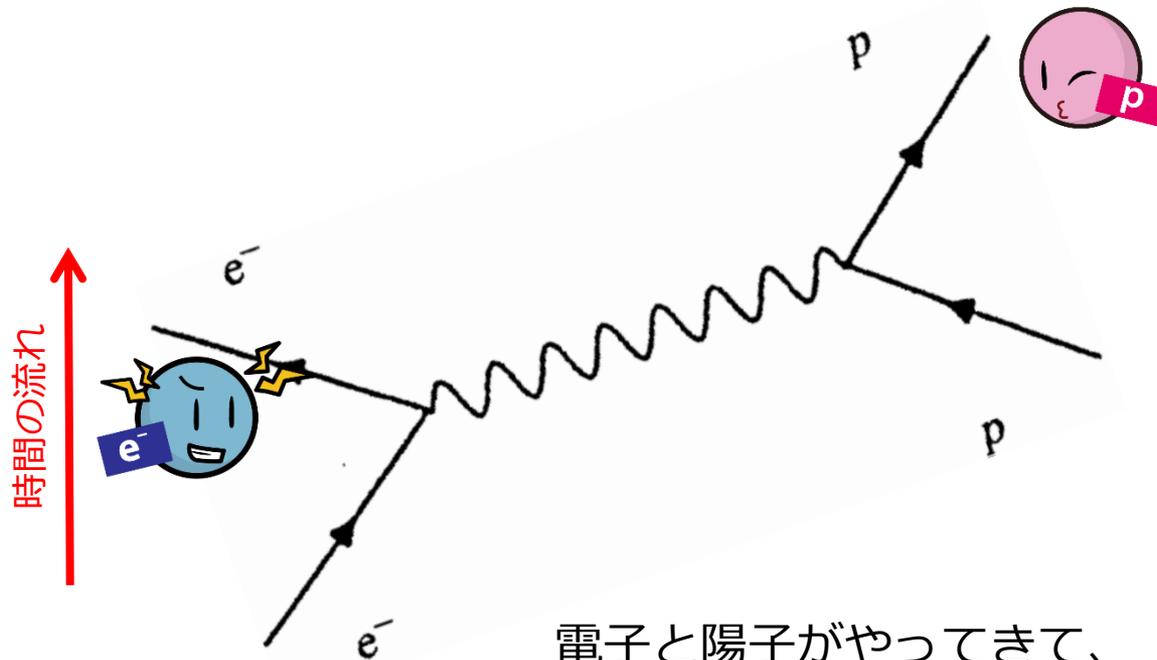
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、  
電子が (仮想) 光子を放出。  
(仮想) 光子が伝播して、  
陽子が (仮想) 光子をキャッチ！

# ファインマンダイアグラム

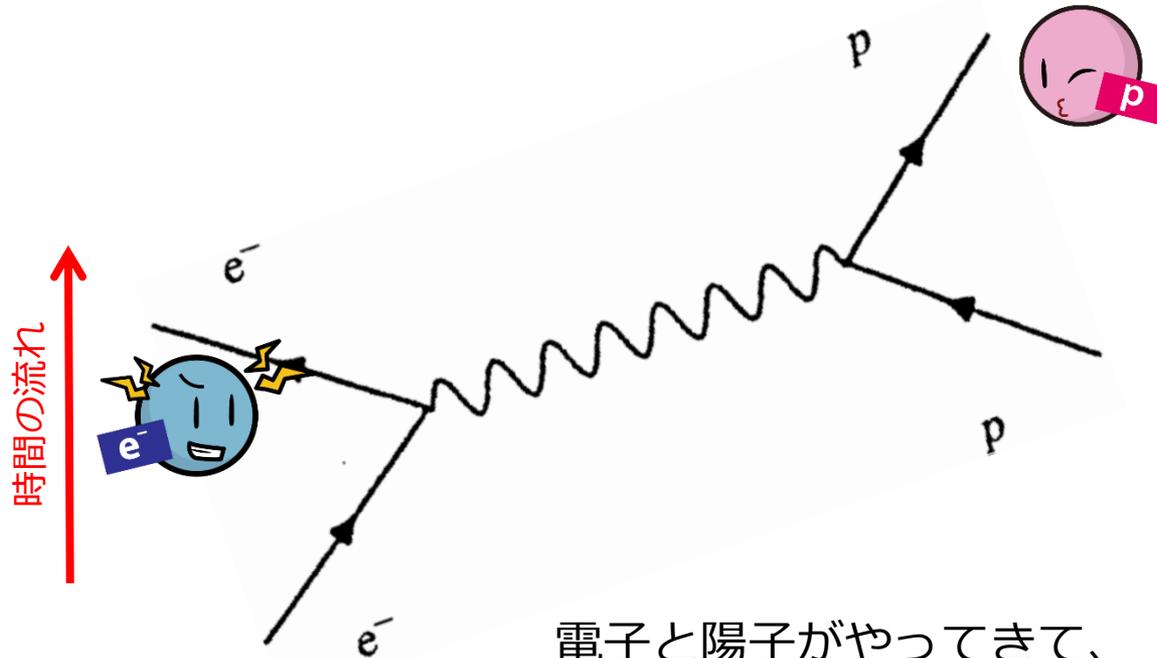
摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、  
電子が (仮想) 光子を放出。  
(仮想) 光子が伝播して、  
陽子が (仮想) 光子をキャッチ！  
結果、電子と陽子がそれぞれ運動を変えた。

# ファインマンダイアグラム

摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、  
電子が（仮想）光子を放出。  
（仮想）光子が伝播して、  
陽子が（仮想）光子をキャッチ！  
結果、電子と陽子がそれぞれ運動を変えた。

→ 光子の交換による、電子陽子散乱 [ 38 ]

# ファインマンダイアグラム

摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)

実はこういう数式をあらわしていました。

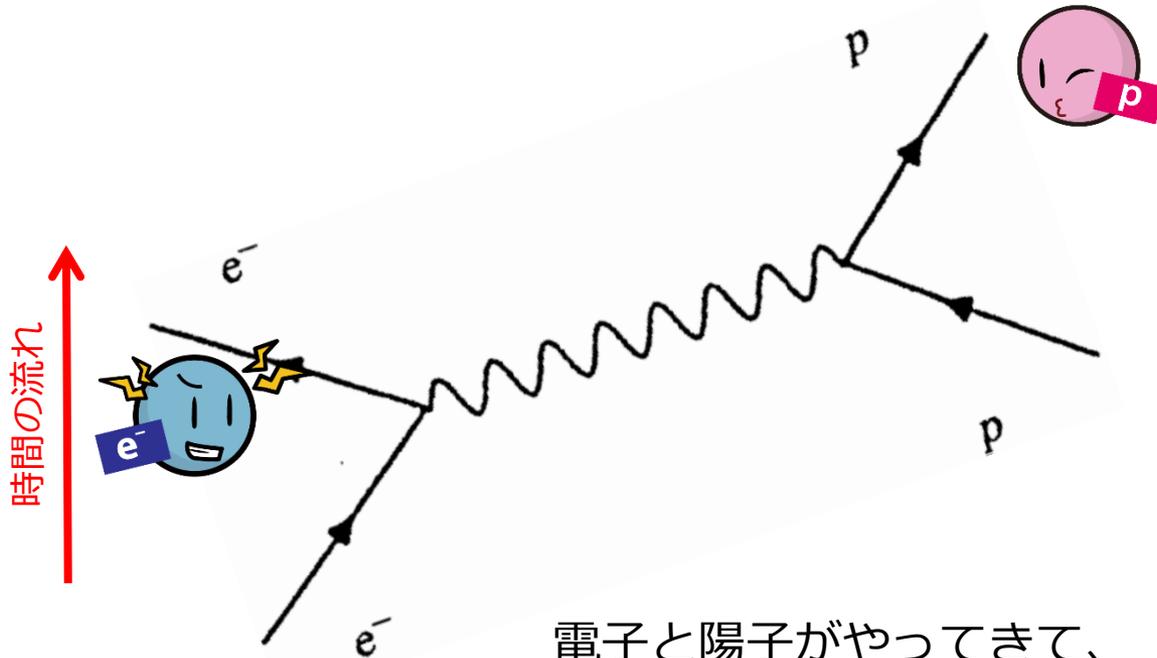
$$[-ie\bar{u}(p')\gamma^\mu u(p)][-ie\bar{u}(k')\gamma^\nu u(k)]\frac{-ig_{\mu\nu}}{(p-p')^2}$$

電子と陽子がやってきて、  
電子が（仮想）光子を放出。  
（仮想）光子が伝播して、  
陽子が（仮想）光子をキャッチ！  
結果、電子と陽子がそれぞれ運動を変えた。

→ 光子の交換による、電子陽子散乱 [ 39 ]

# ファインマンダイアグラム

摂動論の項をあらわすダイアグラム (素粒子の反応過程と解釈できる)



電子と陽子がやってきて、  
電子が（仮想）光子を放出。  
（仮想）光子が伝播して、  
陽子が（仮想）光子をキャッチ！  
結果、電子と陽子がそれぞれ運動を変えた。

→ 光子の交換による、電子陽子散乱 [ 40 ]

# 場の量子論ってすごい

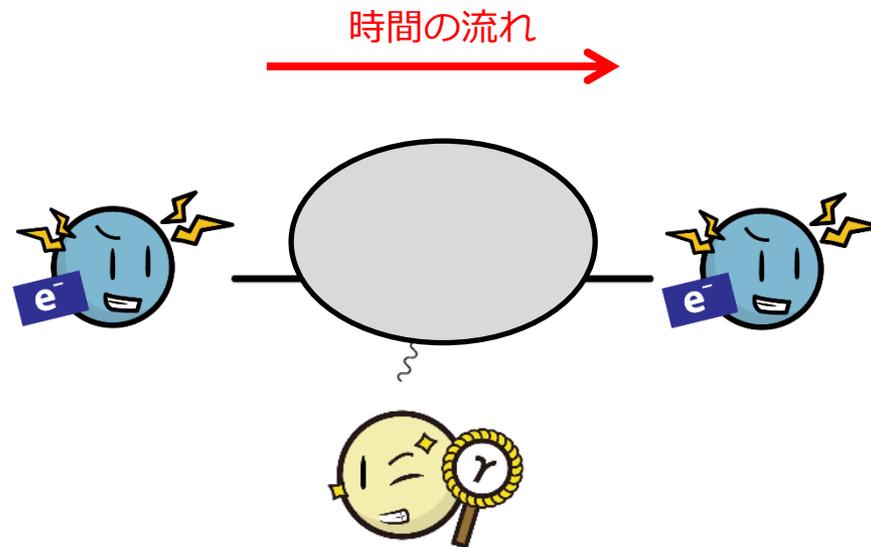
磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

# 場の量子論ってすごい

磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{g - 2}{2}$$



# 場の量子論ってすごい

磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

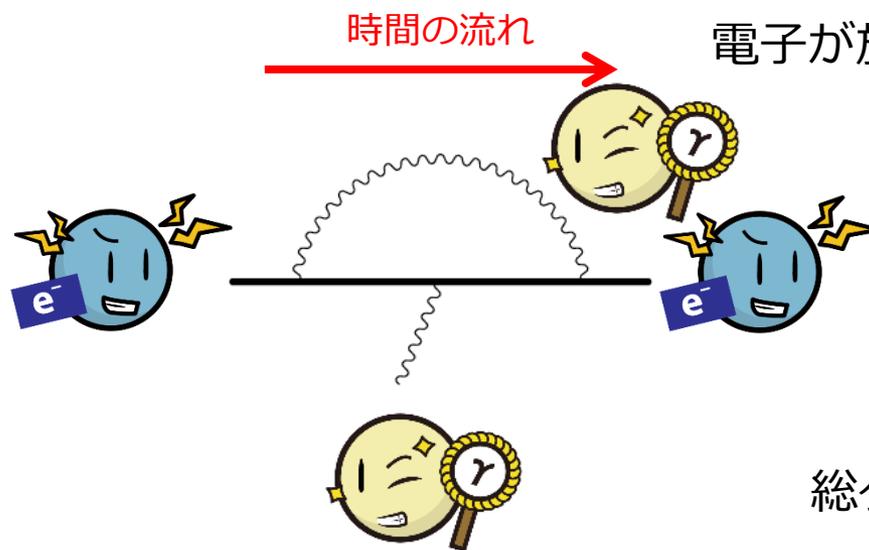
磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{1\alpha}{2\pi}$$

( $\alpha \approx 1/137$ )



Julian Schwinger



電子が放出した光子をまた吸収

総ダイアグラム数 : 1

# 場の量子論ってすごい

磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

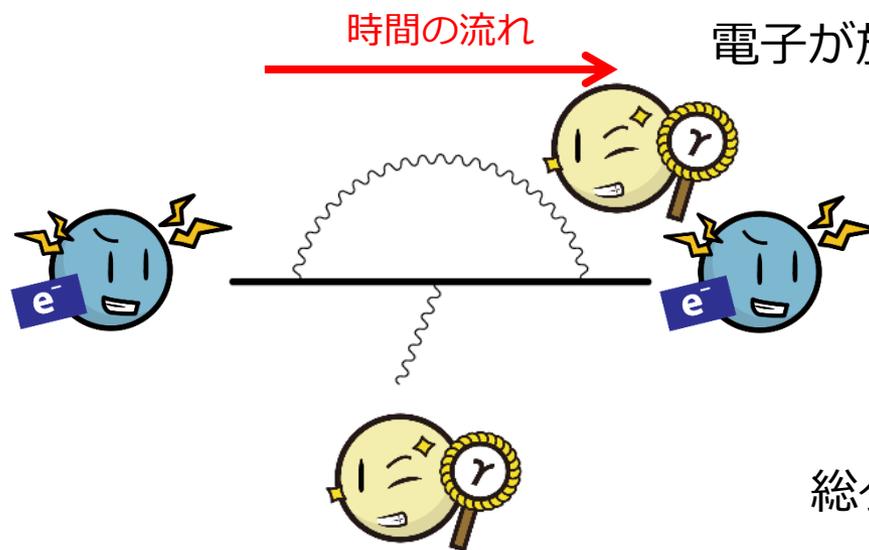
磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{1\alpha}{2\pi}$$

( $\alpha \approx 1/137$ )



Julian Schwinger



電子が放出した光子をまた吸収

総ダイアグラム数 : 1

# 場の量子論ってすごい

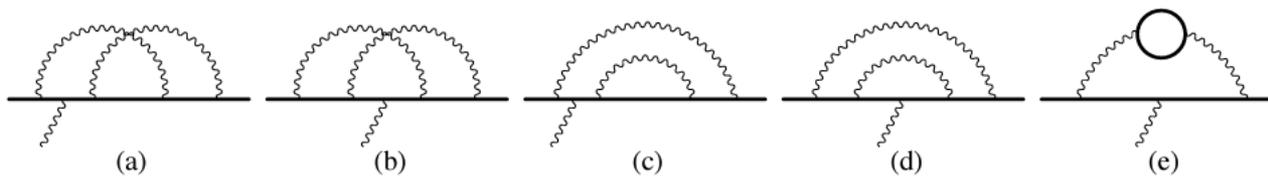
磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0.3 \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2$$

( $\alpha \approx 1/137$ )

注) 正確な係数を含む式は [Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]



総ダイアグラム数: 7

の一部

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]

[ 45 ]

# 場の量子論ってすごい

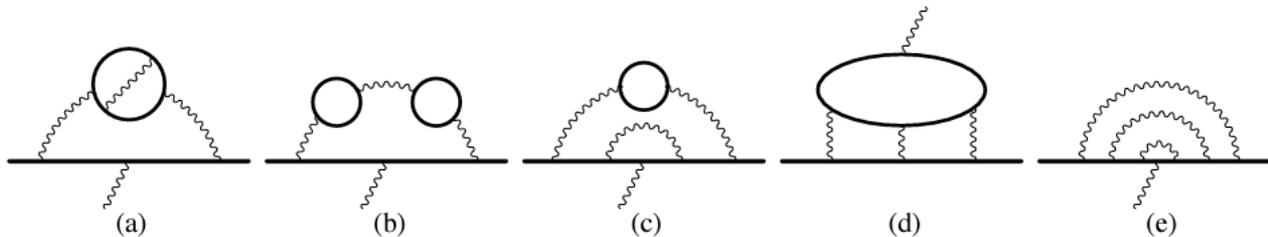
磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0.3 \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2 + 1.1 \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^3$$

( $\alpha \approx 1/137$ )

注) 正確な係数を含む式は [Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]



総ダイアグラム数 : 72

の一部

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]

[ 46 ]

# 場の量子論ってすごい

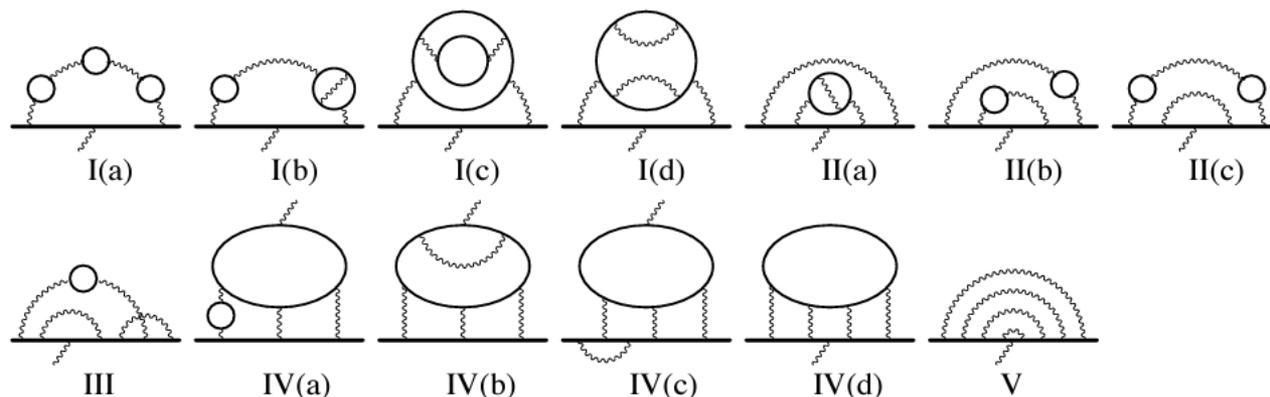
磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0.3 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1.1 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 - 1.9 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4$$

( $\alpha \approx 1/137$ )

注) 正確な係数を含む式は [Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]



総ダイアグラム数 : 891

の一部

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]

[ 47 ]

# 場の量子論ってすごい

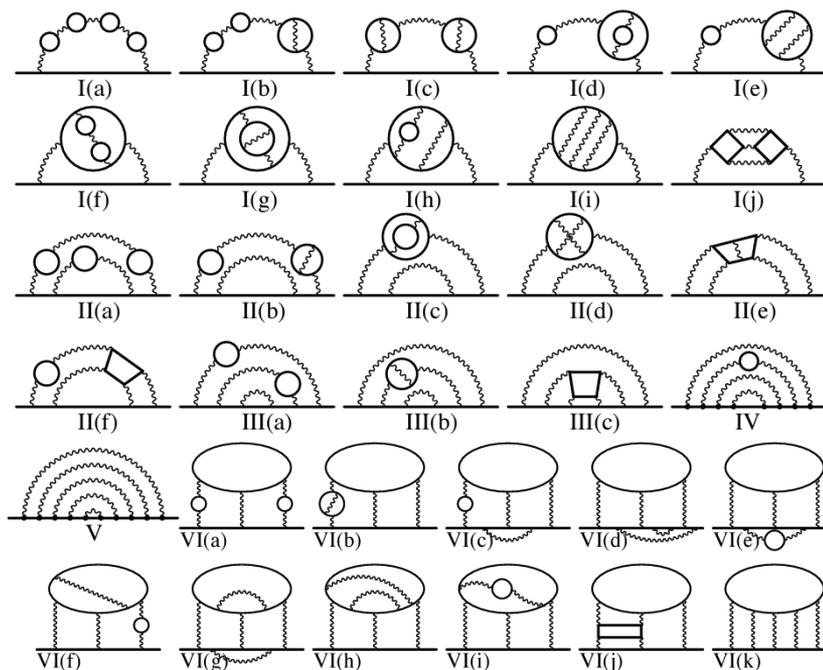
磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0.3 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1.1 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 - 1.9 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + 9.2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5$$

( $\alpha \approx 1/137$ )

注) 正確な係数を含む式は [Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]



総ダイアグラム数:  
12672  
の一部

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]

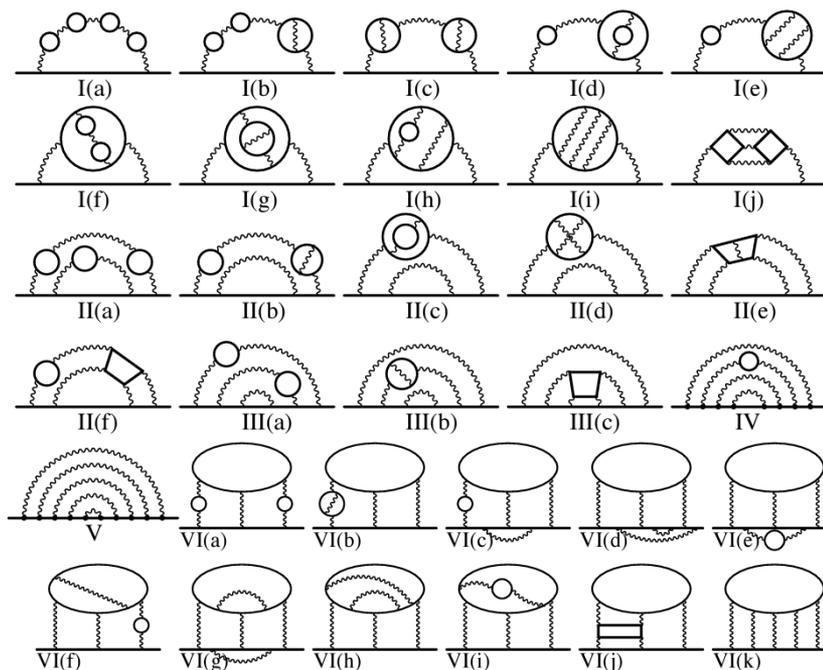
# 場の量子論ってすごい

磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = 1\,159\,652\,180.252(95) \times 10^{-12}$$

[Morel, Yao, Clade, Guellati-Khelifa (2020)]



総ダイアグラム数：  
12672  
の一部

[Aoyama, Kinoshita, Nio (2019)]

# 場の量子論ってすごい

磁場とスピンの相互作用ハミルトニアン  $H = -\frac{ge}{2m_e} \vec{s} \cdot \vec{B}$

磁気双極子モーメント

$$a_e = 1\,159\,652\,180.252(95) \times 10^{-12}$$

[Morel, Yao, Clade, Guellati-Khelifa (2020)]

$$a_e = 1\,159\,652\,180.59(13) \times 10^{-12}$$

[Fan, Myers, Sukra, Gabrielse (2022)]

$10^{-12}$  (一兆分の一) の精度で理論と実験が一致！

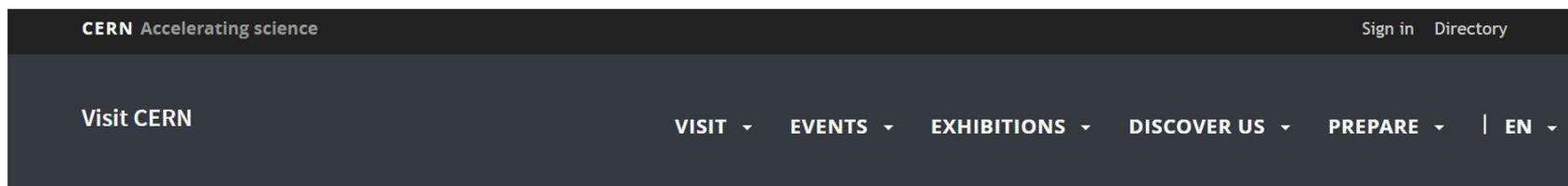
# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

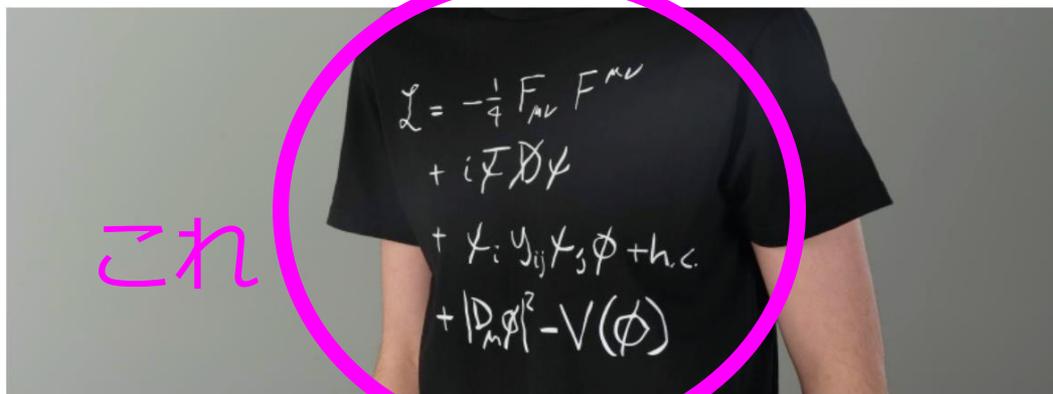
- 
- 標準模型の粒子たち
  - ヒッグス機構
  - 小林益川機構
  - 標準模型すごい

# 標準模型

標準模型 : 場の量子論に基づいて、この世界の素粒子を記述する模型

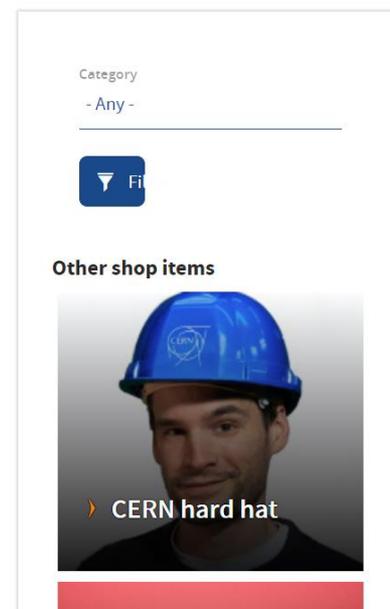


## Standard Model formula T-Shirt



"Lagrangian of the Standard Model of particle physics"

This equation neatly sums up our current understanding of fundamental particles and forces. It represents mathematically what we call the [Standard Model of particle physics](#). The top line describes the forces: electricity,



# 標準模型の粒子



# 標準模型の粒子

力を伝える粒子

### 物質粒子 matter (fermions)

クォーク quarks	<b>u</b> アップクォーク 	<b>c</b> チャームクォーク 	<b>t</b> トップクォーク 
	<b>d</b> ダウルクォーク 	<b>s</b> ストレンジクォーク 	<b>b</b> ボトムクォーク 
	<b>e</b> 電子 	<b><math>\mu</math></b> ミュー粒子 	<b><math>\tau</math></b> タウ粒子 
	<b><math>\nu_e</math></b> 電子ニュートリノ 	<b><math>\nu_\mu</math></b> ミューニュートリノ 	<b><math>\nu_\tau</math></b> タウニュートリノ 

この世の物質をつくる粒子（とその仲間）

### ゲージ粒子 gauge bosons

<b><math>\gamma</math></b> 光子 (フォトン) 	電磁気力 electromagnetic
<b>g</b> グルーオン 	強い力 strong
<b>Z, W<sup>±</sup></b> ウィークボソン 	弱い力 weak

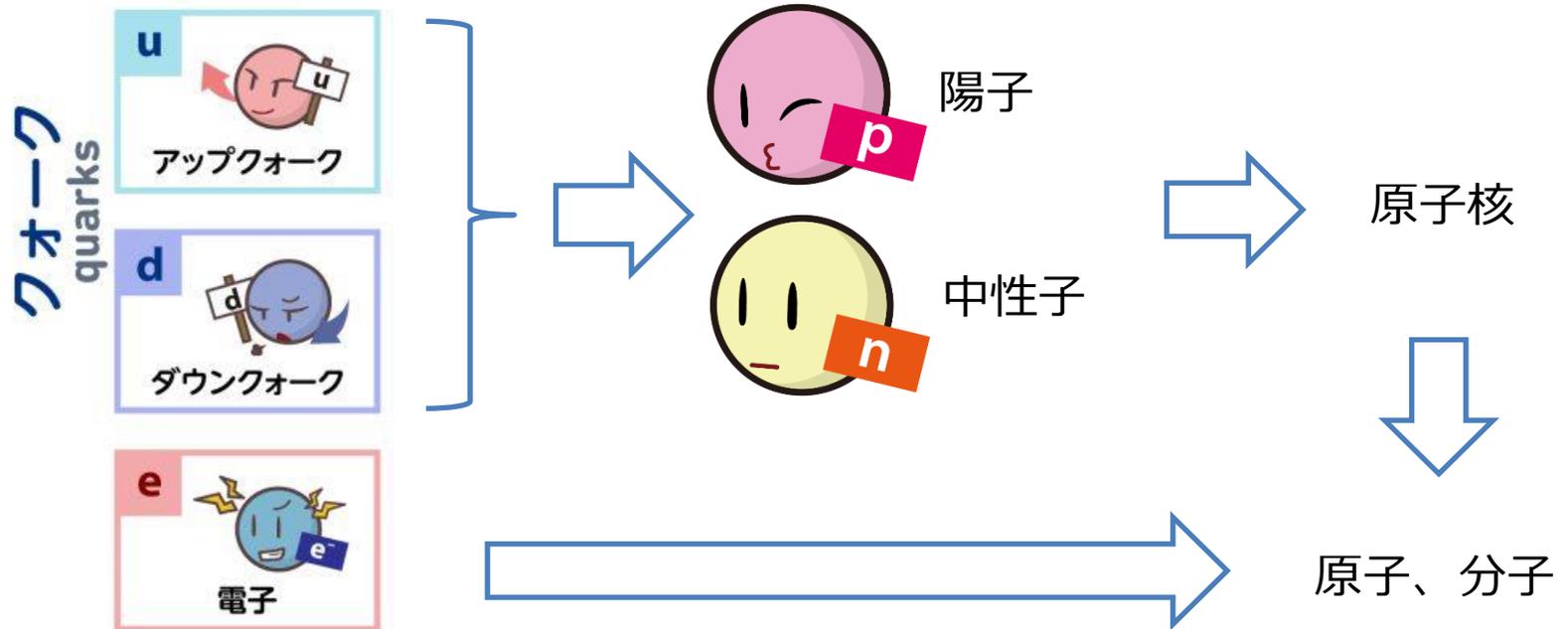
### H ヒッグス粒子 Higgs bosons ヒッグス粒子

“質量の源”

# この世の物質をつくる粒子



# この世の物質をつくる粒子



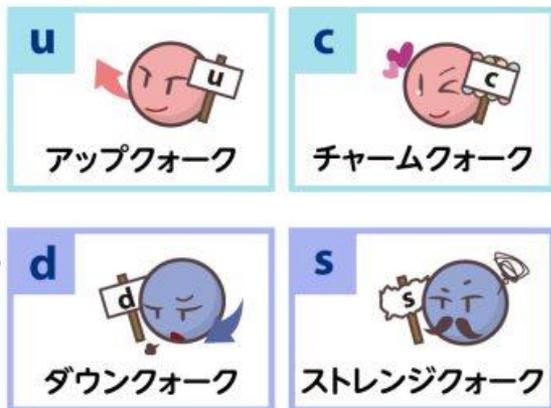
# この世の物質をつくる粒子



# この世の物質をつくる粒子

弱い相互作用の“相方”

クォーク  
quarks



電荷 :  $+2/3 e$

電荷 :  $-1/3 e$

弱い相互作用の“相方”

レプトン  
leptons



電荷 :  $-e$

電荷 :  $0$

第一世代

第二世代

# この世の物質をつくる粒子

## 物質粒子 matter (fermions)

弱い相互作用の“相方”

クォーク  
quarks

<b>u</b> アップクォーク	<b>c</b> チャームクォーク	<b>t</b> トップクォーク
<b>d</b> ダウンクォーク	<b>s</b> ストレンジクォーク	<b>b</b> ボトムクォーク

電荷 :  $+2/3 e$

電荷 :  $-1/3 e$

弱い相互作用の“相方”

レプトン  
leptons

<b>e</b> 電子	<b><math>\mu</math></b> ミュー粒子	<b><math>\tau</math></b> タウ粒子
<b><math>\nu_e</math></b> 電子ニュートリノ	<b><math>\nu_\mu</math></b> ミューニュートリノ	<b><math>\nu_\tau</math></b> タウニュートリノ

電荷 :  $-e$

電荷 :  $0$

第一世代

第二世代

第三世代

軽い

中くらい

重い

# この世の物質をつくる粒子

## 物質粒子 matter (fermions)

弱い相互作用の"相方"

クォーク  
quarks

<p><b>u</b></p> <p>アップクォーク</p>	<p><b>c</b></p> <p>チャームクォーク</p>	<p><b>t</b></p> <p>トップクォーク</p>
<p><b>d</b></p> <p>ダウルクォーク</p>	<p><b>s</b></p> <p>ストレンジクォーク</p>	<p><b>b</b></p> <p>ボトムクォーク</p>

電荷 :  $+2/3 e$

$1/3 e$

Who ordered that?

弱い相互作用の"相方"

レプトン  
leptons

<p><b>e</b></p> <p>電子</p>	<p><b><math>\mu</math></b></p> <p>ミュー粒子</p>	<p><b><math>\tau</math></b></p> <p>タウ粒子</p>
<p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>電子ニュートリノ</p>	<p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>ミューニュートリノ</p>	<p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>タウニュートリノ</p>

電荷 :  $-e$

電荷 :  $0$

第一世代

第二世代

第三世代

軽い

中くらい

重い



Isidor Rabi

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！

## ゲージ粒子 gauge bosons

$\gamma$



光子（フォトン）

electromagnetic

電磁気力

$g$



グルーオン

strong

強い力

$Z, W^{\pm}$



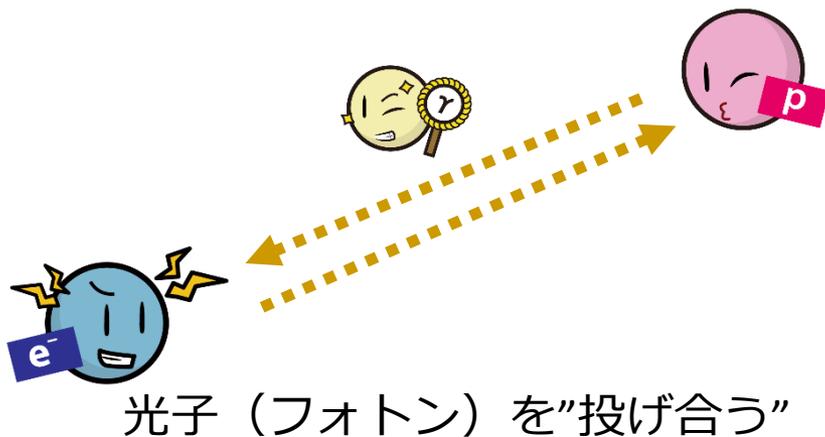
ウィークボソン

weak

弱い力

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！



電磁気力

## ゲージ粒子 gauge bosons

$\gamma$

光子（フォトン）

電磁気力  
electromagnetic

$g$

グルーオン

強い力  
strong

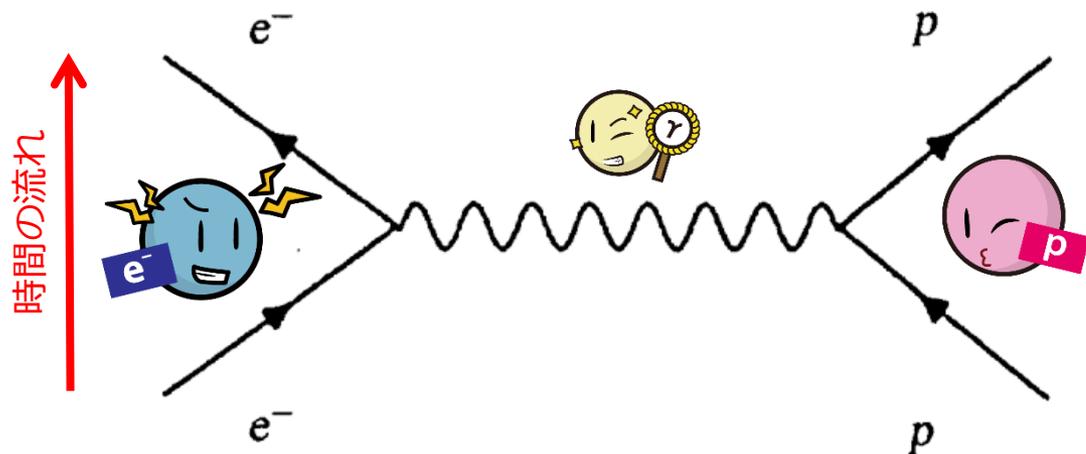
$Z, W^\pm$

ウィークボソン

弱い力  
weak

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！



光子（フォトン）を”投げ合う”



電磁気力

## ゲージ粒子 gauge bosons

	電磁気力 electromagnetic	強い力 strong	弱い力 weak
$\gamma$	光子（フォトン）		
$g$		グルーオン	
$Z, W^\pm$			ウィークボソン

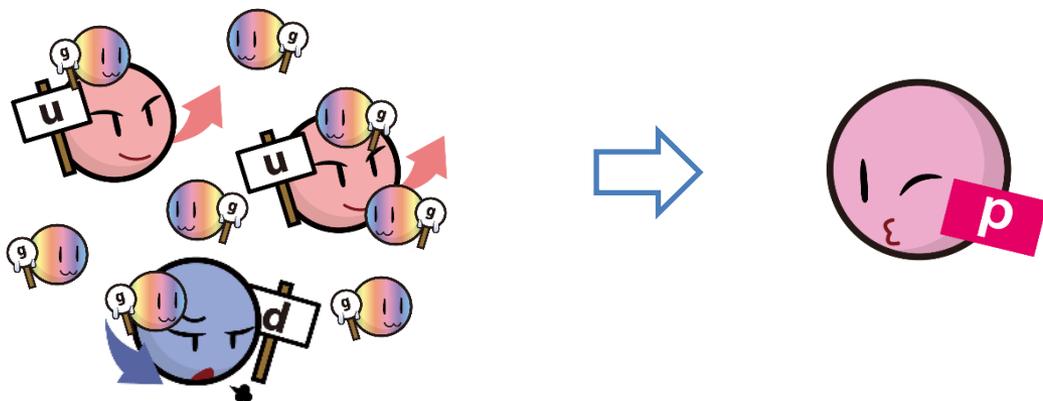
電磁気力  
electromagnetic

強い力  
strong

弱い力  
weak

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！



クォークを糊（glue）のようにくっつける

## ゲージ粒子 gauge bosons



電磁気力  
electromagnetic



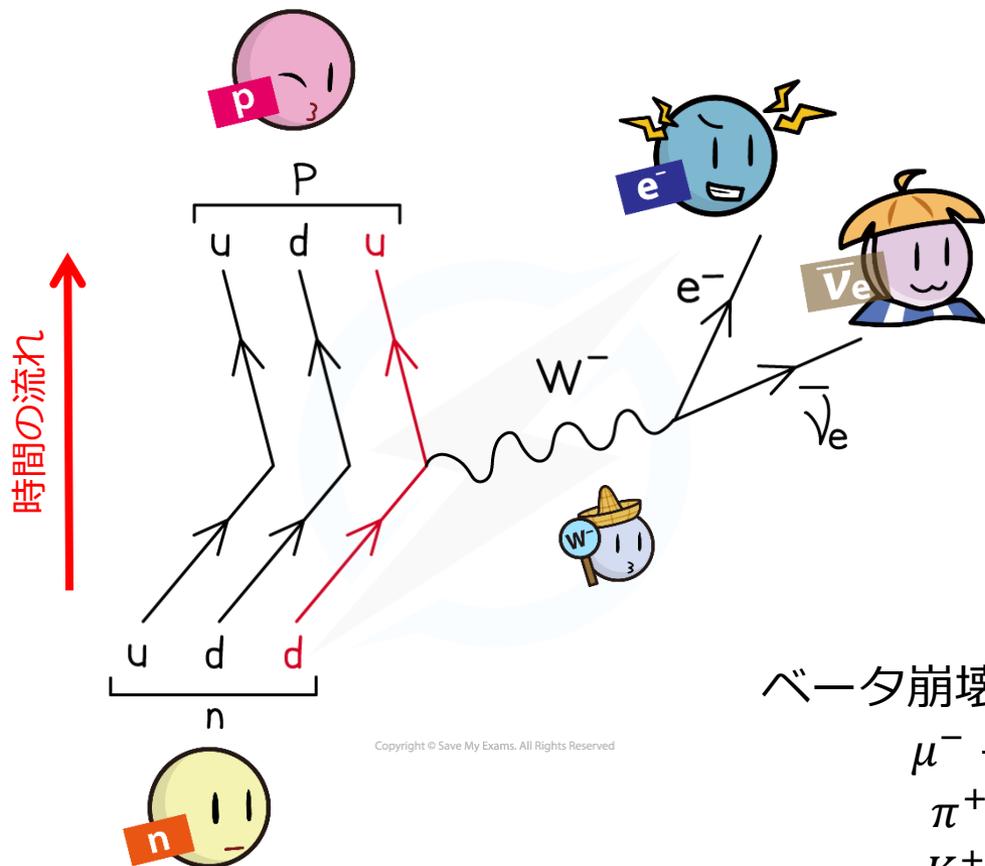
強い力  
strong



弱い力  
weak

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！



Copyright © Save My Exams. All Rights Reserved

## ゲージ粒子 gauge bosons

**γ**  
光子 (フォトン)

電磁気力  
electromagnetic

**g**  
グルーオン

強い力  
strong

**Z, W<sup>±</sup>**  
ウィークボソン

弱い力  
weak

ベータ崩壊 ( $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ )

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

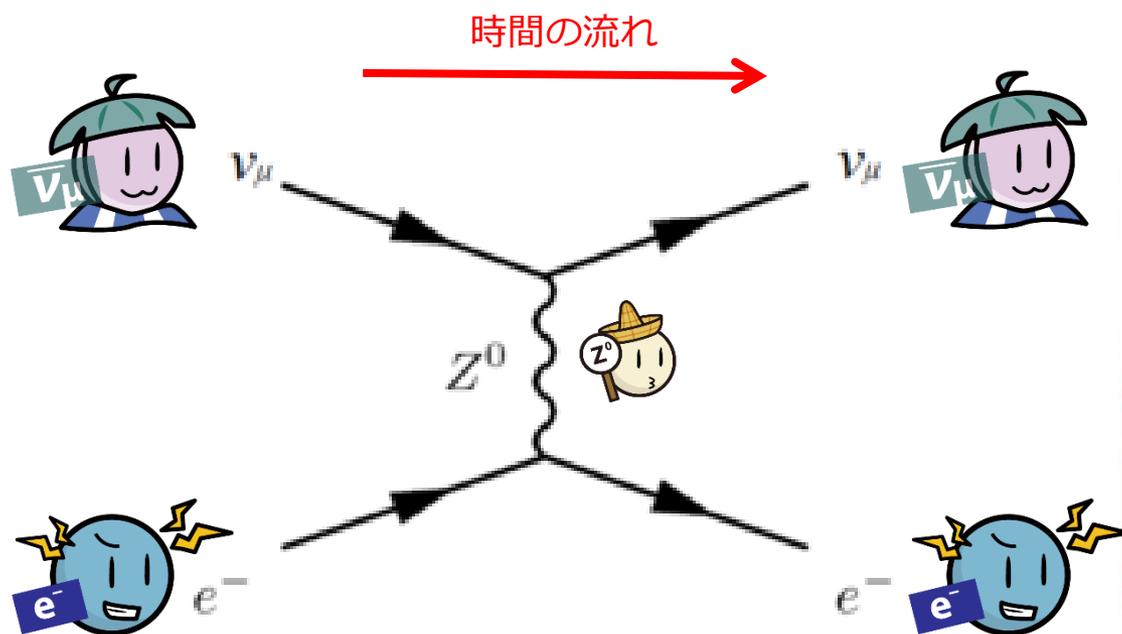
$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

$$B \rightarrow D \tau \nu$$

などなど...

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！



中性カレント相互作用 (neutral current interaction)

## ゲージ粒子 gauge bosons

$\gamma$

光子 (フォトン)

電磁気力  
electromagnetic

$g$

グルーオン

強い力  
strong

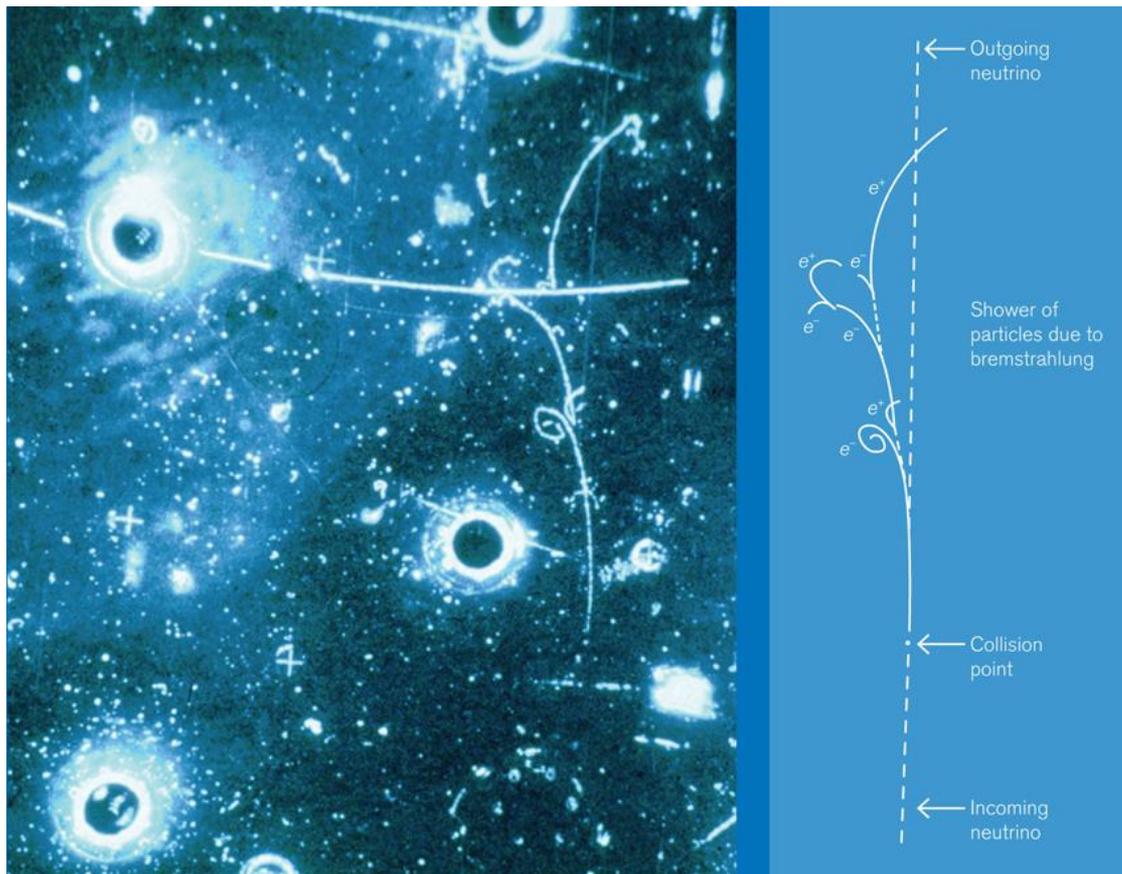
$Z, W^\pm$

ウィークボソン

弱い力  
weak

# 力を伝える粒子

ゲージ粒子が力（ゲージ相互作用）の源！



## ゲージ粒子 gauge bosons



光子（フォトン）

電磁気力  
electromagnetic



グルーオン

強い力  
strong



ウィークボソン

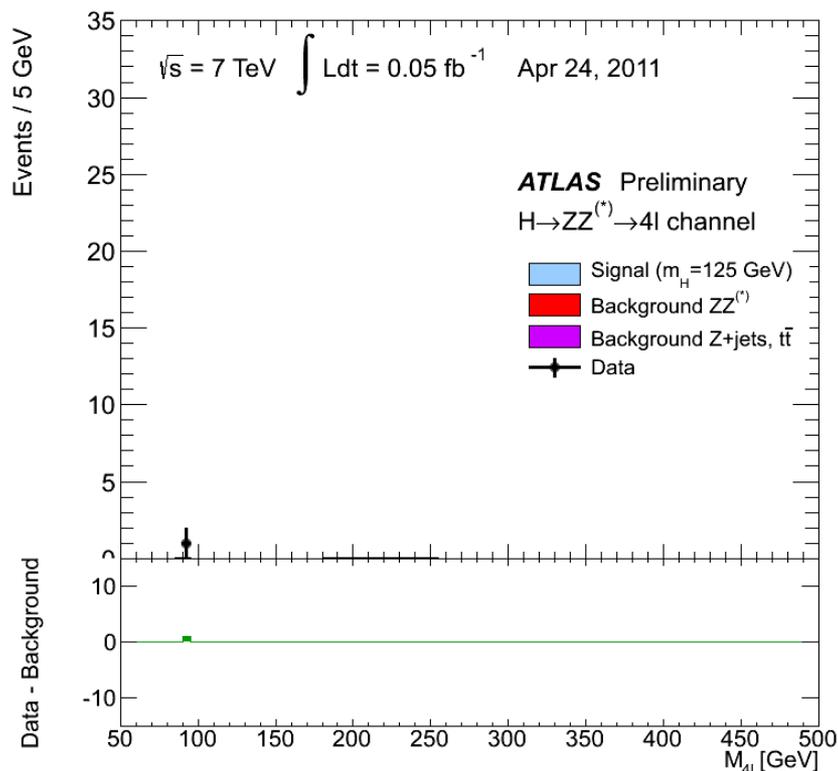
弱い力  
weak

[ <https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current> ]

中性カレント相互作用 (neutral current interaction)

# ヒッグス粒子

- クォーク、レプトン、ウィークボソンの質量の源
- 2012年7月に発見



※ PDF化したらGIFアニメが上手く埋め込めなかった  
ので、以下のリンクを参照してください。

<https://cds.cern.ch/record/2230893>



Higgs bosons  
ヒッグス粒子

# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. **標準模型ってどんなもの**
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

- 
- 標準模型の粒子たち
  - **ヒッグス機構**
  - 小林益川機構
  - 標準模型すごい

# ヒッグス機構 (雑な説明)

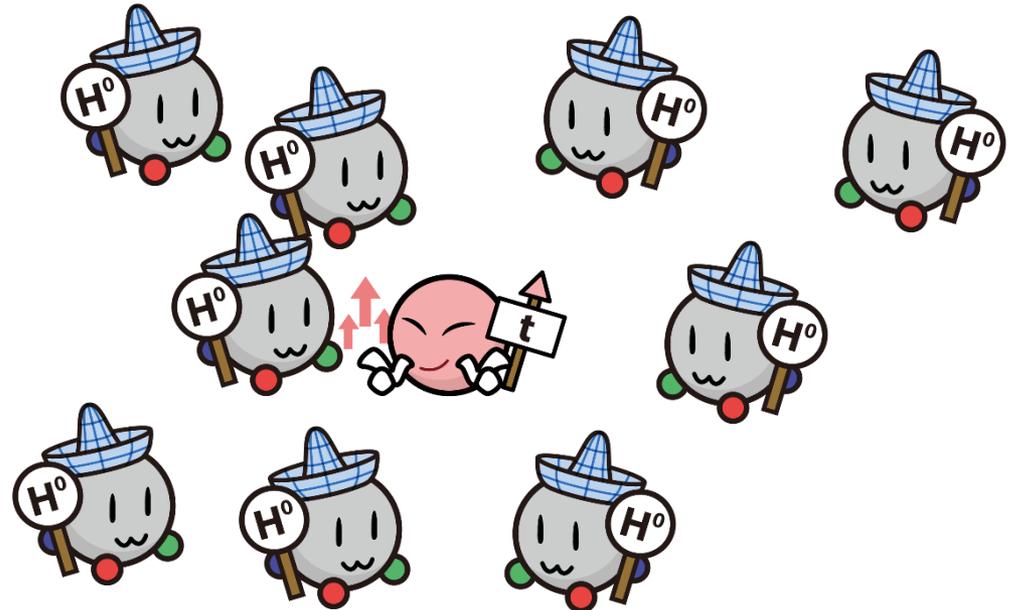


Peter W. Higgs

真空にはヒッグスがギューツと詰まった状態。

ヒッグスと相互作用する粒子は「動きにくくなる」 → 重くなる (質量持つ)

Where is Higgs...?



We love top quark!

# ヒッグス機構 (雑な説明)

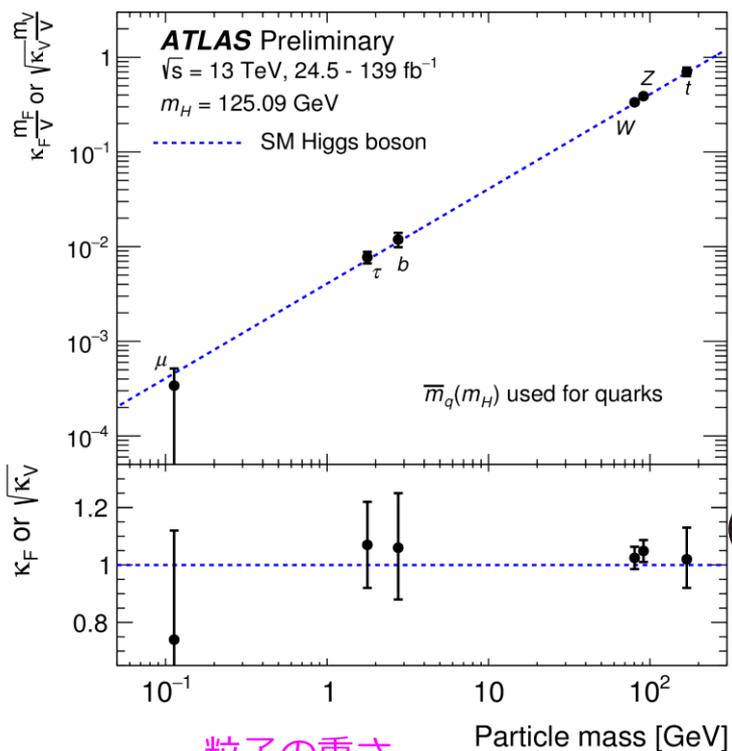


Peter W. Higgs

真空にはヒッグスがギューツと詰まった状態。

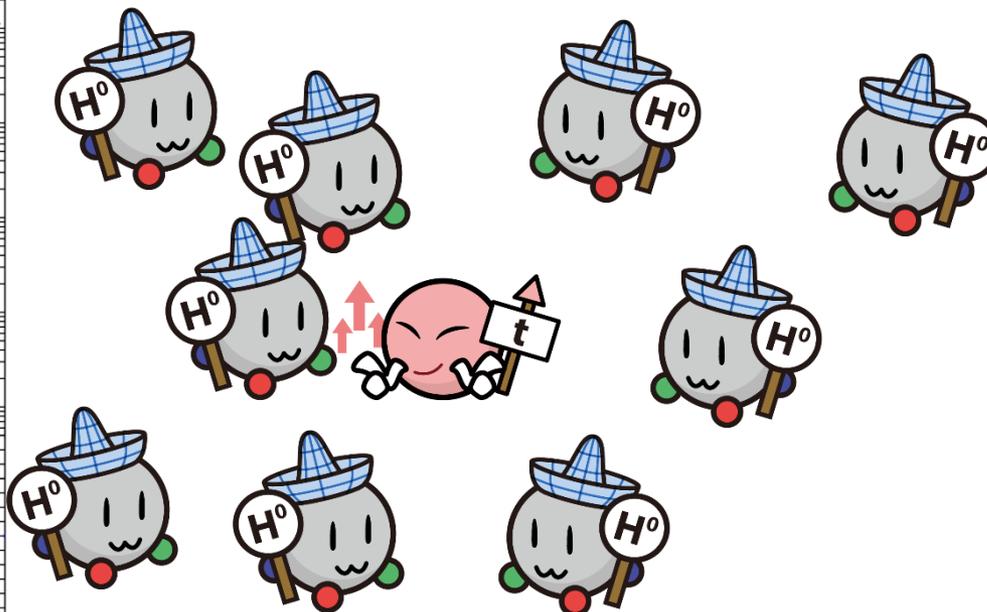
ヒッグスと相互作用する粒子は「動きにくくなる」 → 重くなる (質量持つ)

ヒッグスとの相互作用の強さ



粒子の重さ

[ ATLAS-CONF-2019-015 ]



We love top quark!

# ヒッグス機構 (ちゃんとした説明)

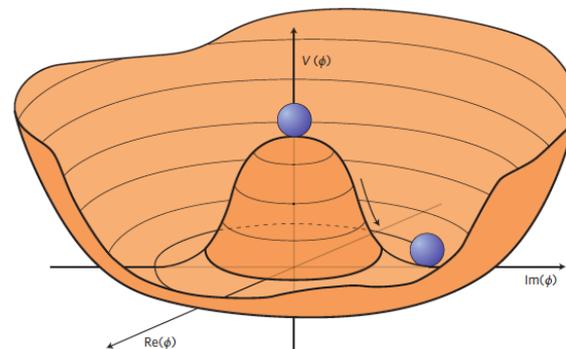


Peter W. Higgs

ヒッグス場  $H = \begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_0 \end{pmatrix}$  ( $SU(2)$  doublet で Hypercharge  $Y = 1/2$ )

ポテンシャルエネルギー

$$\begin{aligned} V(H) &= \lambda |H|^4 - \mu^2 |H|^2 \\ &= \lambda (|\phi_+|^2 + |\phi_0|^2)^2 - \mu^2 (|\phi_+|^2 + |\phi_0|^2) \end{aligned}$$



真空では  $V(H)$  を最小化:  $\begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu/\sqrt{2\lambda} \end{pmatrix}$

ヒッグスとゲージ場の相互作用:

$$\begin{aligned} L &\ni \left| \partial_\mu \phi_+ + \frac{ig}{2} W_\mu^3 \phi_+ - \frac{ig'}{2} B_\mu \phi_+ - \frac{ig}{\sqrt{2}} W_\mu^+ \phi_0 \right|^2 + \left| \partial_\mu \phi_0 - \frac{ig}{2} W_\mu^3 \phi_0 - \frac{ig'}{2} B_\mu \phi_0 - \frac{ig}{\sqrt{2}} W_\mu^- \phi_+ \right|^2 \\ &\ni \frac{g^2 \phi_0^2}{2} W_\mu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2} \phi_0^2 (g W_\mu^3 + g' B_\mu)^2 \end{aligned}$$

これがゲージ場の質量となる。

Wボゾンの質量

Zボゾンの質量

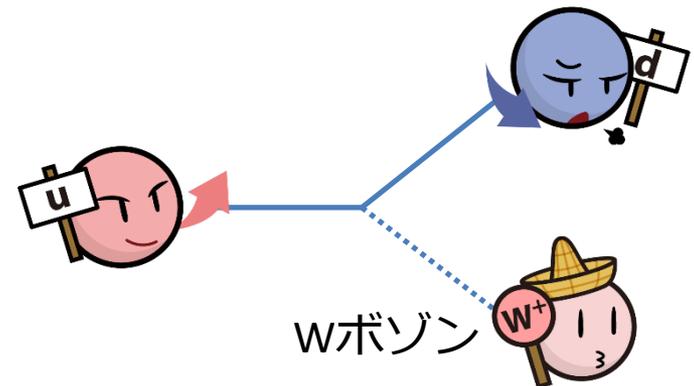
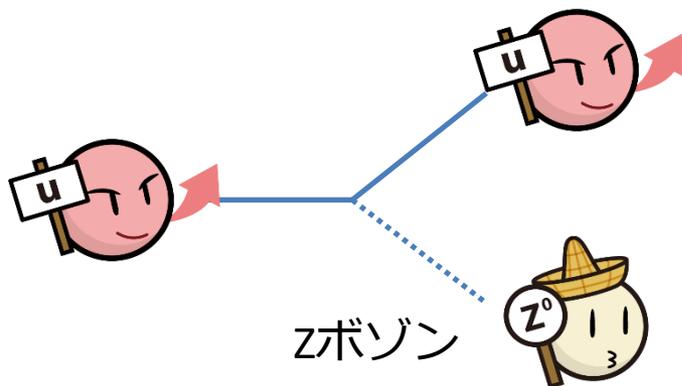
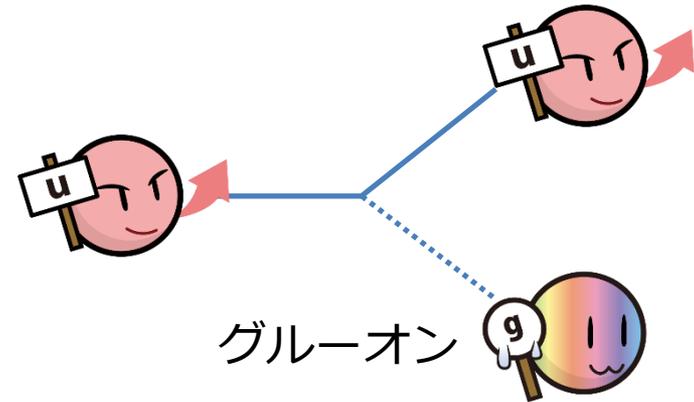
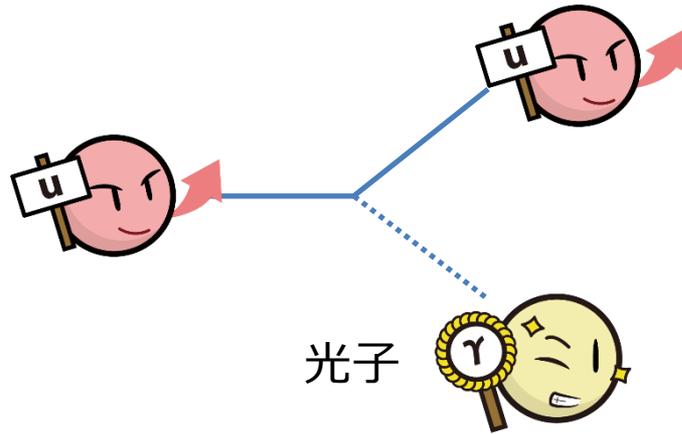
# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

- 
- 標準模型の粒子たち
  - ヒッグス機構
  - **小林益川機構**
  - 標準模型すごい

# Wボソンは粒子の種類変える

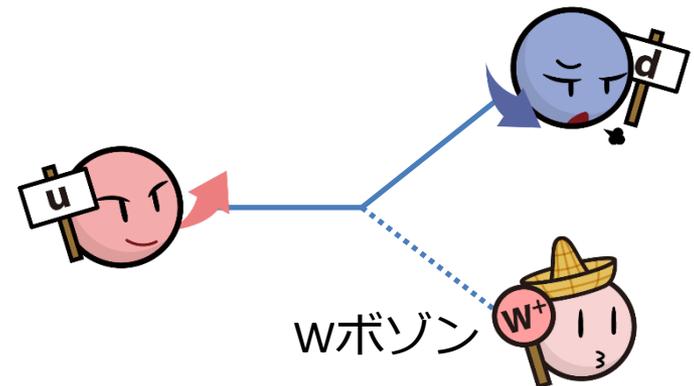
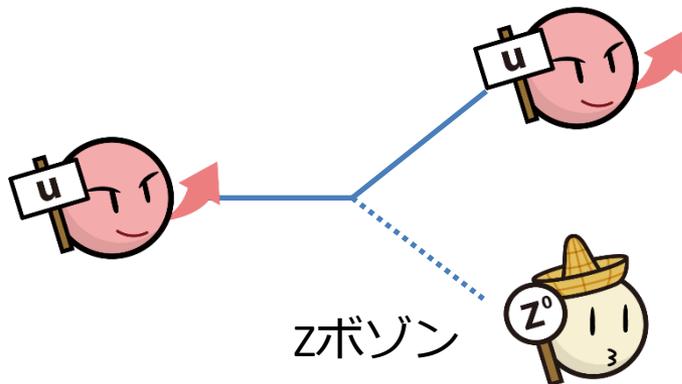
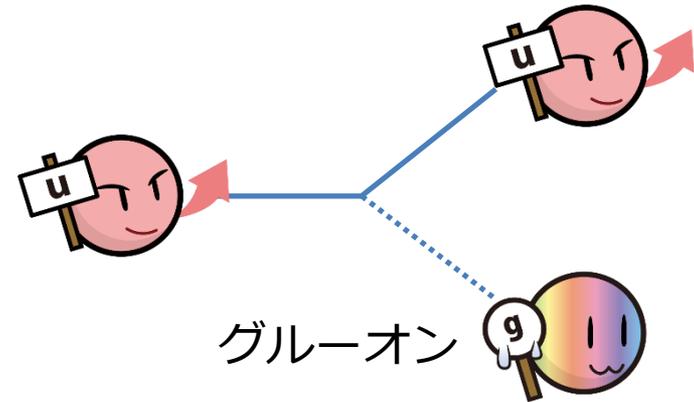
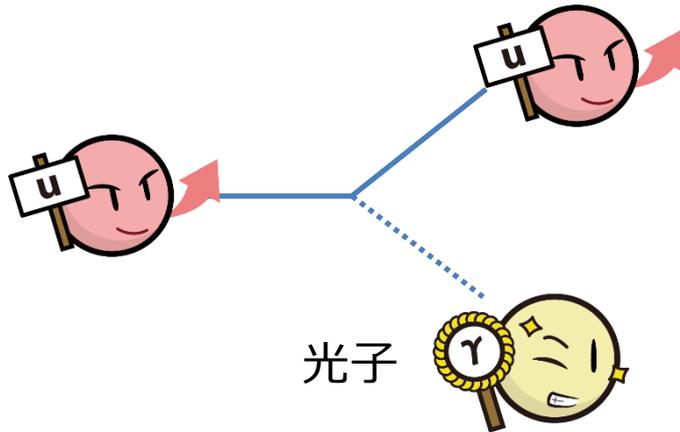
標準模型の4種類のゲージ粒子



# Wボソンは粒子の種類変える

標準模型の4種類のゲージ粒子

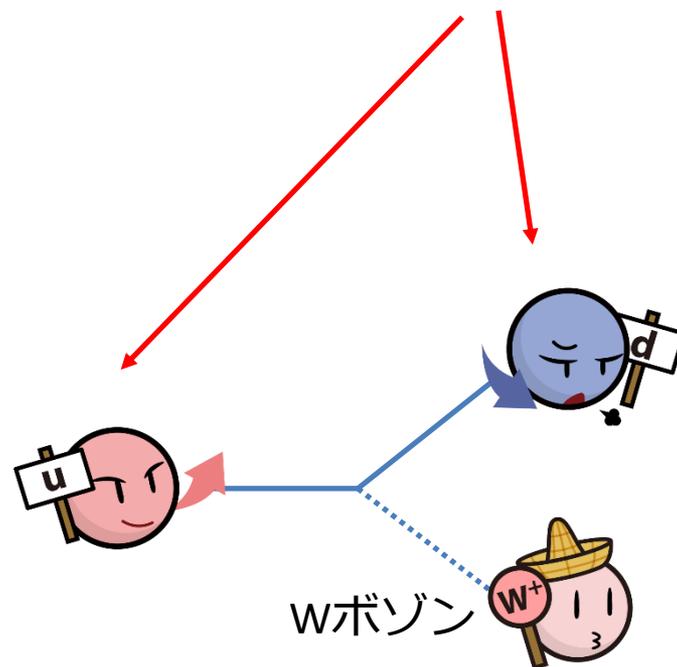
粒子の種類が変わらない



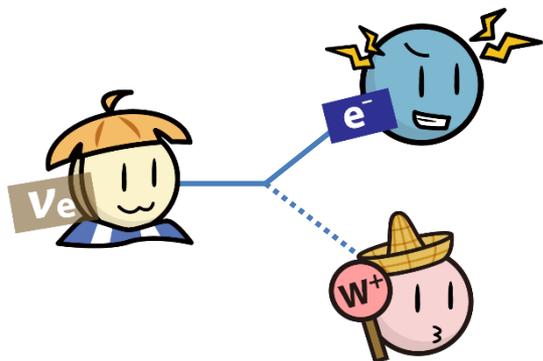
粒子の種類が変わる

# Wボソンは粒子の種類変える

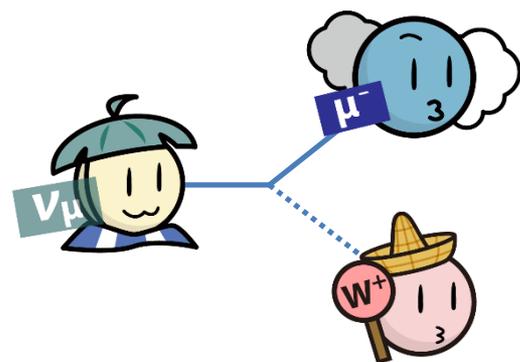
Wボソンを放出したり、吸収したりすることで移りあう「相方」がいる。



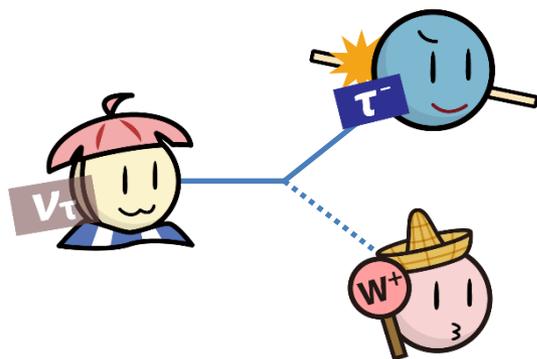
# 相方は誰なんだ問題



電子の相方は、電子ニュートリノ

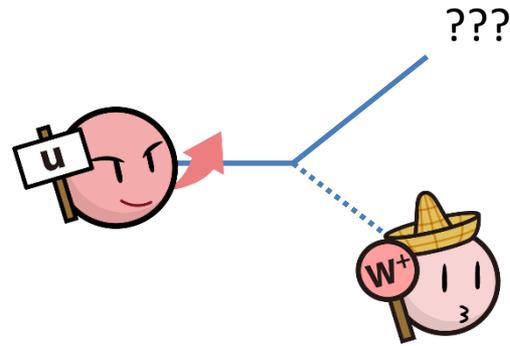


ミュー粒子の相方は、ミューニュートリノ



タウ粒子の相方は、タウニュートリノ

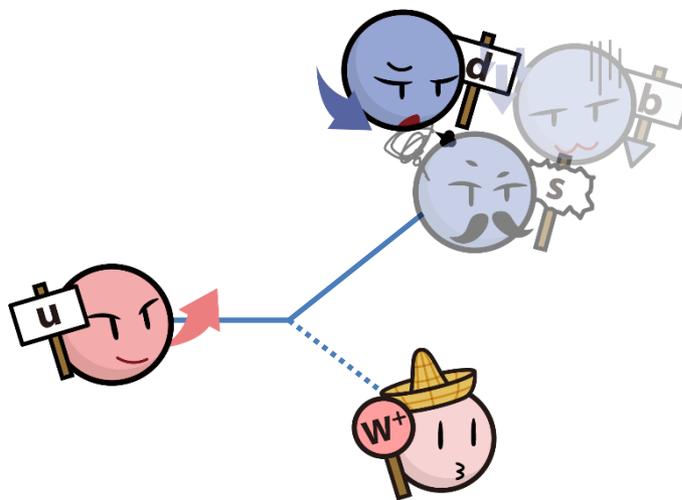
# 相方は誰なんだ問題



アップクォークの相方は??

# 相方は誰なんだ問題

$$|u\text{の相方}\rangle = V_{ud}|d\rangle + V_{us}|s\rangle + V_{ub}|b\rangle \quad \text{ただし、}|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$$



アップクォークの相方は、ダウン、ストレンジ、ボトムクォークの**重ね合わせ**！

# 相方は誰なんだ問題

クォークの相方は、**重ね合わせ**になっている。

$$|u\text{の相方}\rangle = V_{ud}|d\rangle + V_{us}|s\rangle + V_{ub}|b\rangle \quad \text{ただし、} |V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1$$

$$|c\text{の相方}\rangle = V_{cd}|d\rangle + V_{cs}|s\rangle + V_{cb}|b\rangle \quad \text{ただし、} |V_{cd}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{cb}|^2 = 1$$

$$|t\text{の相方}\rangle = V_{td}|d\rangle + V_{ts}|s\rangle + V_{tb}|b\rangle \quad \text{ただし、} |V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2 = 1$$

uの相方とcの相方は直交。他の組み合わせも同様。

# 相方は誰なんだ問題

クォークの相方は、**重ね合わせ**になっている。  
3x3の複素ユニタリ行列を使って、

$$\begin{pmatrix} |u\text{の相方}\rangle \\ |c\text{の相方}\rangle \\ |t\text{の相方}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

# 相方は誰なんだ問題

クォークの相方は、**重ね合わせ**になっている。  
**3x3の複素ユニタリ行列**を使って、

$$\begin{pmatrix} |u\text{の相方}\rangle \\ |c\text{の相方}\rangle \\ |t\text{の相方}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

カビボ小林益川行列



Nicola Cabibbo

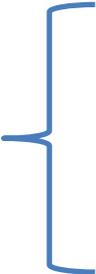


小林誠

益川敏英

# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

- 
- 標準模型の粒子たち
  - ヒッグス機構
  - 小林益川機構
  - **標準模型すごい**
  - 未解決問題

# 標準模型のパラメーターの数

クォーク(u, d, c, s, t, b)、レプトン(e,  $\mu$ ,  $\tau$ )、Wボゾン、Zボゾン、ヒッグス

- 粒子の質量パラメーター 12
- 電磁相互作用の強さ 1
- 強い相互作用 2 (強さ、CPの破れ)
- 小林益川機構 4 (混合角 3、CPの破れ 1)

合計

19

なんかすごい複雑。。。



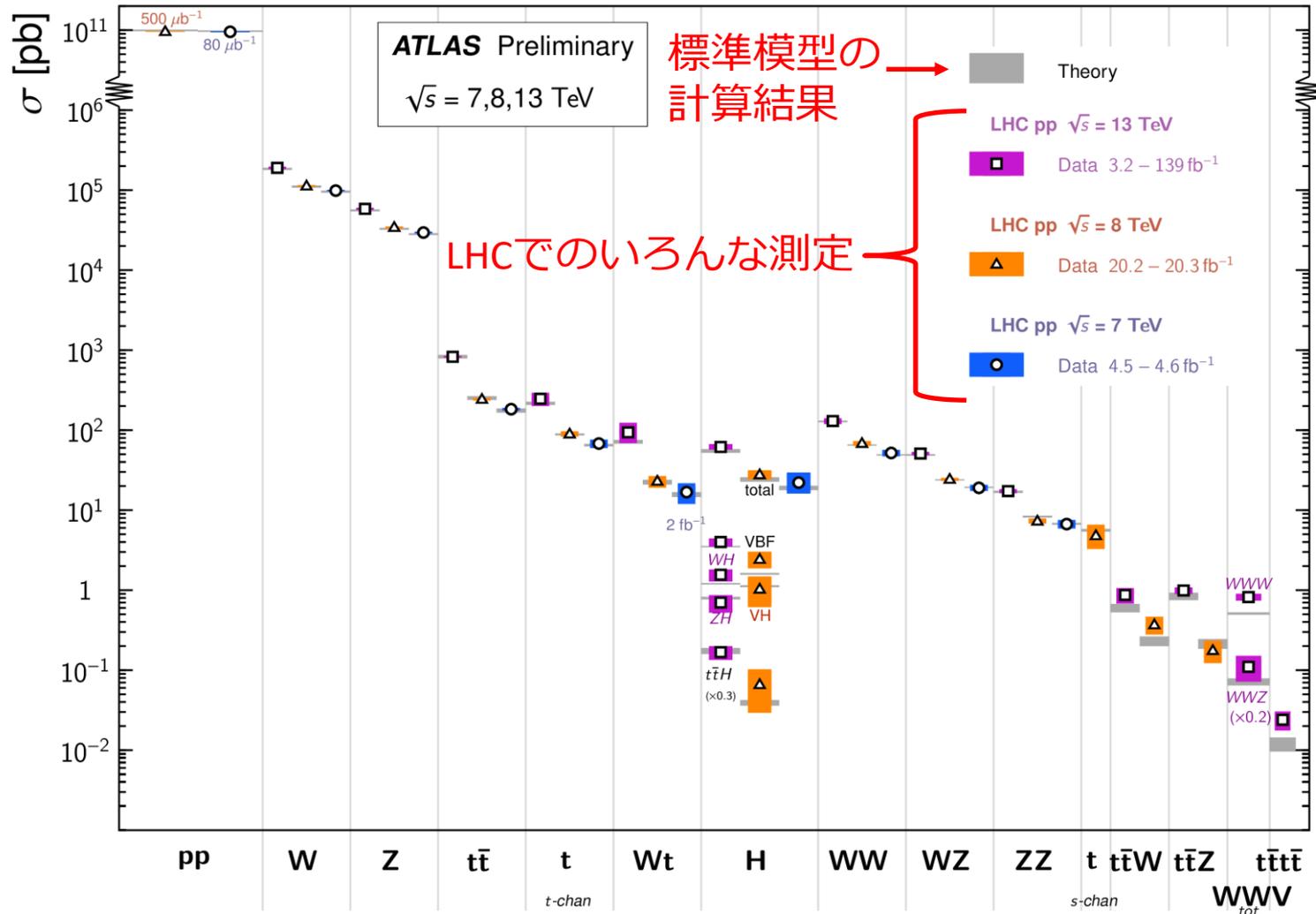
# 標準模型すごすぎてヤバイ

標準模型、実験と合いすぎてまじヤバイ

# 標準模型すごすぎてヤバイ

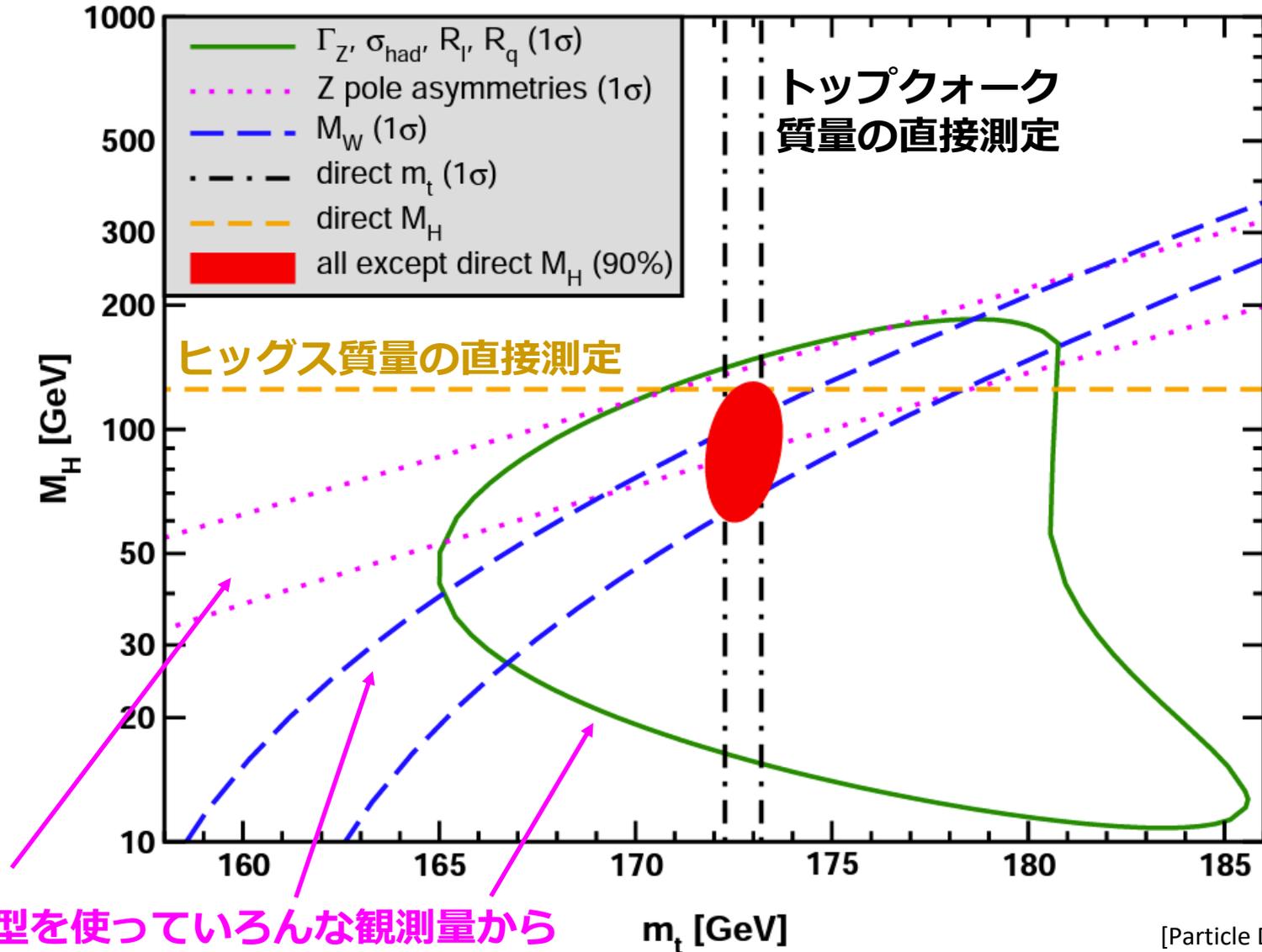
Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: February 2022



[ [https://atlaspo.cern.ch/public/summary\\_plots/](https://atlaspo.cern.ch/public/summary_plots/) ]

# 標準模型すごすぎてヤバイ

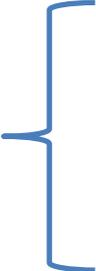


[Particle Data Group]

標準模型を使っていろんな観測量から  
 トップ、ヒッグスの質量を間接的に計算

# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

- 
- 標準模型の粒子たち
  - ヒッグス機構
  - 小林益川機構
  - 標準模型すごい
  - **未解決問題**

# 標準模型はすごい。けど、未解決問題もある

現実を説明できていない問題

暗黒物質って何？

インフレーションはどうやって起こった？

なぜ反物質はほとんどない？

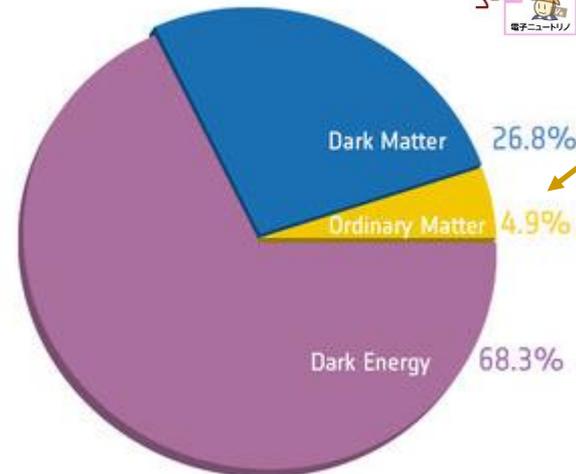
ニュートリノの質量はなぜ0じゃない？

# 暗黒物質って何？

宇宙のエネルギーのうち、約5%が普通の物質。

残りの約27% : ダークマター = なんかよく分からん謎の物質

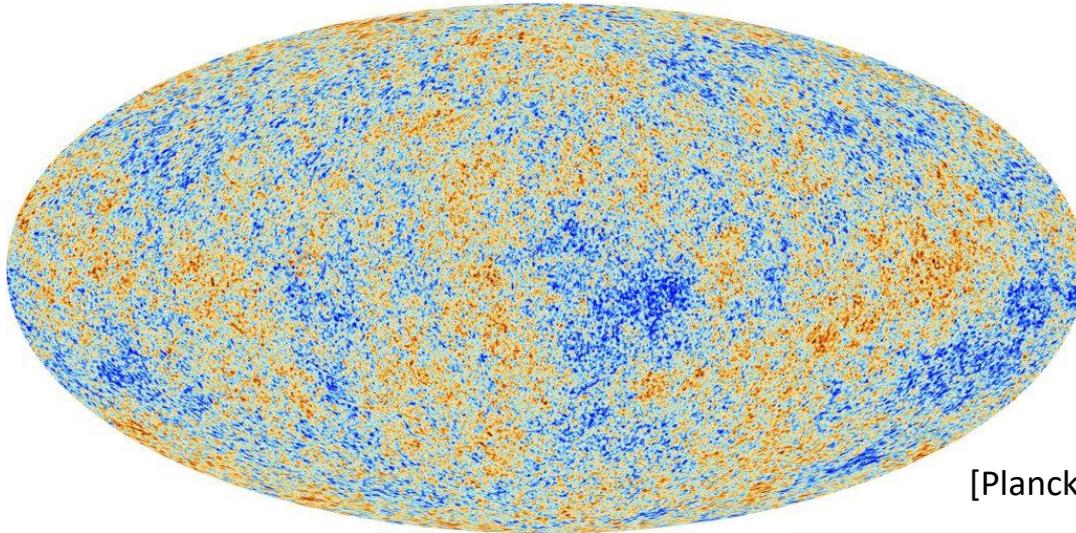
残りの約68% : ダークエネルギー = なんかよく分からん謎のエネルギー



結局ここだけ

[Planck collaboration]

# インフレーションはどうやって起こった？



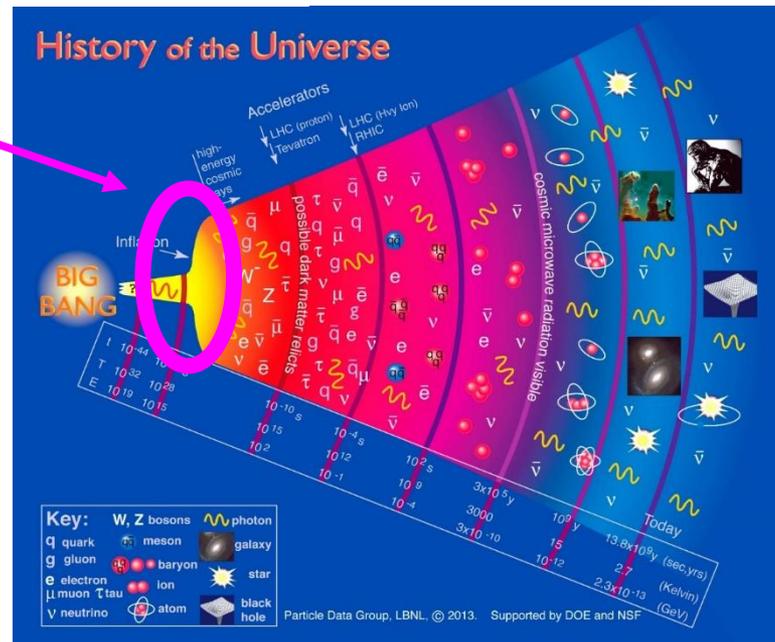
宇宙はほぼ一様。

[Planck collaboration]

むかしむかし、**すごいきおいで**  
宇宙が膨張したことがあるらしい。

**インフレーション (inflation)**

でもなんでそんなこと起こった？



# なぜ反物質がほとんどない？

陽子、中性子、電子でできているのが普通の物質。  
反陽子、反中性子、陽電子でできている反物質。

物質と反物質はすごく良く似た性質を持つ。

質量など全て同じ。電荷が逆符号なだけ。

なぜ現在の宇宙は物質だらけで、反物質がほとんどないのか？

物質と反物質の非対称性が（インフレーションが終わった後に）できたはず

# ニュートリノの質量はなぜ0じゃない？

標準模型ではニュートリノの質量は0

Where is Higgs...?



(注：ちゃんと言うと「くりこみ可能な次元4以下の相互作用では、質量を得られない」)

ニュートリノ振動 → ニュートリノの質量じつは0じゃない

$$m_2^2 - m_1^2 \simeq 0.8 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$$

$$|m_3^2 - m_{1,2}^2| \simeq 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

標準模型を超える物理が必要な最も直接的な証拠

# 標準模型はすごい。けど、未解決問題もある

現実を説明できていない問題

暗黒物質とはなにか

インフレーションはどうやって起こったか

物質と反物質の非対称性はどうやって生まれたか

ニュートリノの質量はどうやって生まれたか

理論的な問題

大統一理論はあるか

強いCP問題

← 後半のテーマ

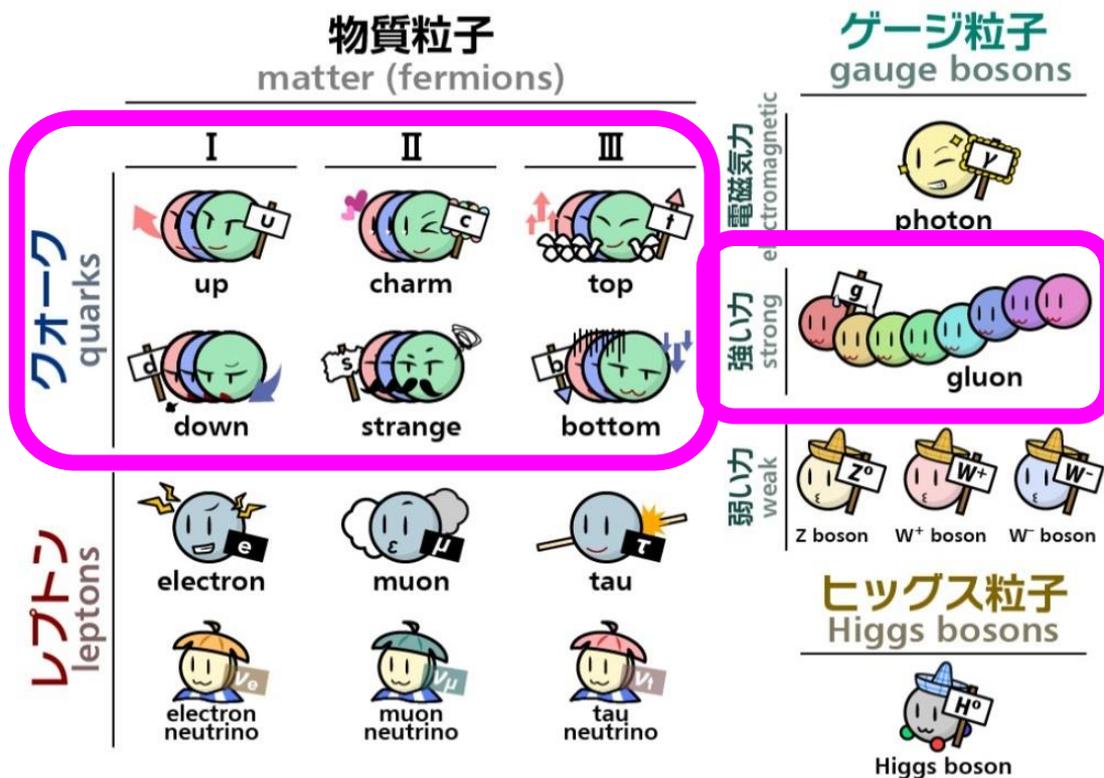
階層性問題

などなど

# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

# 強い相互作用をする素粒子たち



## 強いCP問題

強い相互作用をする粒子たち（クォーク、グルーオン）に関する問題

# クォーク

クォークは単独で取り出せない。次のような複合粒子（ハドロン）を作る。

バリオン : クォーク3つ、でできている

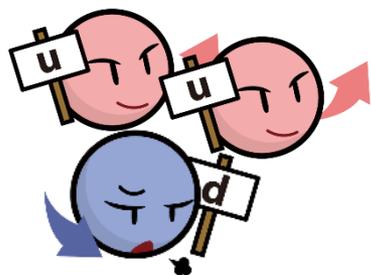
メソン : クォーク1つ、反クォーク1つ、でできている

# クォーク

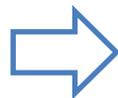
クォークは単独で取り出せない。次のような複合粒子（ハドロン）を作る。

**バリオン** : クォーク3つ、できている

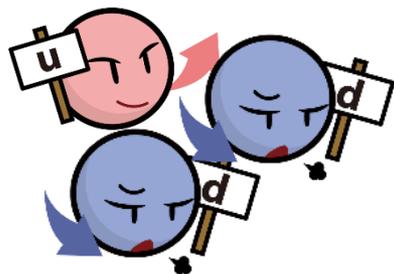
メソン : クォーク1つ、反クォーク1つ、できている



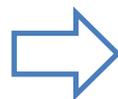
アップ、アップ、ダウン



陽子



アップ、ダウン、ダウン



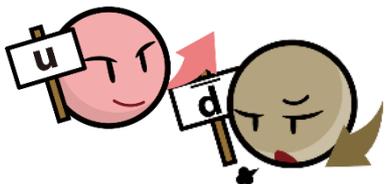
中性子

# クォーク

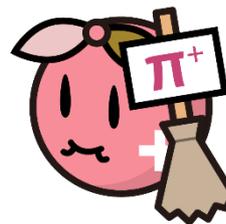
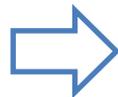
クォークは単独で取り出せない。次のような複合粒子（ハドロン）を作る。

バリオン : クォーク3つ、できている

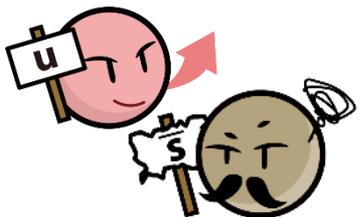
メソン : クォーク1つ、反クォーク1つ、できている



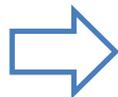
アップ、反ダウン



パイ+中間子

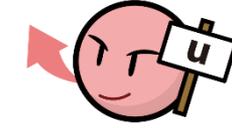


アップ、反ストレンジ



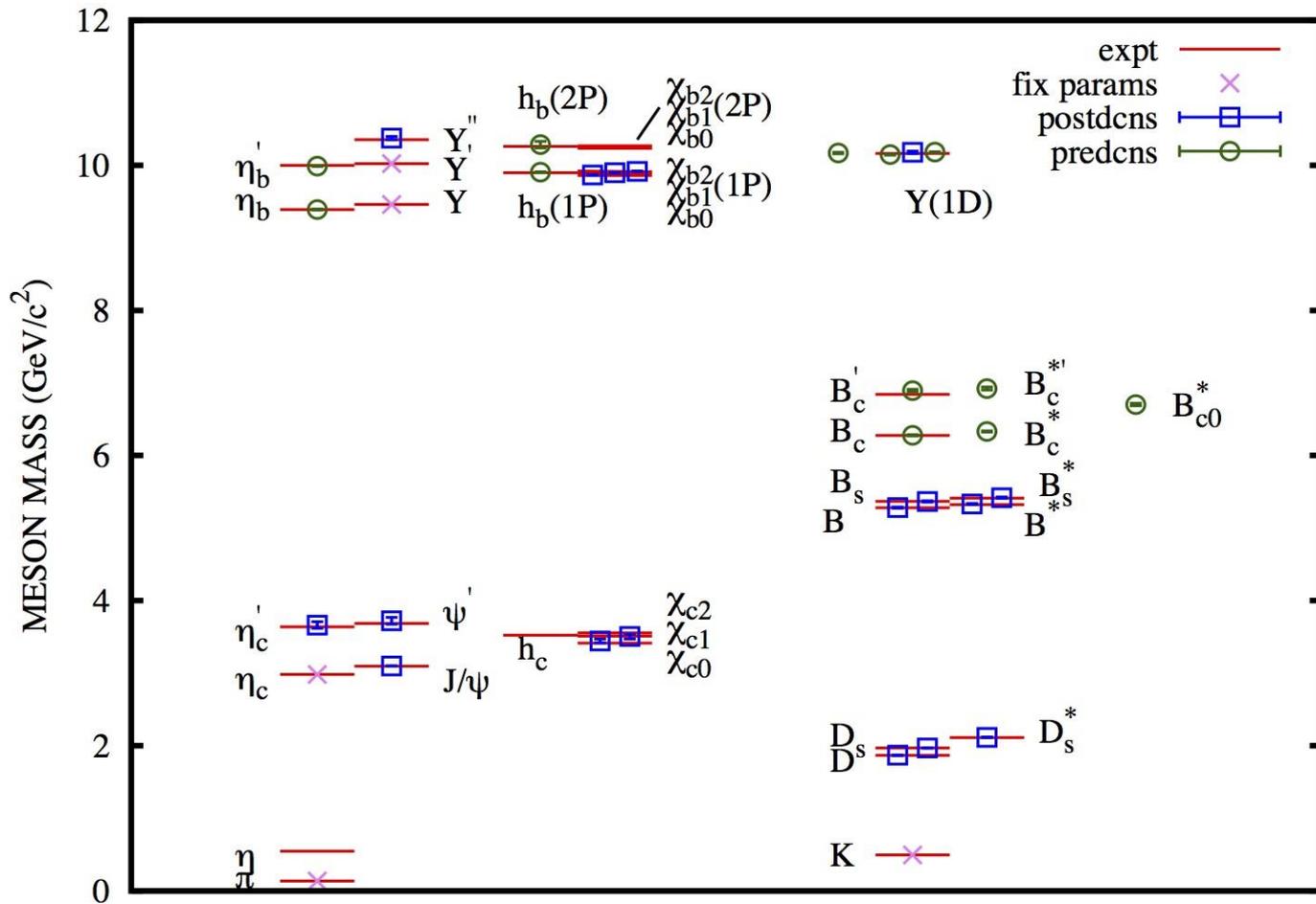
K+中間子

# クォークの重さいろいろ

軽いグループ		アップ	2.3 MeV
		ダウン	4.8 MeV
		ストレンジ	95 MeV
重いグループ		チャーム	1.3 GeV
		ボトム	4.8 GeV
		トップ	173 GeV

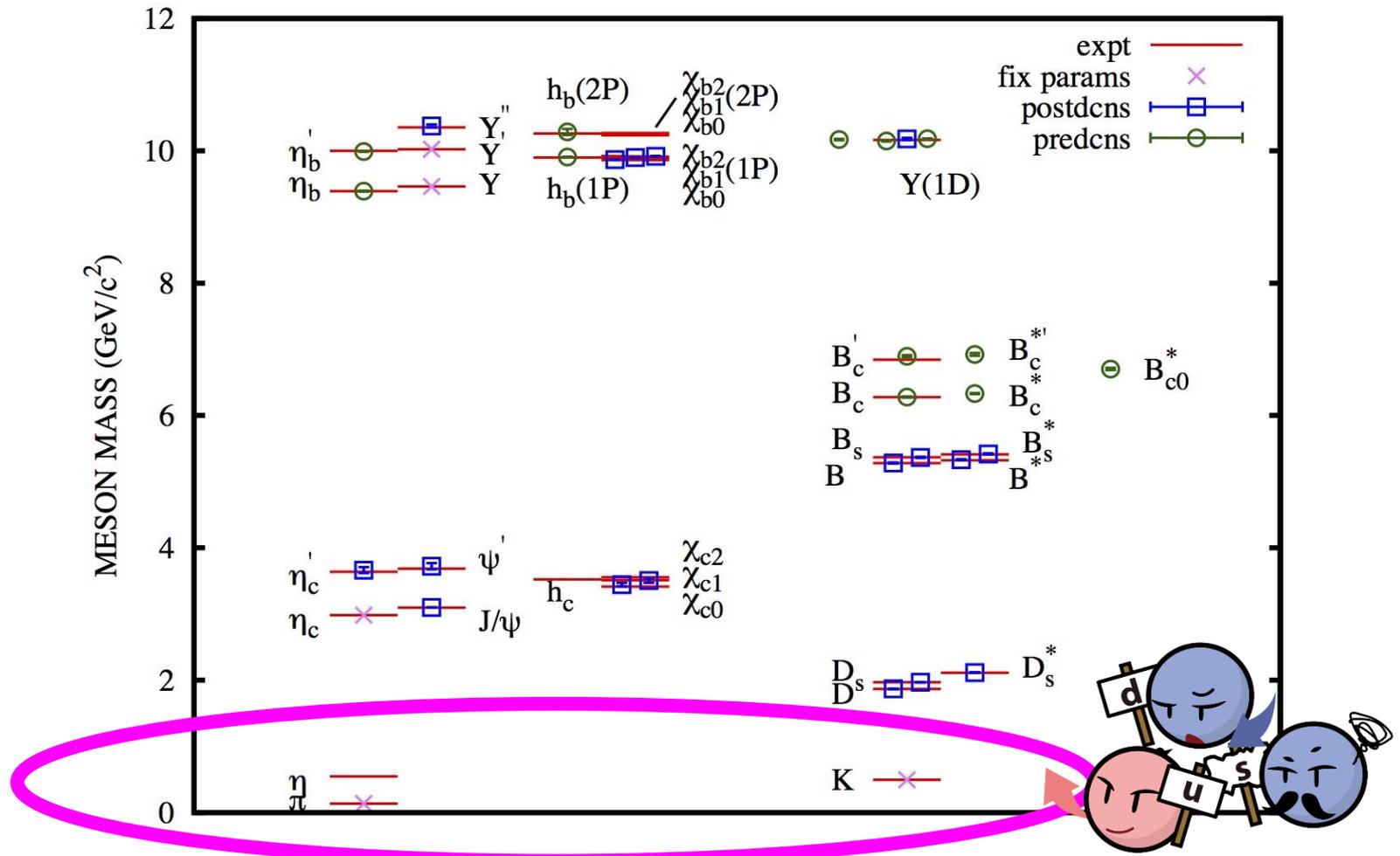
# いろいろなメソン

クォーク1つと、反クォーク1つの組み合わせでできるメソンはたくさんある。



# いろんなメソン

クォーク1つと、反クォーク1つの組み合わせでできるメソンはたくさんある。



軽いクォークたちの組み合わせで作った、  
軽いメソンたち

# 8つの軽いメソン

他に比べて軽い、8つのメソンたち

$\pi^0$		135 MeV
$\pi^+$ $\pi^-$		140 MeV
$K^+$ $K^-$		494 MeV
$K^0$ $\bar{K}^0$		498 MeV
$\eta$		548 MeV

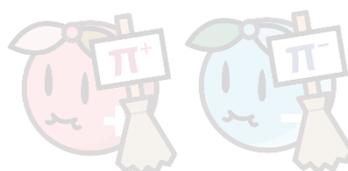
# 8つの軽いメソン

他に比べて軽い、8つのメソンたち

$\pi^0$



$\pi^+$   $\pi^-$



keyword :

- 対称性の自発的破れ
- 南部ゴールドストーンボゾン

$K^0$   $\bar{K}^0$



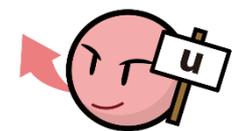
$\eta$



南部陽一郎 (1921-2015)

# 軽いメソンの作り方

メソン : クォーク1つ、反クォーク1つ、でできている

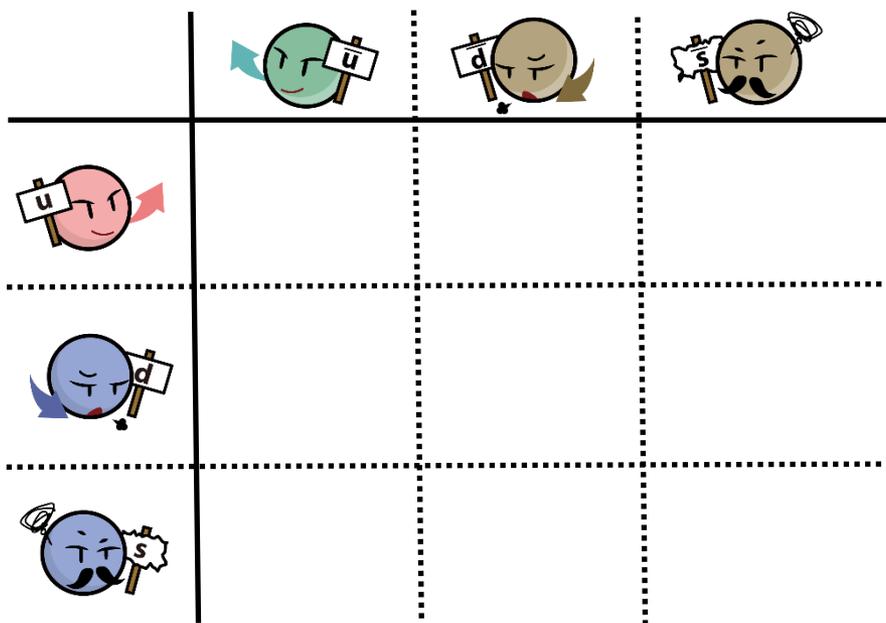
軽いグループ		アップ	2.3 MeV
		ダウン	4.8 MeV
		ストレンジ	95 MeV

軽いメソンを作るには、 $u, d, s$ から1つ、 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ から1つ選ばばよさそう。

# 軽い中間子は9つあるはず？

メソンを作るには、 $u, d, s$ から1つ、 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ から1つ選んでみる。

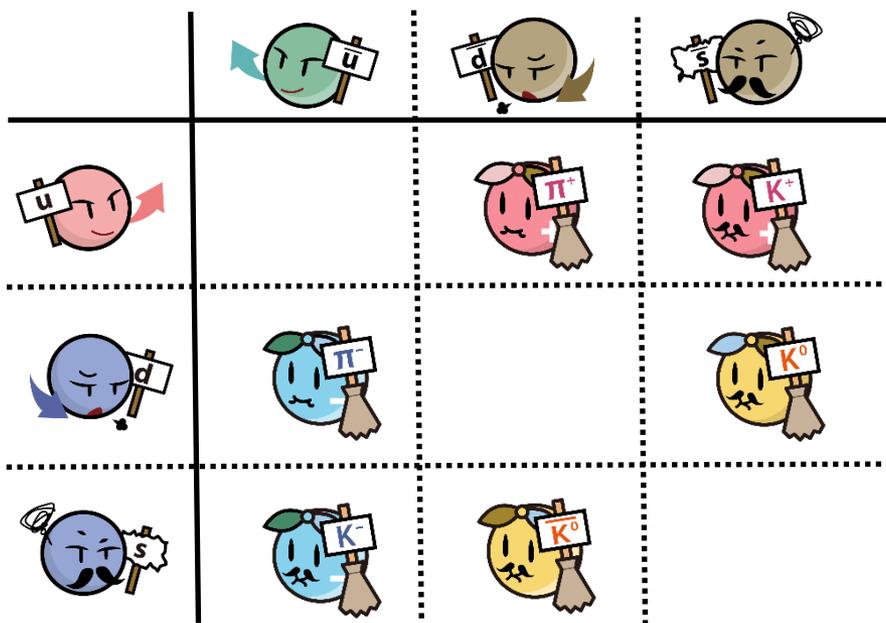
軽い中間子は、 $3 \times 3 = 9$ 通りの組み合わせがあるはず？



# 軽い中間子は9つあるはず？

メソンを作るには、 $u, d, s$ から1つ、 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ から1つ選んでみる。

軽い中間子は、 $3 \times 3 = 9$ 通りの組み合わせがあるはず？



# 軽い中間子は9つあるはず？

メソンを作るには、 $u, d, s$ から1つ、 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ から1つ選んでみる。

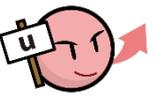
軽い中間子は、 $3 \times 3 = 9$ 通りの組み合わせがあるはず？

			
	$ u\bar{u}\rangle$		
		$ d\bar{d}\rangle$	
			$ s\bar{s}\rangle$

# 軽い中間子は9つあるはず？

メソンを作るには、 $u, d, s$ から1つ、 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ から1つ選んでみる。

軽い中間子は、 $3 \times 3 = 9$ 通りの組み合わせがあるはず？

			
	$ u\bar{u}\rangle$		
		$ d\bar{d}\rangle$	
			$ s\bar{s}\rangle$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u}\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|d\bar{d}\rangle = \text{$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}}|u\bar{u}\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}}|d\bar{d}\rangle - \frac{2}{\sqrt{6}}|s\bar{s}\rangle = \text{$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}}|u\bar{u}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|d\bar{d}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|s\bar{s}\rangle = ???$$

# 9つめの候補??

eta-prime (イータプライム) 中間子

$$\frac{1}{\sqrt{3}}|u\bar{u}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|d\bar{d}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|s\bar{s}\rangle =$$



# 9つめの候補、重たすぎ問題

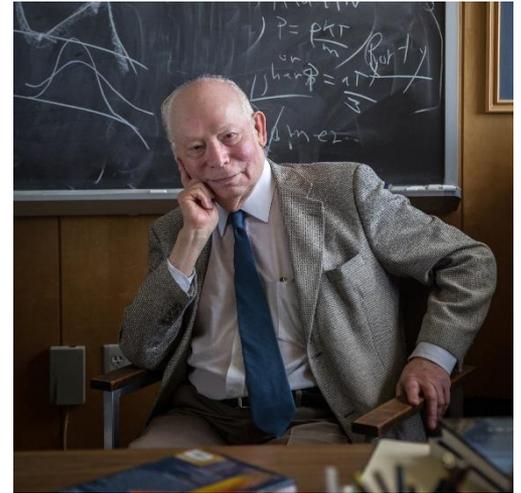
eta-prime (イータプライム) 中間子

$$\frac{1}{\sqrt{3}}|u\bar{u}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|d\bar{d}\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|s\bar{s}\rangle =$$



軽い9つめがもしいるなら、230 MeVより軽いはず

eta-primeの質量は、958 MeV !

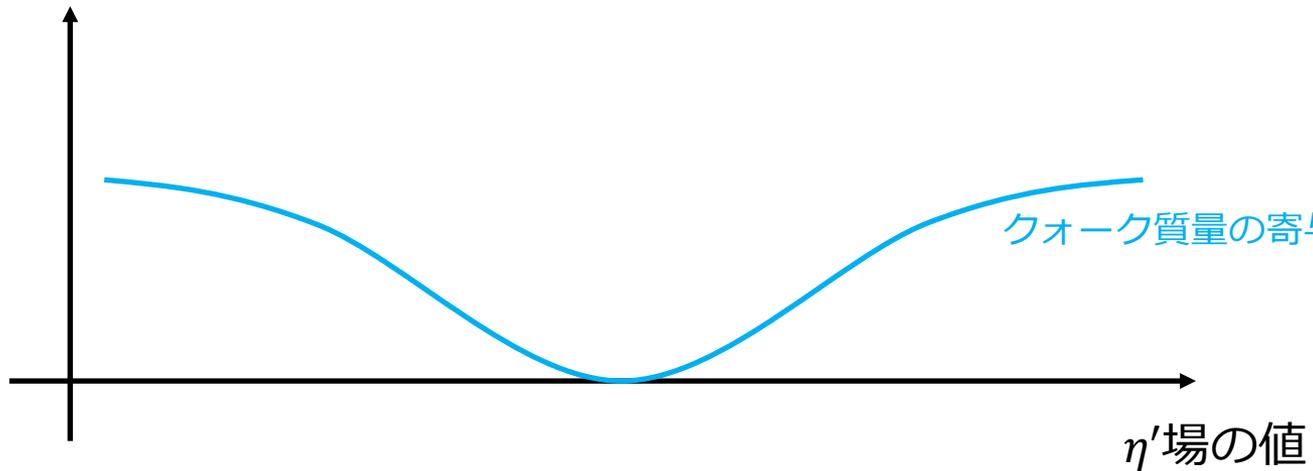


Steven Weinberg (1933-2021)

$\eta'$  problem  
U(1) problem などと呼ばれる

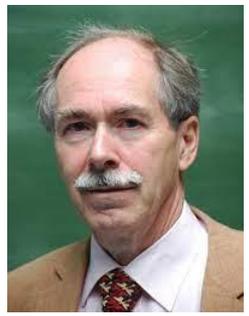
# eta-primeはなぜ重い

ポテンシャル  
エネルギー  $V$



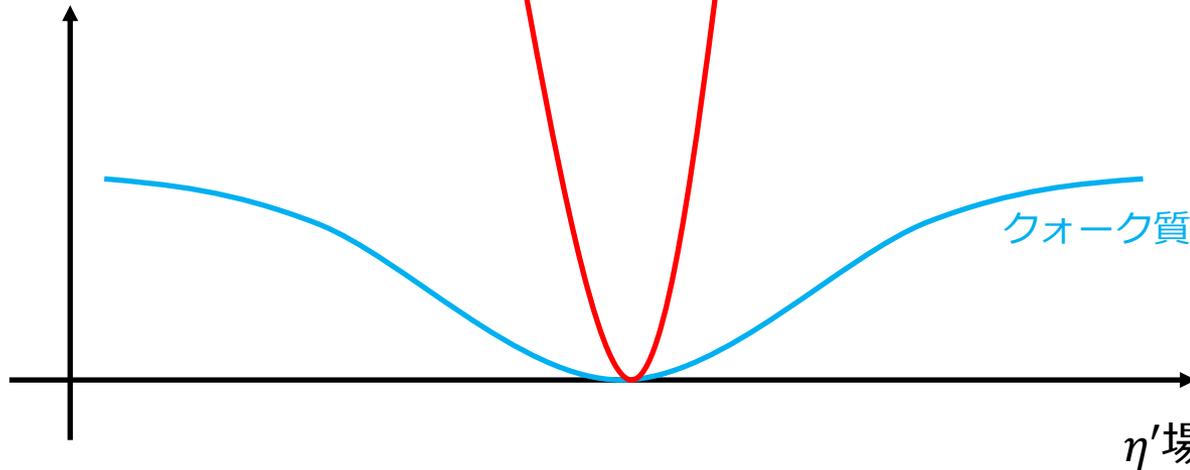
$$m_{\eta'}^2 = \left. \frac{d^2V}{d\eta'^2} \right|_{\text{minimum}}$$

# eta-primeはなぜ重い



Gerald 't Hooft (1946 - )

ポテンシャル  
エネルギー  $V$



$\eta'$ を重くする効果

Keyword :

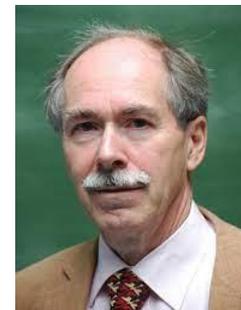
- カイラルアノマリー
- インスタントン



$\eta'$ 場の値

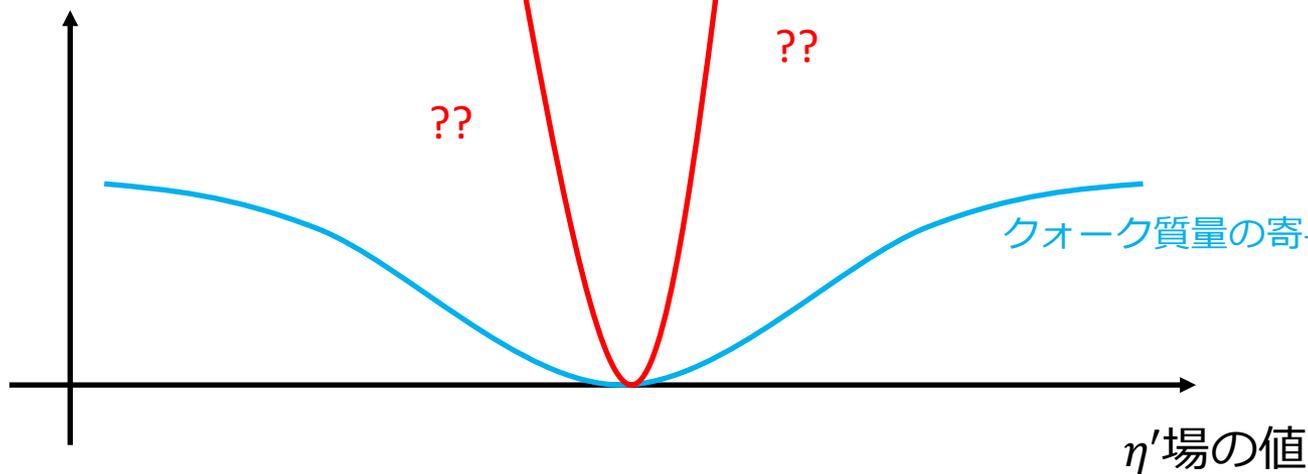
$$m_{\eta'}^2 = \left. \frac{d^2V}{d\eta'^2} \right|_{\text{minimum}}$$

# ポテンシャルのかたち



Gerald 't Hooft (1946 - )

ポテンシャル  
エネルギー  $V$



$\eta'$ を重くする効果

Keyword :

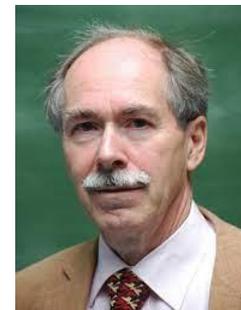
- カイラルアノマリー
- インスタントン

クォーク質量の寄与

$\eta'$ 場の値

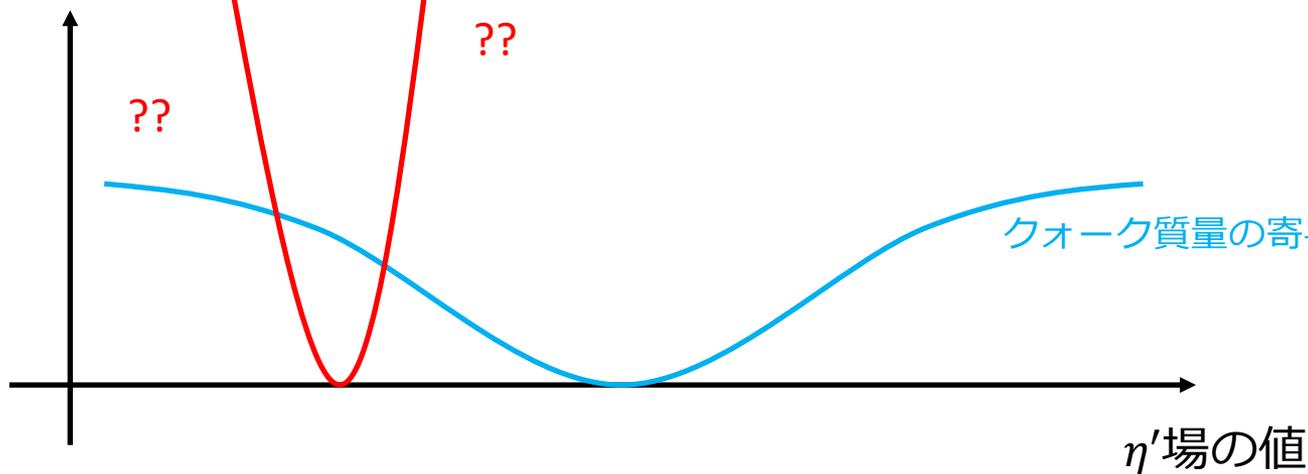
2つの寄与の最小地点が、一致している必然性はない。

# ポテンシャルのかたち



Gerald 't Hooft (1946 - )

ポテンシャル  
エネルギー  $V$



$\eta'$ を重くする効果

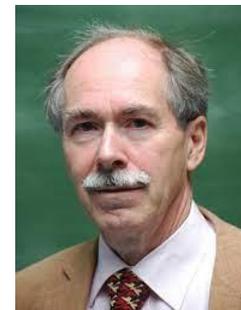
Keyword :

- カイラルアノマリー
- インスタントン

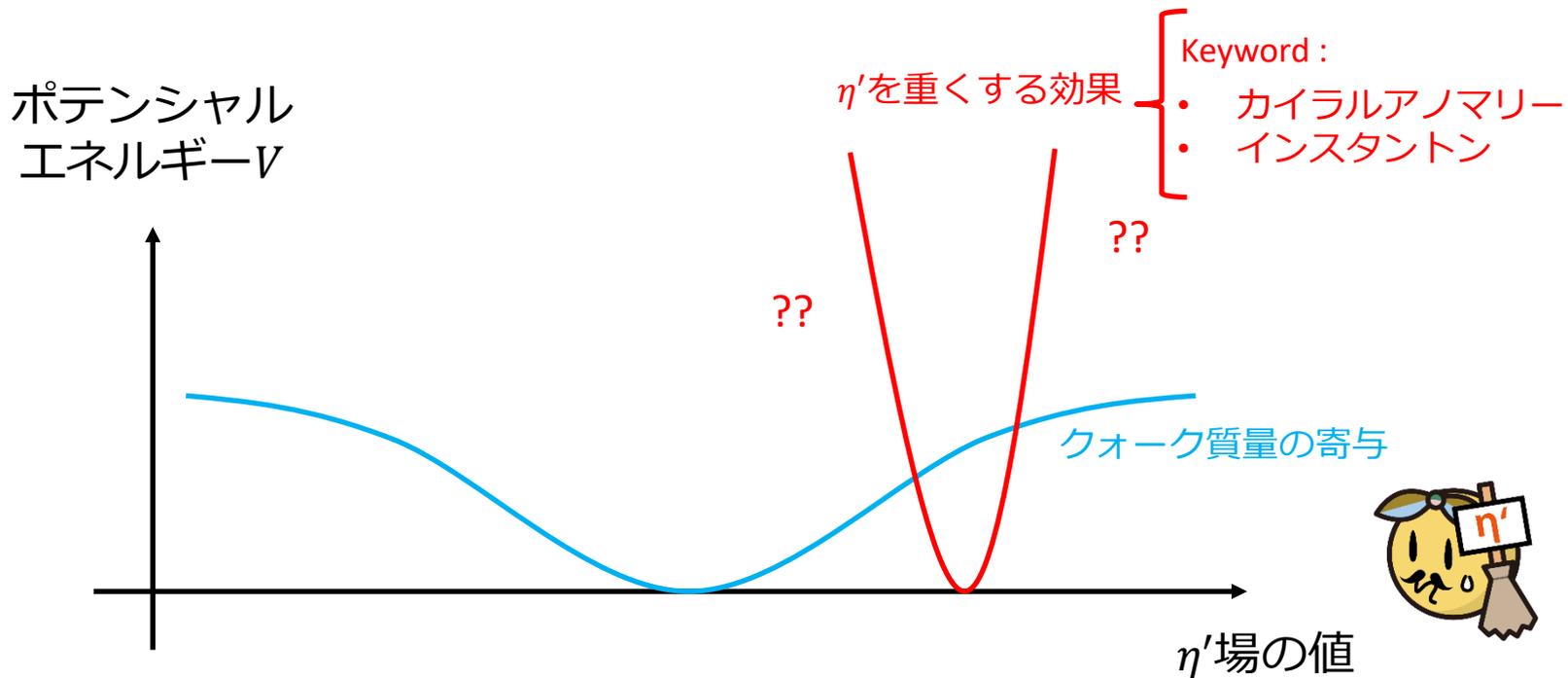


2つの寄与の最小地点が、一致している必然性はない。

# ポテンシャルのかたち



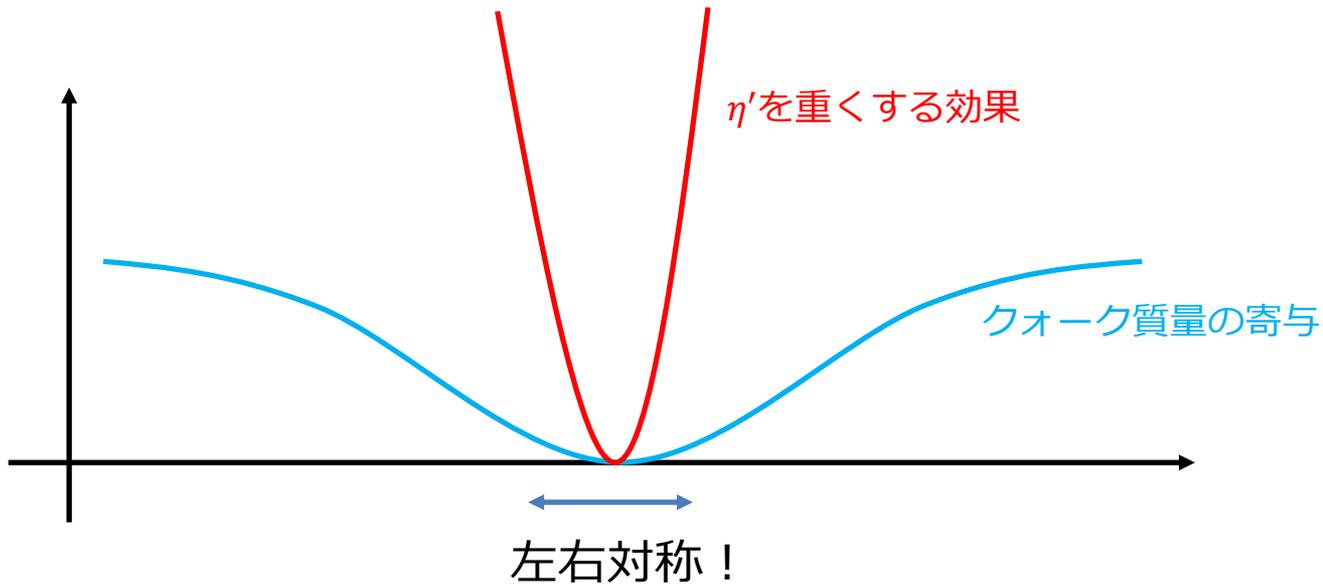
Gerald 't Hooft (1946 - )



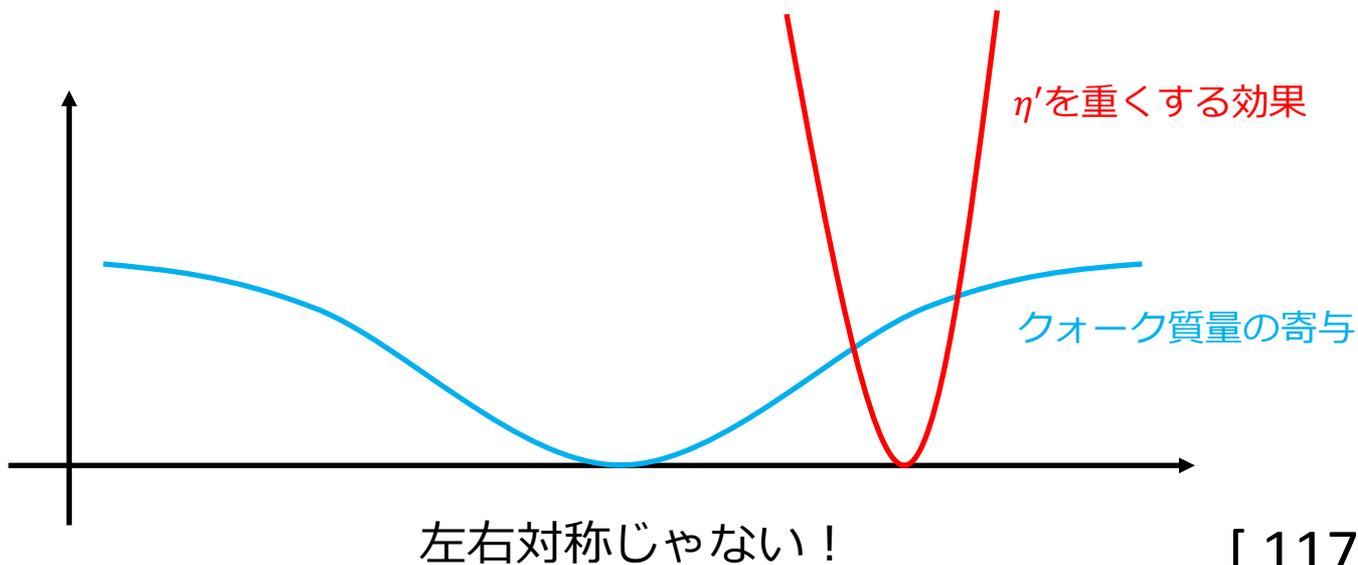
2つの寄与の最小地点が、一致している必然性はない。

# ポテンシャルのかたち

最小地点が一致



最小地点が不一致

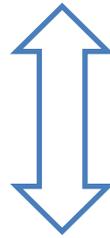


$\eta'$ のポテンシャルが左右対称か、そうでないか

$\eta'$ のポテンシャルが左右対称か、そうでないか

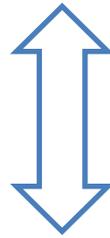
だからなんなの

$\eta'$ のポテンシャルが左右対称か、そうでないか



CP対称性が保たれているか、破れているか

$\eta'$ のポテンシャルが左右対称か、そうでないか



CP対称性が保たれているか、破れているか

...CP対称性って何？

# 対称性ってなに

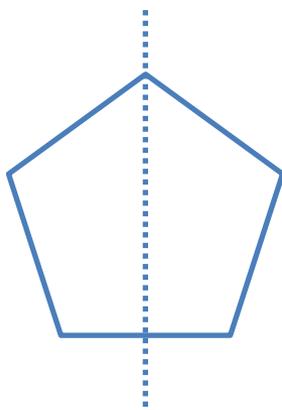
なにか変換しても同じになる

→ 対称性がある

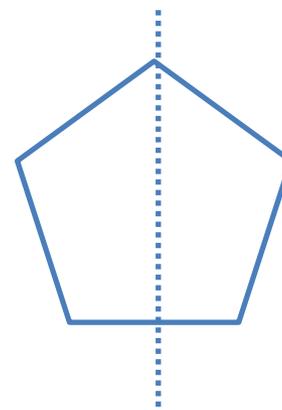
なにか変換したら変わっちゃった

→ 対称性がない (破れている)

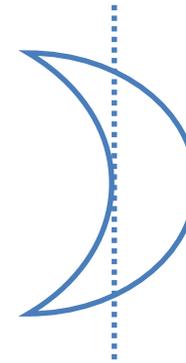
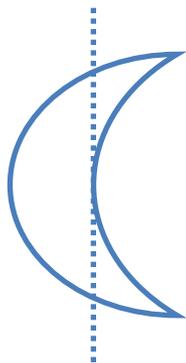
算数で習うやつ (線対称)



左右反転させる変換



線対称



線対称  
じゃない

[ 122 ]

# 対称性ってなに

なにか変換しても同じになる

→ 対称性がある

なにか変換したら変わっちゃった

→ 対称性がない（破れている）

## 物理法則の対称性

例) パリティ変換( $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$ ) = 鏡の中



$$m_1 \ddot{\vec{x}}_1 = Q_1 Q_2 \frac{\vec{x}_1 - \vec{x}_2}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|^3} \quad \longrightarrow \quad m_1 \ddot{\vec{x}}_1 = Q_1 Q_2 \frac{\vec{x}_1 - \vec{x}_2}{|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|^3}$$

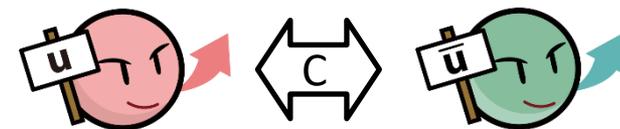
鏡の中でも、クーロンの法則は一緒。

→ クーロンの法則にはパリティ対称性がある

# C変換、P変換

C変換: 粒子を反粒子に変える変換

例: クォーク  $\Leftrightarrow$  反クォーク  
電子  $\Leftrightarrow$  陽電子



アップクォーク

反アップクォーク

P変換:  $(t, \vec{x}) \rightarrow (t, -\vec{x})$

鏡に映すような変換



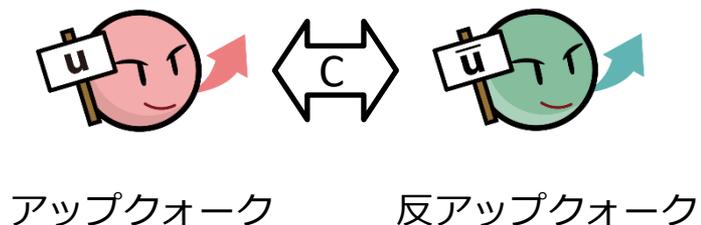
アップクォーク

アップクォーク

# C変換、P変換、そしてCP変換

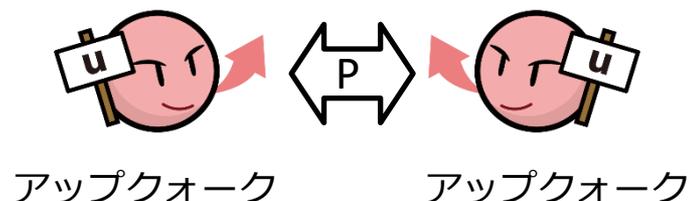
C変換: 粒子を反粒子に変える変換

例: クォーク  $\Leftrightarrow$  反クォーク  
電子  $\Leftrightarrow$  陽電子



P変換:  $(t, \vec{x}) \rightarrow (t, -\vec{x})$

鏡に映すような変換



CP変換: 粒子を反粒子に変え、  
さらに鏡に映す。  $(t, \vec{x}) \rightarrow (t, -\vec{x})$

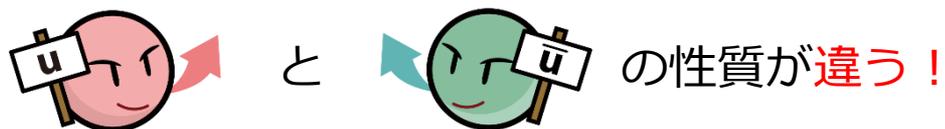


# CP対称性が保たれているか、破れているか

CP対称性が保たれている



CP対称性が破れている

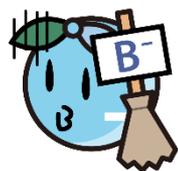


CP変換: 粒子を反粒子に変え、  
さらに鏡に映す。 $(t, \vec{x}) \rightarrow (t, -\vec{x})$



# CP対称性は破れている

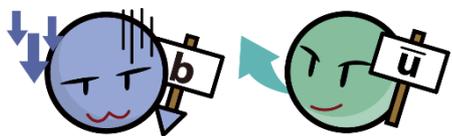
例えば、 $B^+$ 中間子と $B^-$ 中間子を比べると...



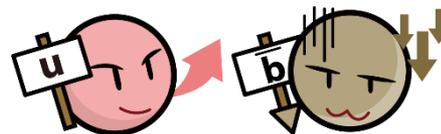
$B^+$ 中間子



$B^-$ 中間子



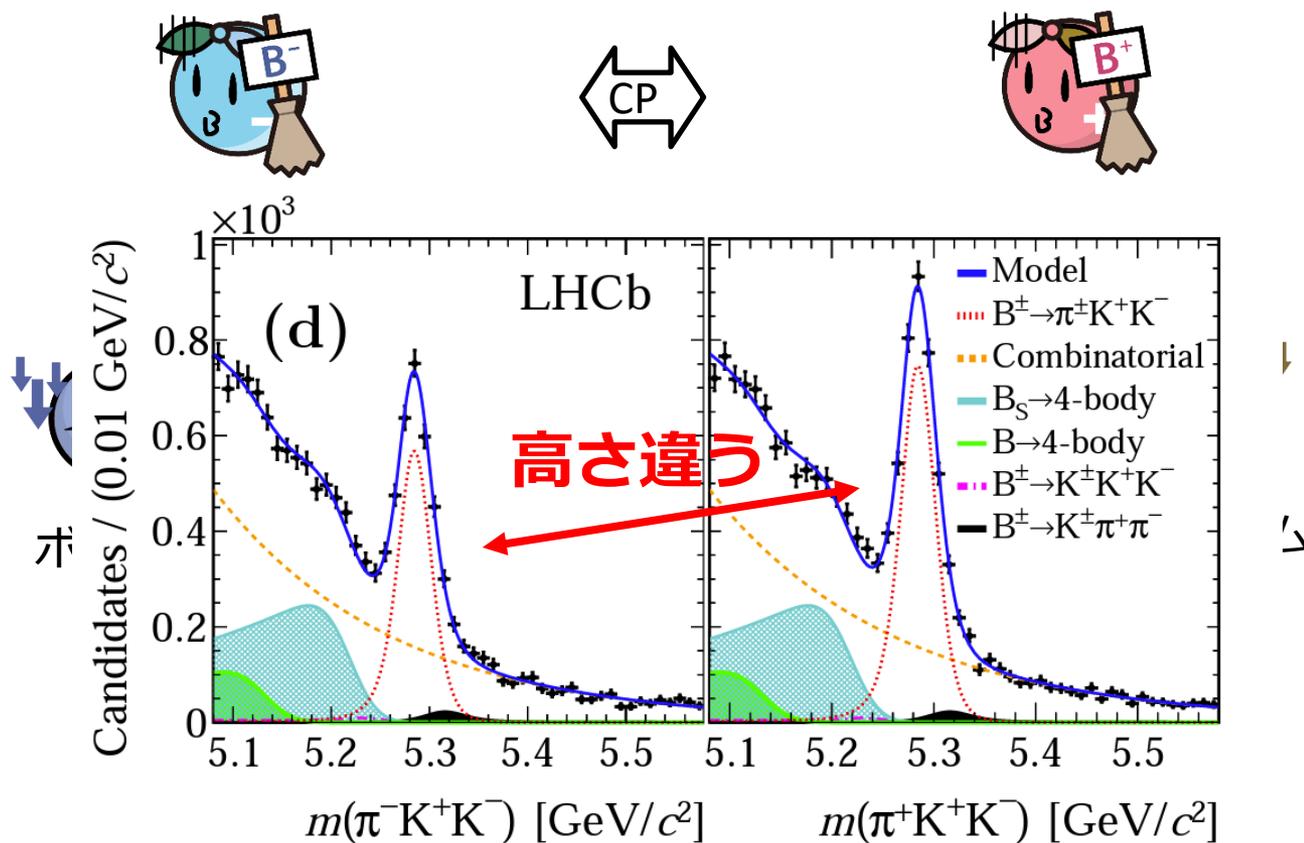
ボトム 反アップ



アップ 反ボトム

# CP対称性は破れている

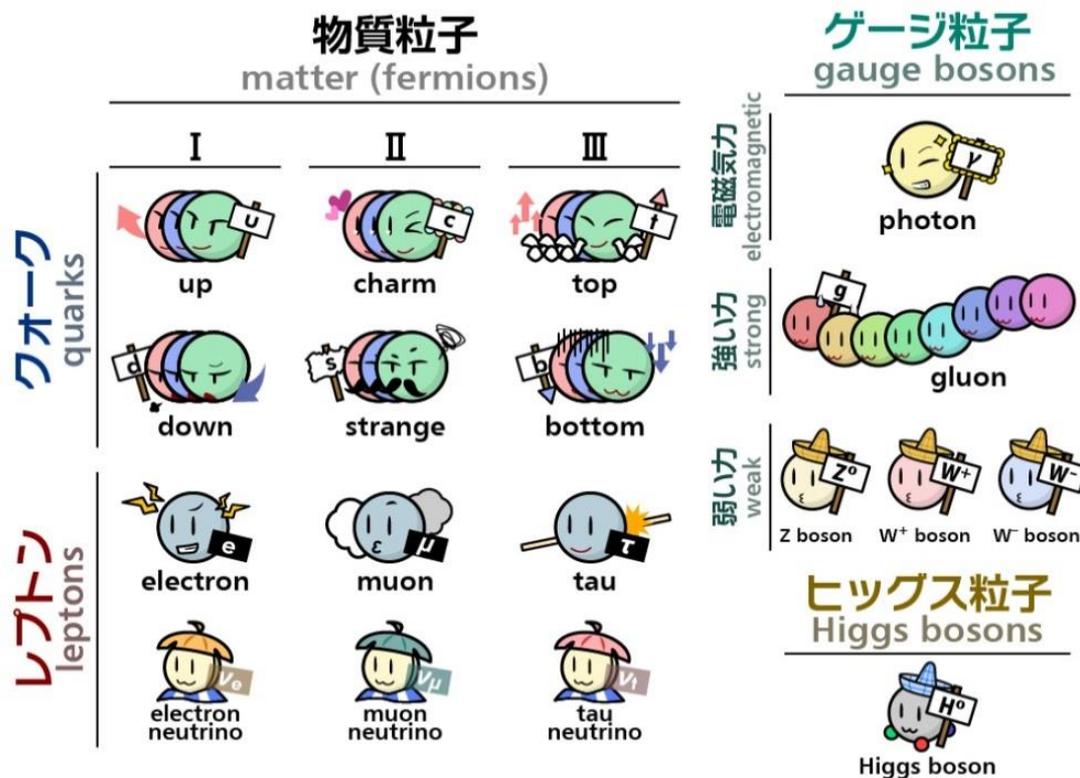
例えば、 $B^+$ 中間子と $B^-$ 中間子を比べると...



[LHCb, arXiv:1408.5373]

# 標準模型ふたたび

標準模型では、CPはどうやって破れるんだろう？



[<http://higgstan.com>]

# 標準模型のCP対称性の破れ

標準模型では、**2種類**の原因がありうる。

1. 弱い相互作用

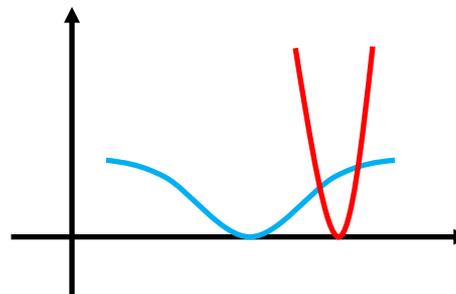


$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

カビボ小林益川行列



2. 強い相互作用



$\eta'$ のポテンシャルが左右対称か否か

# 弱い相互作用



# におけるCPの破れ

3x3の複素ユニタリ行列

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

雑に言うと、この行列に**複素数**が入っているとCP破れてる



Nicola Cabibbo (1935 – 2010)



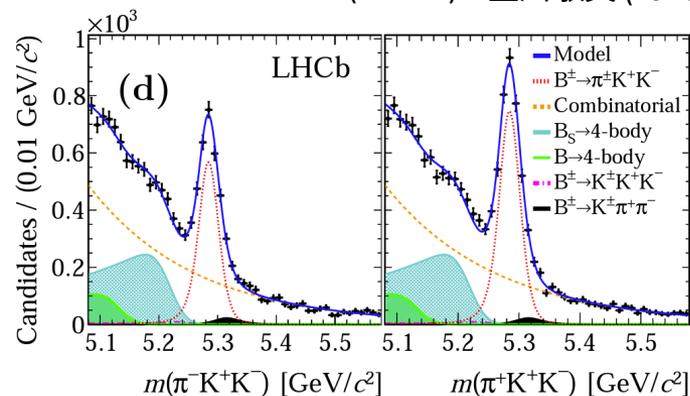
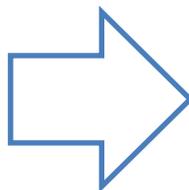
小林誠 (1944 - ) 益川敏英 (1940 - 2021)

$B^-$ と $B^+$ の違い



$B^+$ 中間子

$B^-$ 中間子



複素位相入っている = CP破れてる

# 強い相互作用

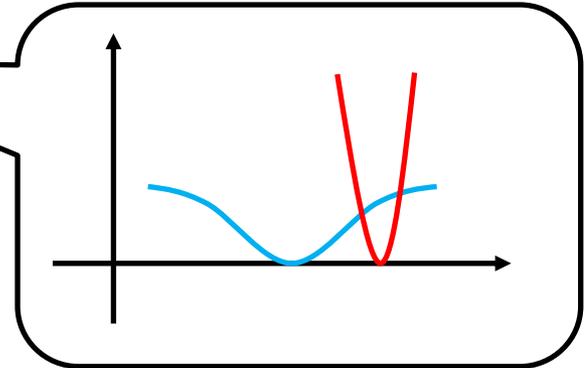
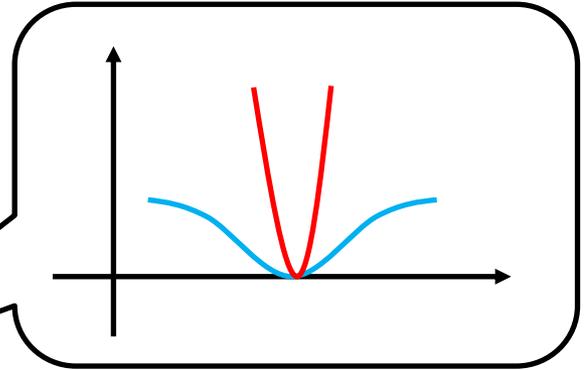


# におけるCPの破れ

$\eta'$ に対するCP変換 :  $\eta' \rightarrow -\eta'$

CP対称性がある =  $V(\eta') = V(-\eta')$

CP対称性がない =  $V(\eta') \neq V(-\eta')$



$\eta'$ のポテンシャルが左右非対称 = 強い相互作用でCPが破れている

実験的には、少なくとも $10^{-10}$ くらいの精度で左右対称になっている！  
ほぼほぼCP守っているっぽい。

# 強いCP問題 (strong CP problem)

標準模型には、CP対称性の破れの源が2つある。

- 弱い相互作用 (カビボ小林益川行列)

**ガッツリ破れてる**

- 強い相互作用 ( $\eta'$ のポテンシャルの形が左右対称かどうか)

**破ってないっぽい**

どっちもCP対称性破ってるなら自然なんだけど...。  
どっちもCP対称性守ってるならまだ自然だったかも。

かたっぽはCP守って、もうかたっぽはCP破ってる...。  
**裏になにかあるのでは???**

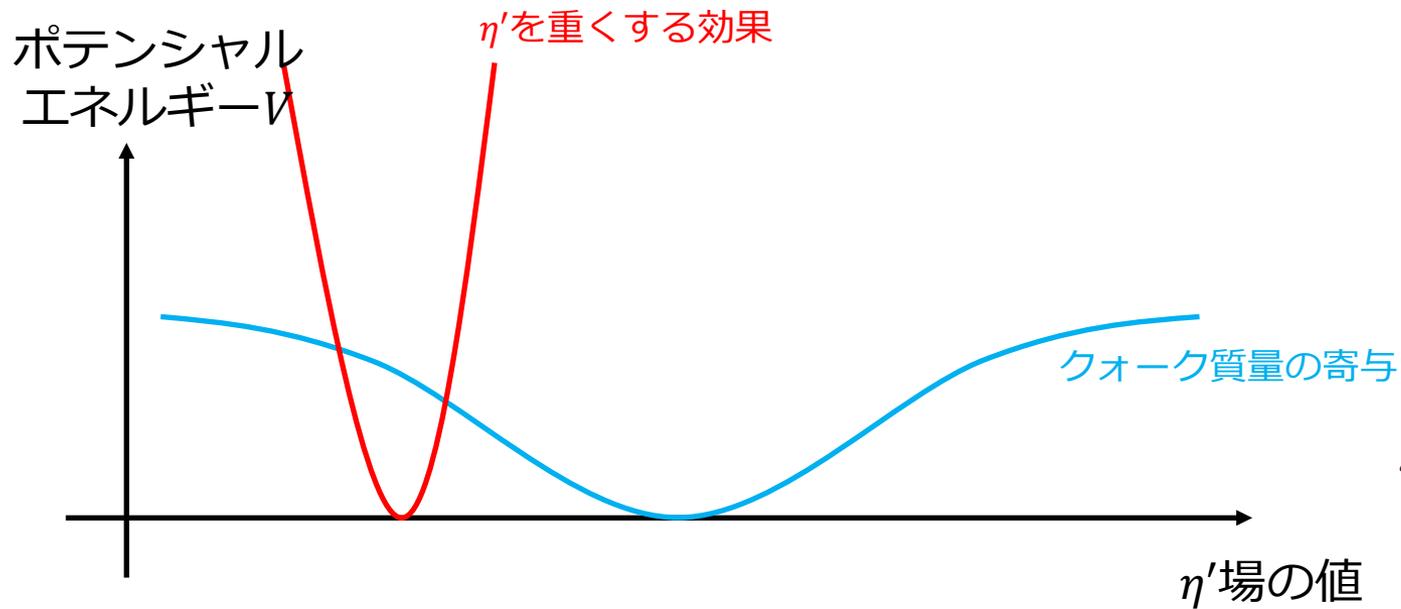
# 予定

1. 素粒子ってなに
2. 素粒子の理論のための道具
3. 標準模型ってどんなもの
4. 強いCP問題ってなに
5. アクシオン

1. 強い\CP問題
2. 強い\CP問題の解決に向けて

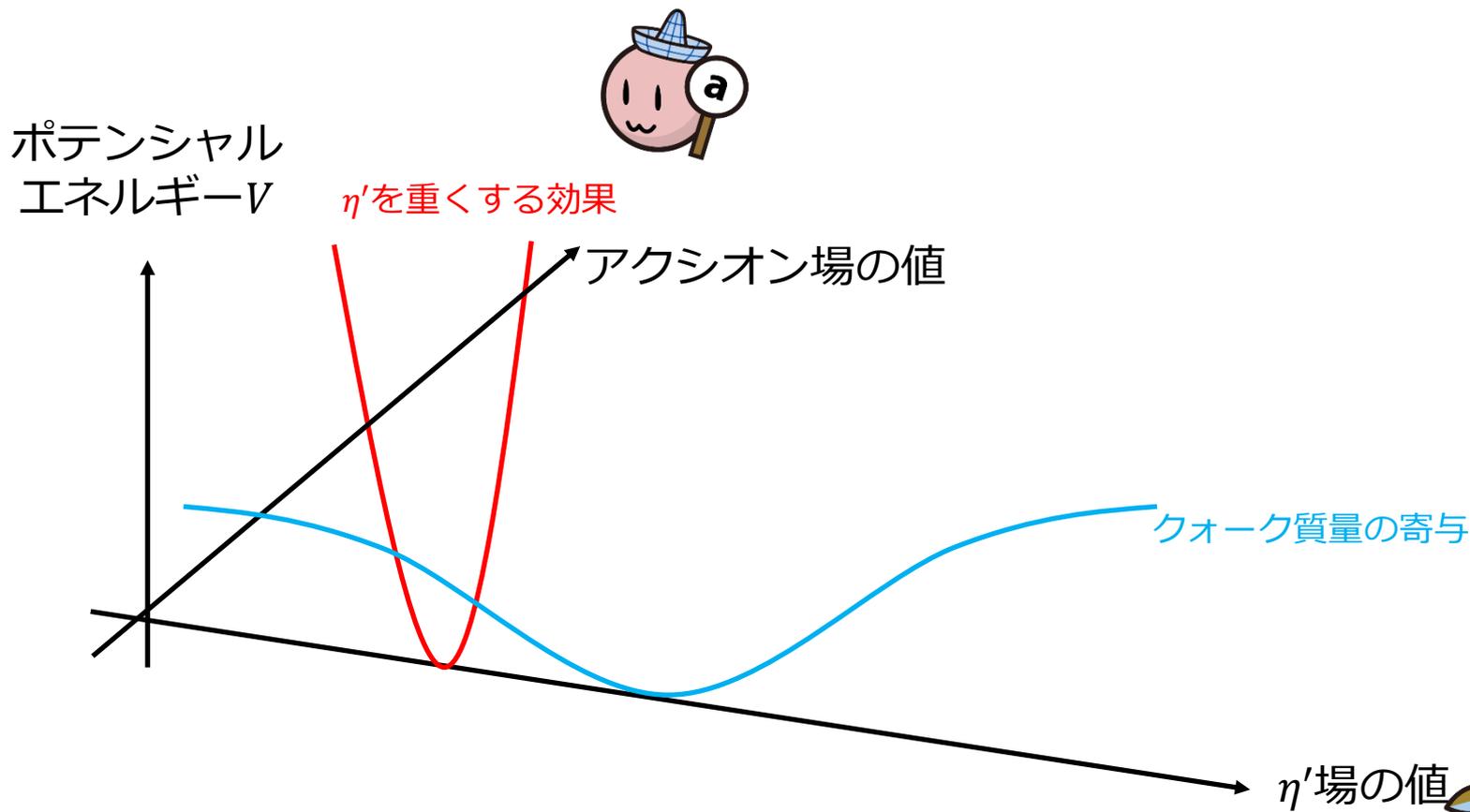
# アクシオン(axion)

こいつが左右対称 (CPがある) になるかどうかの問題。



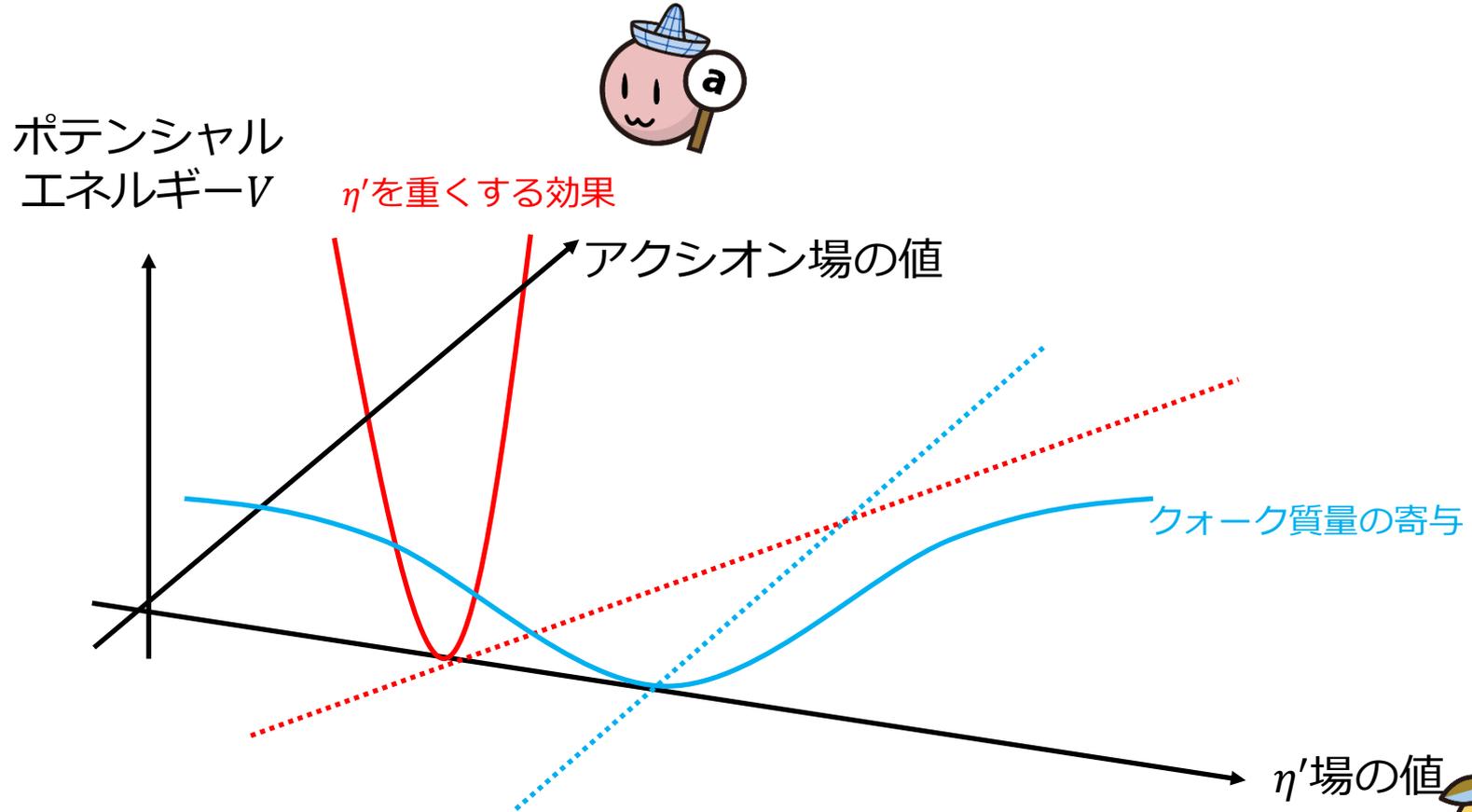
# アクシオン(axion)

こいつが左右対称 (CPがある) になるかどうかの問題。  
奥にいけるようにしてみた。



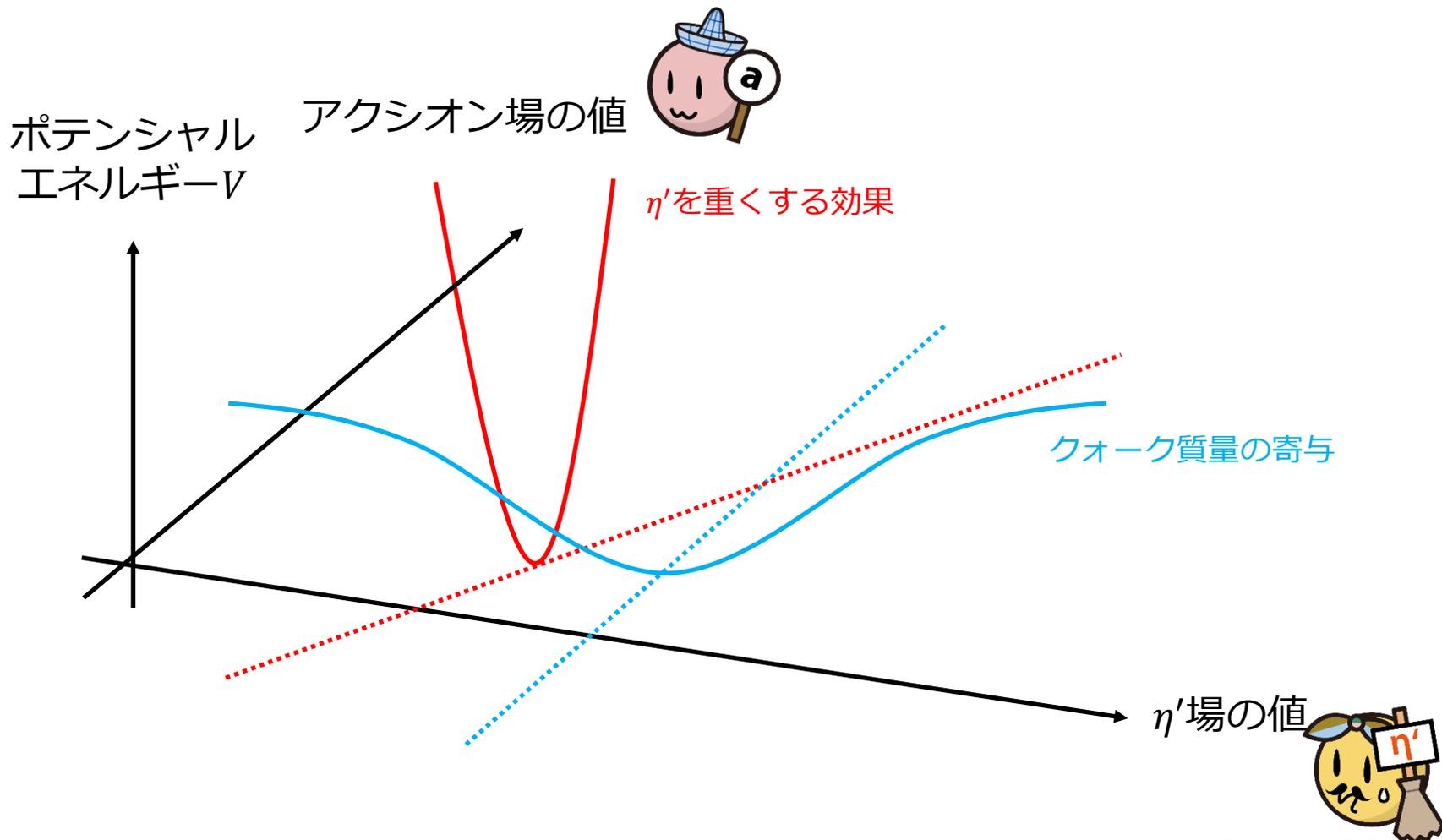
# アクシオン(axion)

こいつが左右対称 (CPがある) になるかどうかの問題。  
奥にいけるようにしてみた。すると...



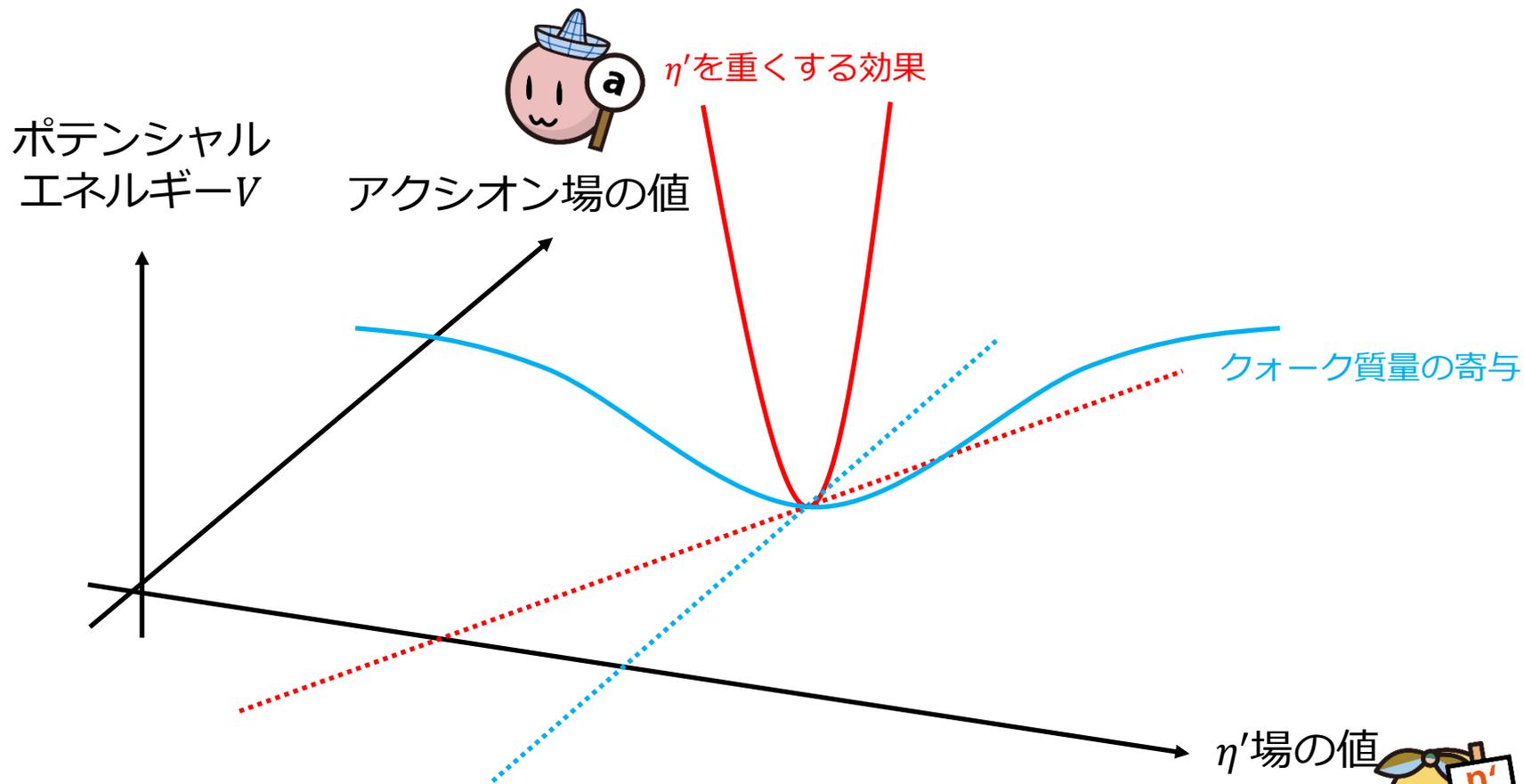
# アクシオン(axion)

こいつが左右対称 (CPがある) になるかどうかの問題。  
奥にいけるようにしてみた。すると...



# アクシオン(axion)

こいつが左右対称 (CPがある) になるかどうかの問題。  
奥にいけるようにしてみた。すると...左右対称 (CPがある) な場所に落ち着く！



axion

# アクシオン

標準模型にはいなかった、新粒子...



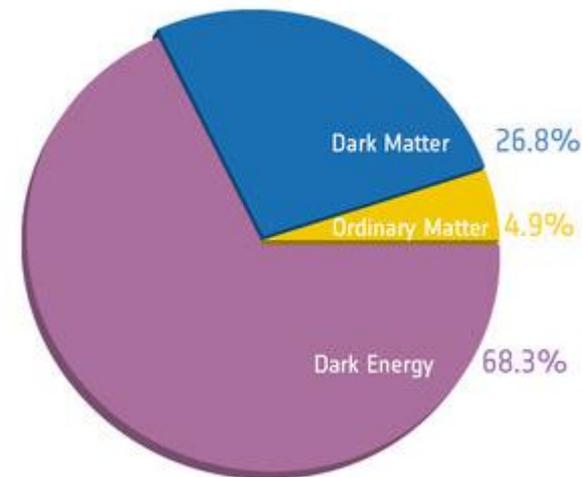
- スピン0
- 電荷を持たない中性粒子
- むっちゃ軽い
- 安定
- 他の粒子との相互作用がよわよわ
- 強いCP問題を解決する
  
- 2023年5月現在、未発見。

# アクションは暗黒物質かも？

宇宙のエネルギーのうち、約5%が普通の物質。

残りの約27% : ダークマター = なんかよく分からん謎の物質

残りの約68% : ダークエネルギー = なんかよく分からん謎のエネルギー



[Planck collaboration]

# ALP : Axion-like particle

Axion field :  $\phi$

- Shift symmetry (NG boson) +  $\phi G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$ -type coupling w/ gauge fields

$$\phi \rightarrow \phi + \delta\phi$$

$$\frac{1}{f} \phi G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

Photon,  
Gluon,  
Hidden gauge bosons.,  
...



- Shift symmetry breaking by strong dynamics

$$V(\phi) = \Lambda_b^4 \cos \frac{\phi}{f}$$

Axion-like particle

- **Light and stable** spin-0 particle is predicted from  $\Lambda_b \ll f$ .

ALP mass  $m_a = \sqrt{V''} = \frac{\Lambda_b^2}{f}$

ALP lifetime  $\tau_a \propto \frac{f^2}{m_a^3} = \frac{f^5}{\Lambda_b^6}$

# ex) Axion (-like) particle DM scenario

- Misalignment mechanism

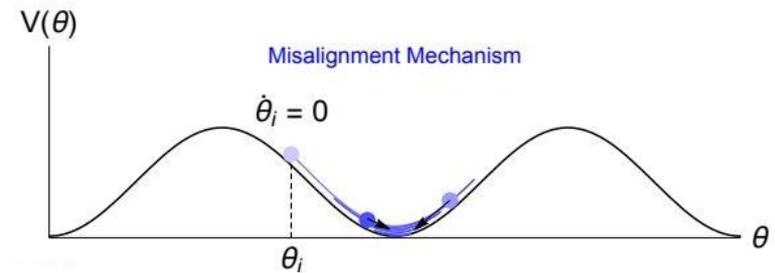
[Preskill, Wise, Wilczek (1983)]

[Abbott, Sikivie (1983)]

[Dine, Fischler (1983)]

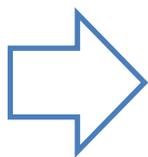
Initial condition  $\phi = \phi_0 \neq 0$   
 $\dot{\phi} = 0$

EOM  $\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\Lambda_b^4(T)}{f} \sin \frac{\phi}{f} = 0$



[taken from Co, Hall, Harigaya (2019)]

The axion starts to oscillate when  $3H(T) \sim m(T)$



$$\rho_{DM} \sim m_a \times \left( \frac{a(T_{osc})}{a_0} \right)^3 \times \frac{\Lambda_b(T_{osc})^4 \theta_i^2}{m_a(T_{osc})}$$

w/  $m_a(T_{osc}) \sim 3H(T_{osc})$

mass

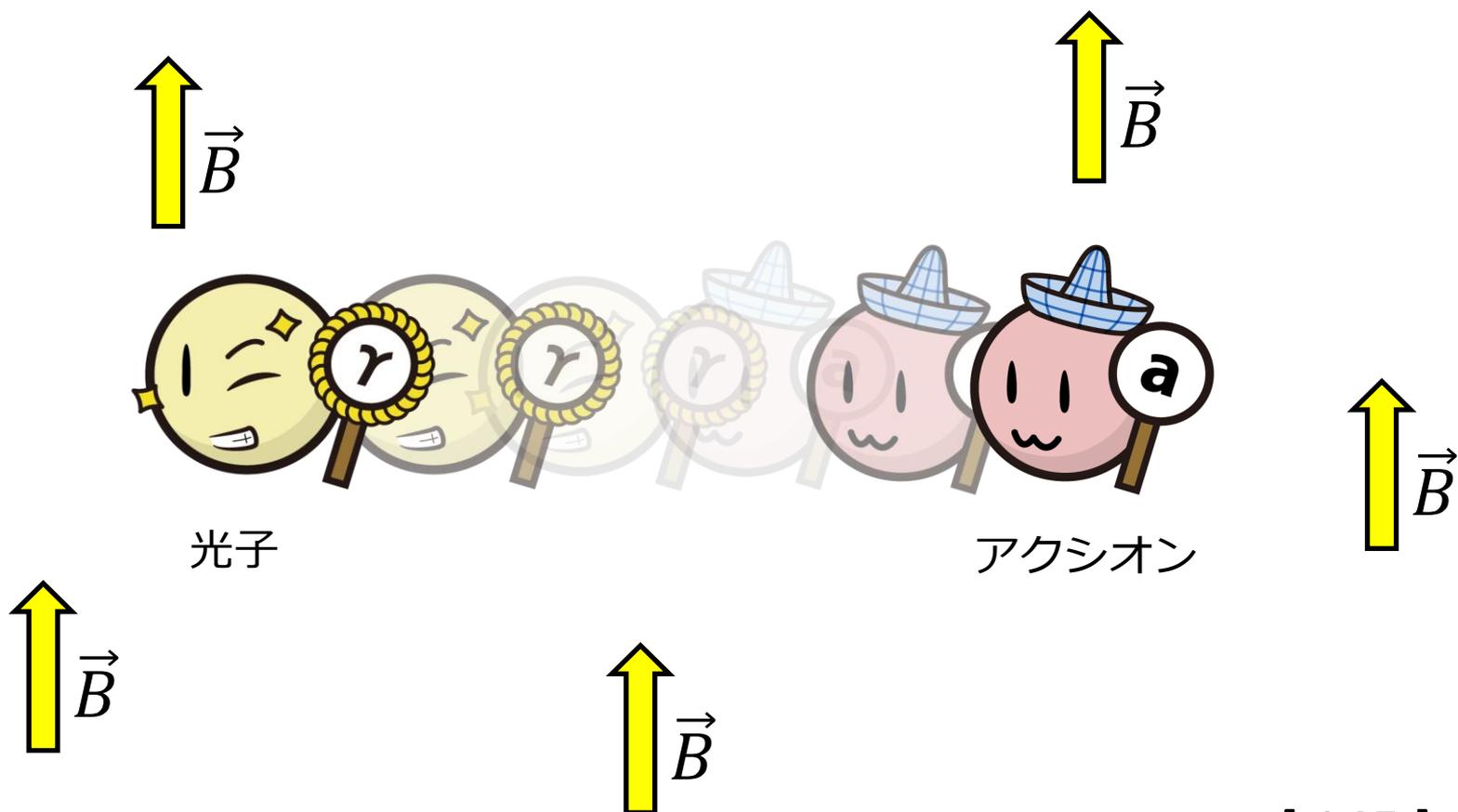
Dilution factor

Number density at  $T = T_{osc}$

# アクションの探し方

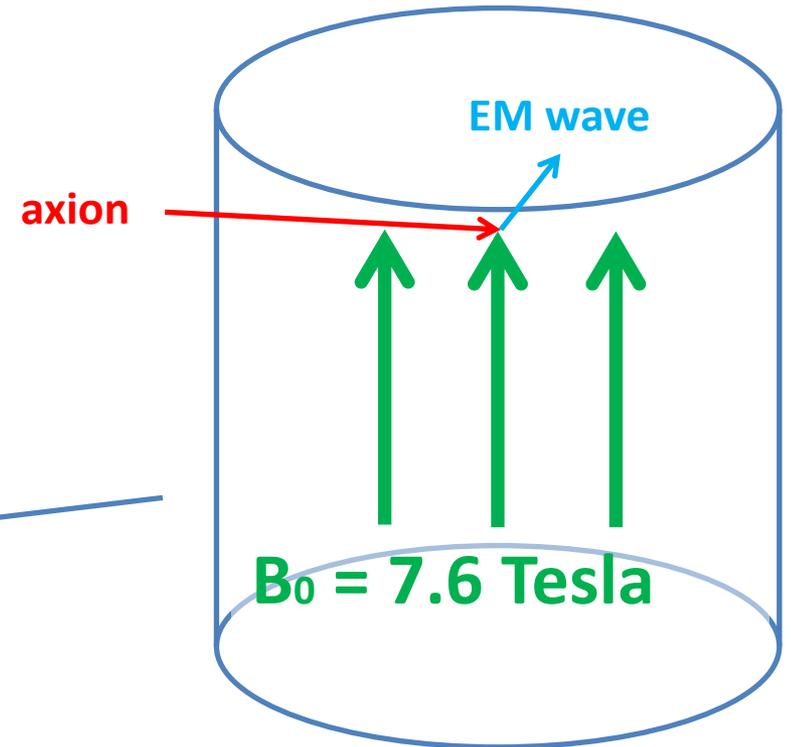
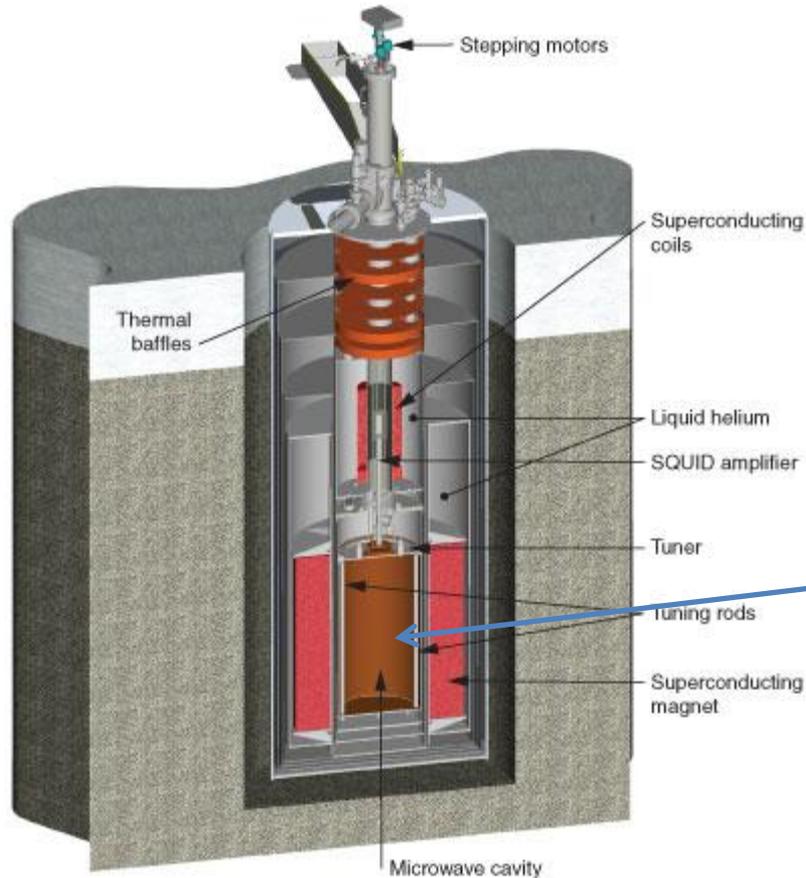
電磁場（もしくは光子）との相互作用が大事

磁場をかけると、**アクション**は**光子**に化けたり、なんて不思議なことも。



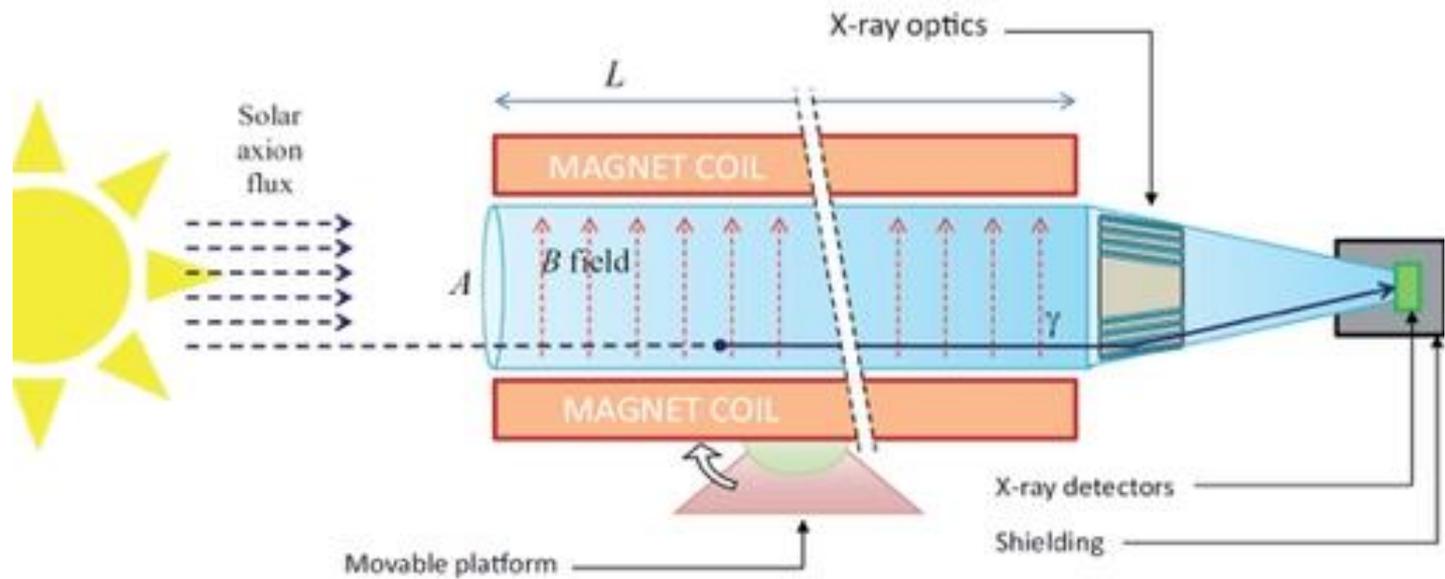
# 磁場に突っ込んできたアクシオンを探せ1

## ADMX実験



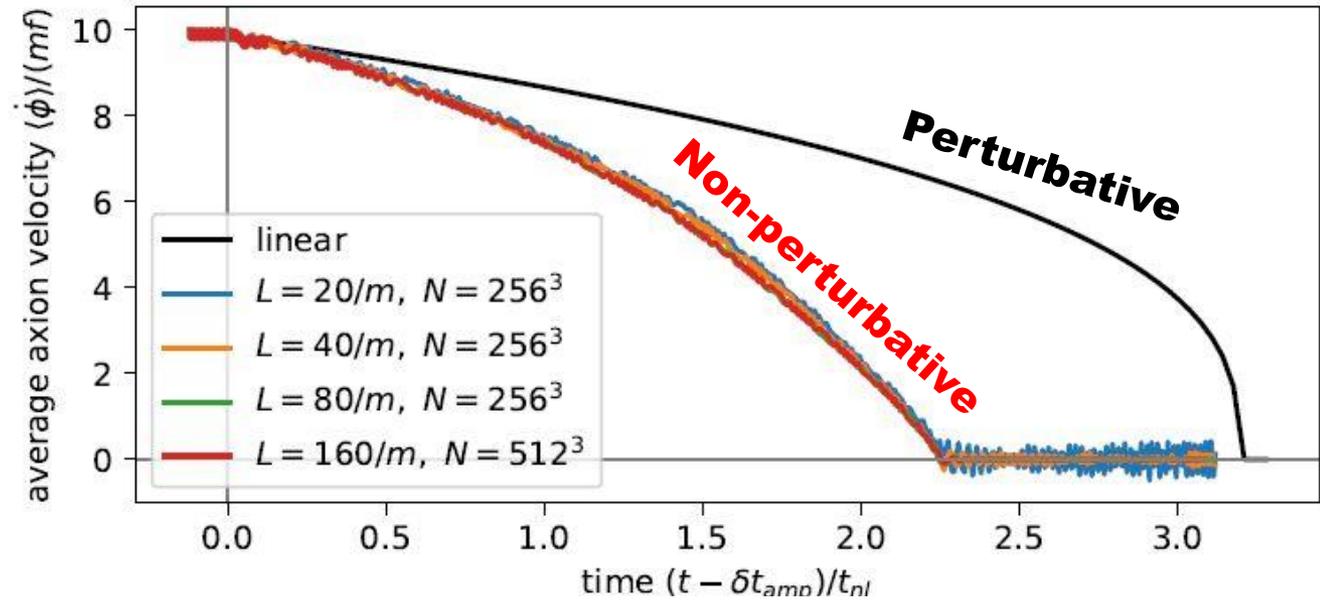
# 磁場に突っ込んできたアクシオンを探せ2

IAXO実験など：太陽の中心部でできたアクシオンが地球に飛んでくるかも？

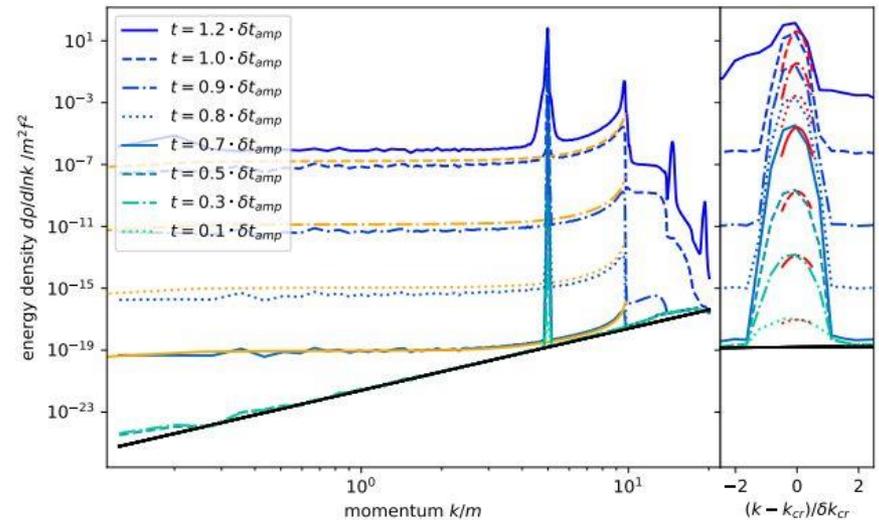


[[https://alps.desy.de/our\\_activities/axion\\_wisp\\_experiments/iaxo/](https://alps.desy.de/our_activities/axion_wisp_experiments/iaxo/)]

# いろいろなアクシオン暗黒物質シナリオ



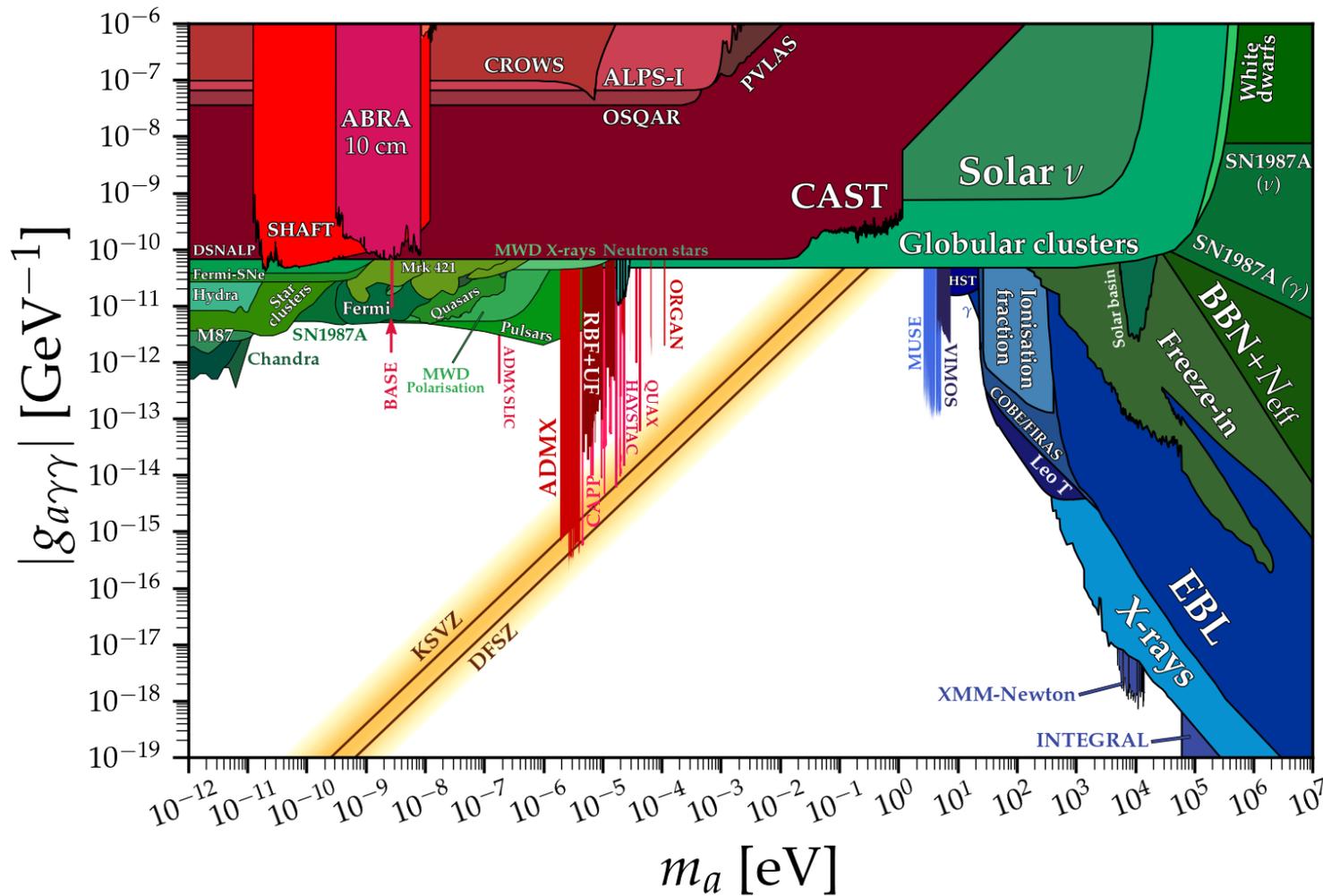
数値計算による  
アクシオンのダイナミクス



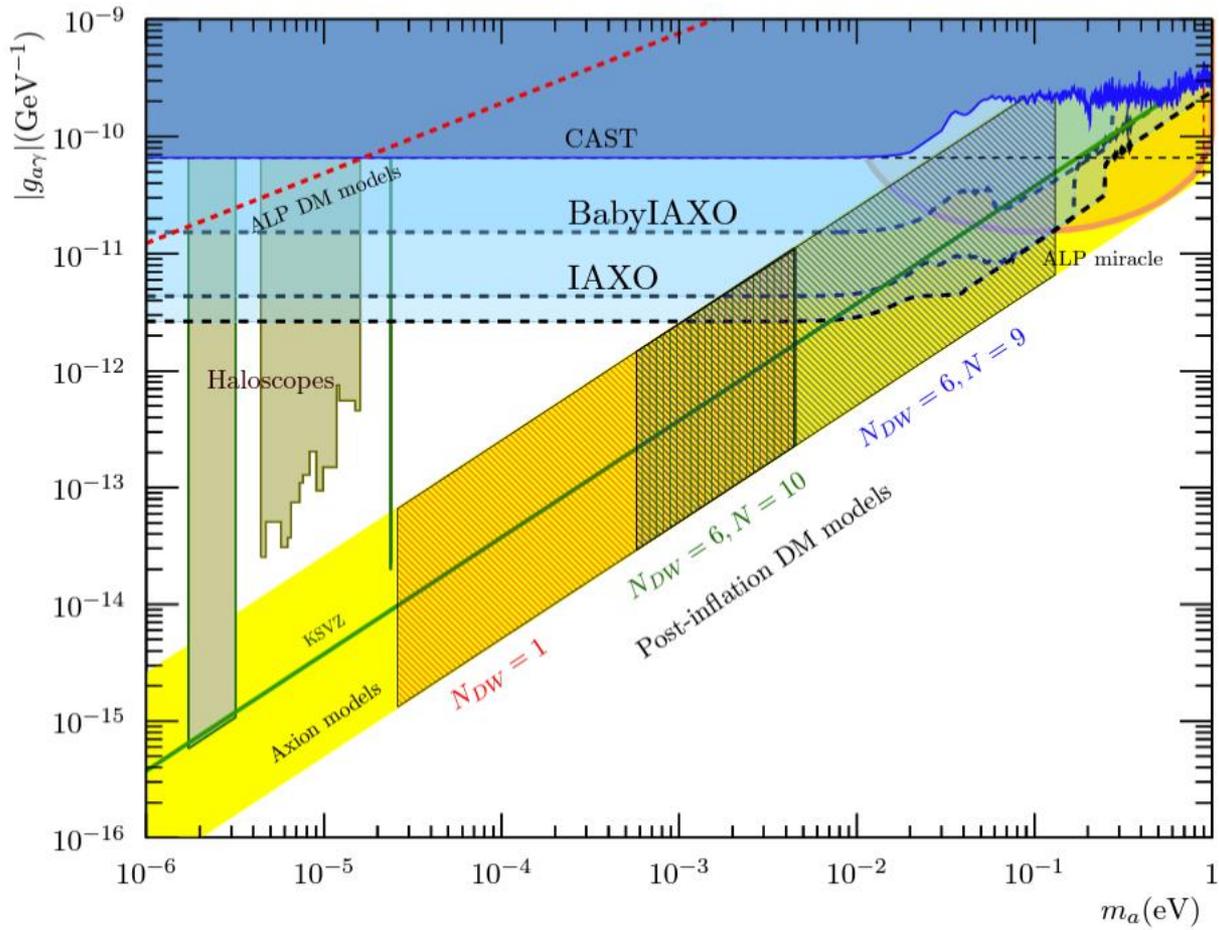
# まとめ

- 強いCP問題は標準模型の未解決問題のひとつ
- アクシオンは強いCP問題を解決する有力候補
- アクシオンは暗黒物質かもしれない？
- アクシオンを探す面白い試みはほかにもいろいろ
- 理論的にも面白いことがたくさん

Backup



[<https://github.com/cajohare/AxionLimits>]



[1904.09155]

# 小林益川行列のパラメーターの数

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

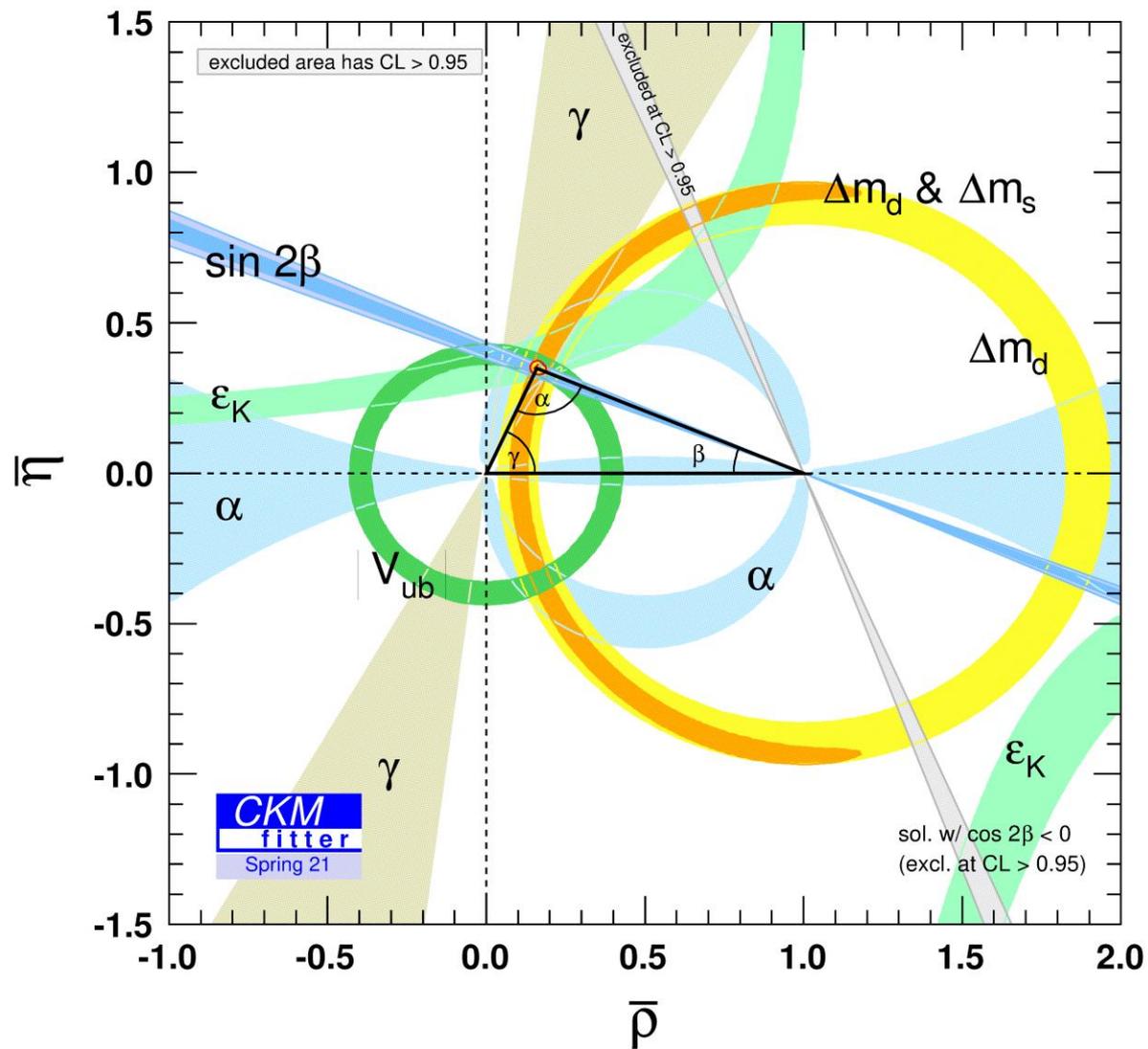
3行3列複素ユニタリ行列のパラメーターの数 : 9

$$\begin{pmatrix} e^{i\theta_u} & & \\ & e^{i\theta_c} & \\ & & e^{i\theta_t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\theta_d} & & \\ & e^{-i\theta_s} & \\ & & e^{-i\theta_t} \end{pmatrix}$$

位相の再定義で消せるパラメーターの数 :  $6 - 1 = 5$

残った物理的に意味のあるパラメーターの数 :  $9 - (6 - 1) = 4$

# 標準模型すごすぎてヤバイ



[CKM fitter]