

# この世界は何でできている？ ～素粒子物理学入門～

京都大学  
基礎物理学研究所

菅野 颯人



**YITP**  
YUKAWA INSTITUTE FOR  
THEORETICAL PHYSICS

## 素粒子とは？

ざっくりいうと、

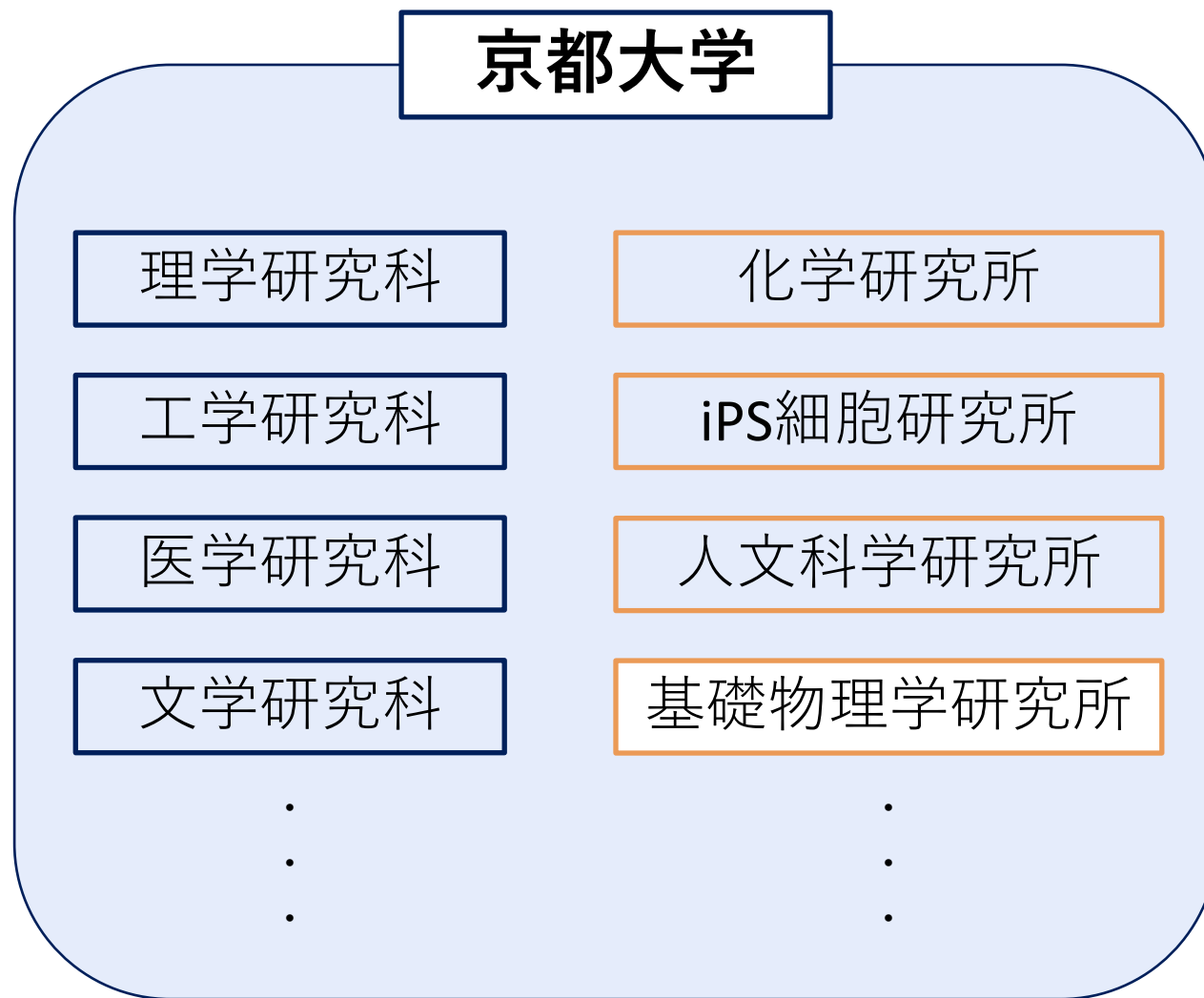
この世界の全てを記述する理論が書ける？

っていうお話です。

# はじめに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (25歳)
- 京都大学 理学研究科 博士2年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論



# はじめに、自己紹介 (1)

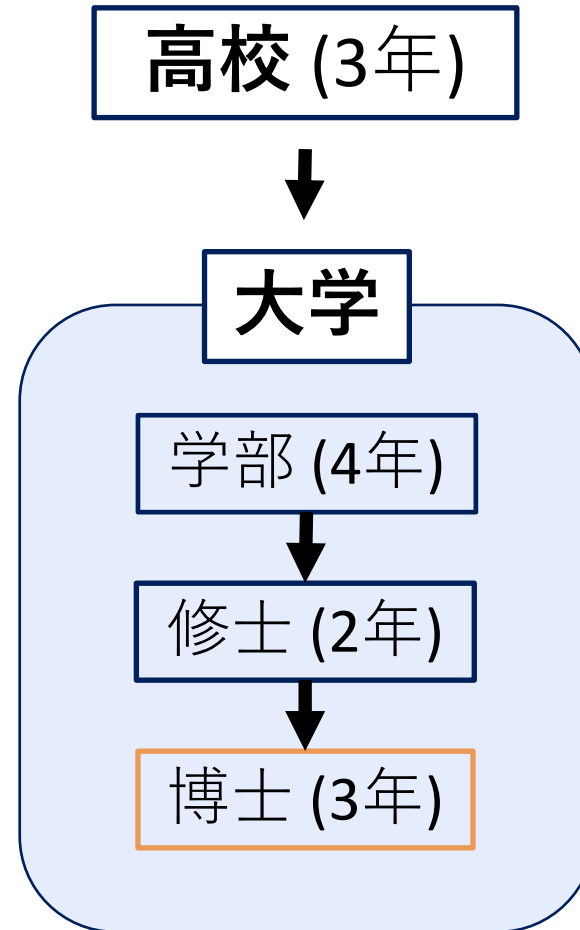
菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (25歳)
- 京都大学 理学研究科 博士2年
- 「基礎物理学研究所」という  
ところで研究してます
- 専門：素粒子論
- 出身：茨城県ひたちなか市  
(水戸市の北隣)
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- 修士：京都大学 理学研究科

# はじめに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

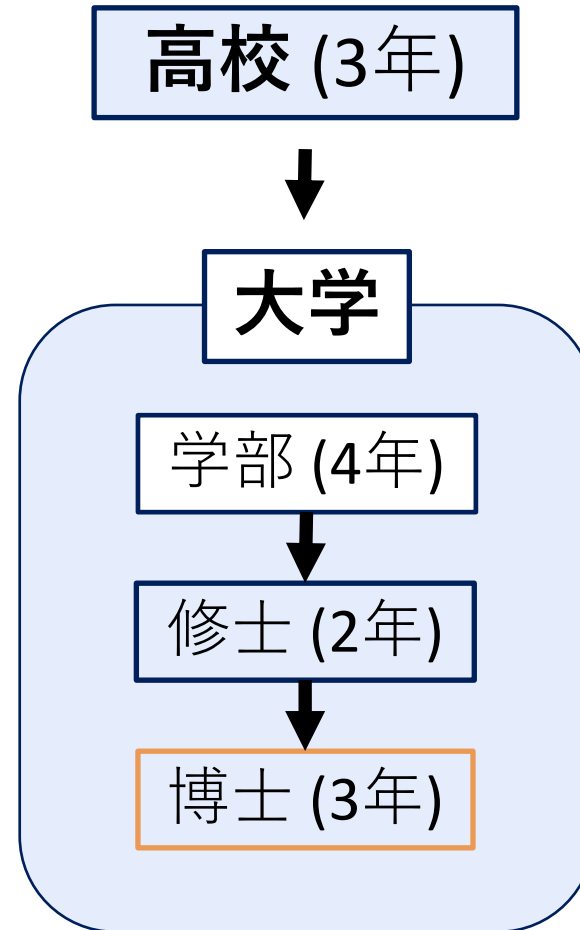
- 1996年生まれ (25歳)
- 京都大学 理学研究科 博士2年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論
- 出身：茨城県ひたちなか市 (水戸市の北隣)
- **高校：茨城県立 水戸第一高校**
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- 修士：京都大学 理学研究科



# はじめに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

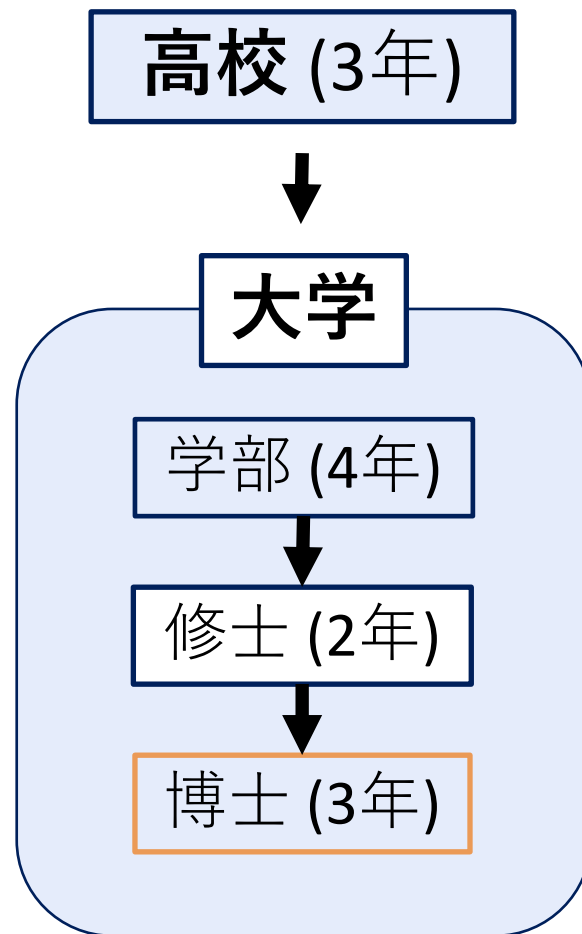
- 1996年生まれ (25歳)
- 京都大学 理学研究科 博士2年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論
- 出身：茨城県ひたちなか市 (水戸市の北隣)
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- **学部：九州大学 理学部物理学科**
- 修士：京都大学 理学研究科



# 始めに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

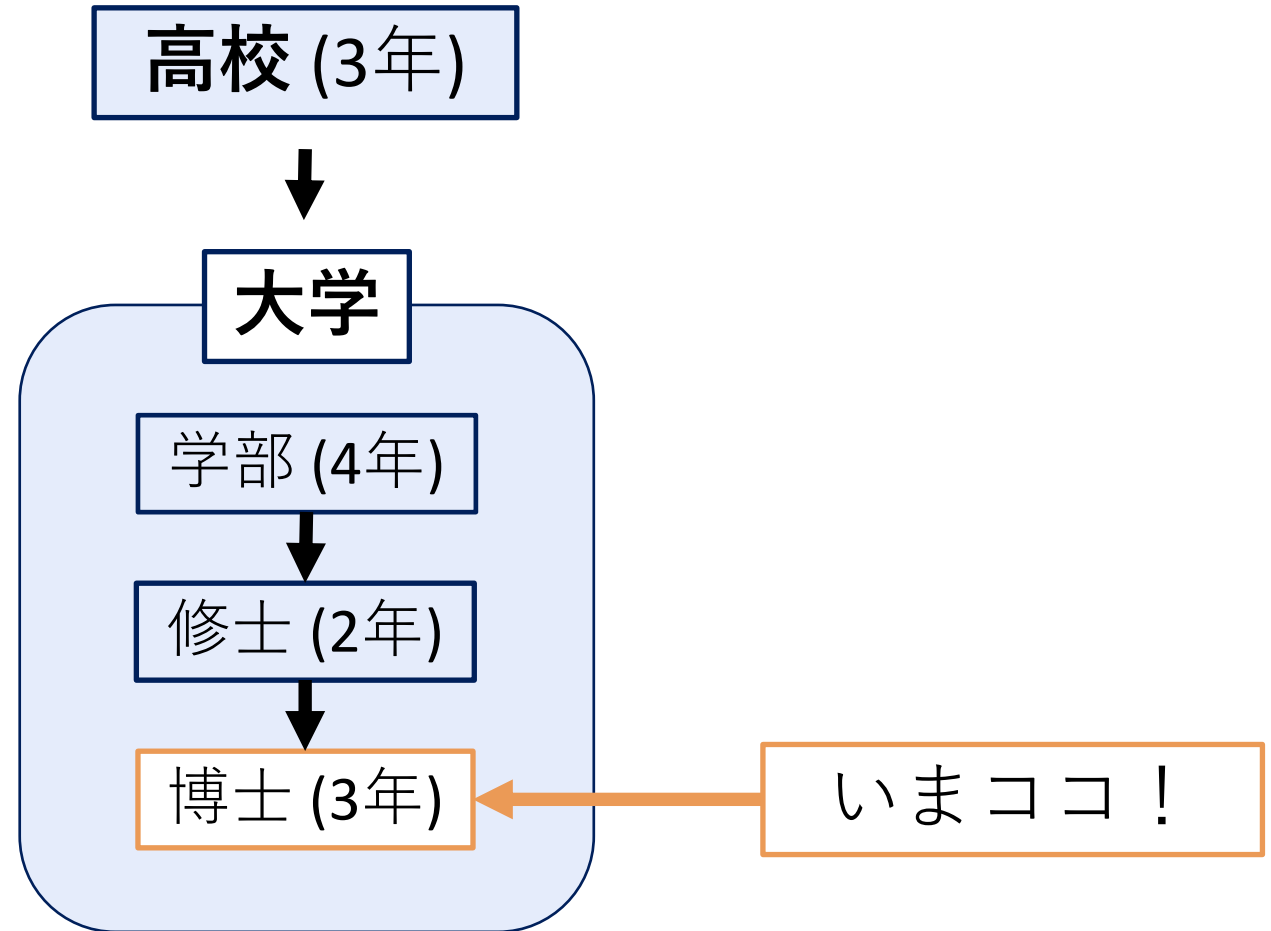
- 1996年生まれ (25歳)
- 京都大学 理学研究科 博士2年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論
- 出身：茨城県ひたちなか市 (水戸市の北隣)
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- **修士：京都大学 理学研究科**



# 始めに、自己紹介 (1)

菅野 颯人 (かんの はやと)

- 1996年生まれ (25歳)
- 京都大学 理学研究科 博士2年
- 「基礎物理学研究所」というところで研究してます
- 専門：素粒子論
- 出身：茨城県ひたちなか市 (水戸市の北隣)
- 高校：茨城県立 水戸第一高校
- 学部：九州大学 理学部物理学科
- 修士：京都大学 理学研究科





# はじめに、自己紹介 (2)

Webページ : <https://www.kyoto-u.ac.jp>  
<https://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp>

## 京都大学

- 京都市にある国立大学
- 国立大学の中では二番目に古い

## 基礎物理学研究所

- 京大の附置研究所の1つ
- 国内の主要な理論物理学の研究拠点
- 英語名 :

Yukawa Institute for Theoretical Physics



# はじめに、自己紹介 (2)

Webページ : <https://www.kyoto-u.ac.jp>  
<https://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp>

## 京都大学

- 京都市にある国立大学
- 国立大学の中では二番目に古い

## 基礎物理学研究所

- 京大の附置研究所の1つ
- 国内の主要な理論物理学の研究拠点
- 英語名 :

Yukawa Institute for Theoretical Physics



# 目次

## 1. はじめに

- 自己紹介

## 2. 導入 (3)

- この世界は何からできてる？

## 3. 理論 (6)

- 素粒子の種類
- 「標準模型」について

## 4. 実験(4)・ここまでのまとめ(3)

- どうやって素粒子を見つけたの？
- 加速器
- ここまでのまとめ

## 5. 理論研究 (7)

- 標準模型の一部を詳しく見てみよう
- 湯川秀樹の計算

# 突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと...?

- 例：「紙」

# 突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと...?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?
  - セルロース： $-\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5-$
  - $\text{CHO}$

# 突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと...?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見てみる?
  - セルロース： $-\text{[C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5\text{]}-$
  - $\text{CHO}$
  - 原子?



# 突然ですが、問題

目の前にある「モノ」を小さくしていくと...?

- 例：「紙」
  - 取り敢えず小さくしてみよう
  - ちぎる?ハサミで切る?
  - 更に小さくしてみる
  - 顕微鏡で見してみる?
  - セルロース： $-\text{[C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5\text{]}-$
  - $\text{CHO}$
  - 原子?
- この世界にあるものは全て「原子」からできている

# 原子?

| 周期\族 | 1                                            | 2                                             | 3                                             | 4                                                  | 5                                           | 6                                               | 7                                            | 8                                            | 9                                               | 10                                                 | 11                                               | 12                                               | 13                                            | 14                                            | 15                                            | 16                                              | 17                                           | 18                                           |
|------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1    | 1 <b>H</b><br>水素<br>Hydrogen<br>1.00798      |                                               |                                               |                                                    |                                             |                                                 |                                              |                                              |                                                 |                                                    |                                                  |                                                  |                                               |                                               |                                               |                                                 |                                              | 2 <b>He</b><br>ヘリウム<br>Helium<br>4.0026      |
| 2    | 3 <b>Li</b><br>リチウム<br>Lithium<br>6.968      | 4 <b>Be</b><br>ベリリウム<br>Beryllium<br>9.01218  |                                               |                                                    |                                             |                                                 |                                              |                                              |                                                 |                                                    |                                                  |                                                  | 5 <b>B</b><br>硼(ホウ)素<br>Boron<br>10.814       | 6 <b>C</b><br>炭素<br>Carbon<br>12.0106         | 7 <b>N</b><br>窒素<br>Nitrogen<br>14.0069       | 8 <b>O</b><br>酸素<br>Oxygen<br>15.9994           | 9 <b>F</b><br>弗(フッ)素<br>Fluorine<br>18.9984  | 10 <b>Ne</b><br>ネオン<br>Neon<br>20.1797       |
| 3    | 11 <b>Na</b><br>ナトリウム<br>Sodium<br>22.9898   | 12 <b>Mg</b><br>マグネシウム<br>Magnesium<br>24.306 |                                               |                                                    |                                             |                                                 |                                              |                                              |                                                 |                                                    |                                                  |                                                  | 13 <b>Al</b><br>アルミニウム<br>Aluminum<br>26.9815 | 14 <b>Si</b><br>珪(ケイ)素<br>Silicon<br>28.085   | 15 <b>P</b><br>燐(リン)<br>Phosphorus<br>30.9738 | 16 <b>S</b><br>硫黄<br>Sulfur<br>32.068           | 17 <b>Cl</b><br>塩素<br>Chlorine<br>35.452     | 18 <b>Ar</b><br>アルゴン<br>Argon<br>39.948      |
| 4    | 19 <b>K</b><br>カリウム<br>Potassium<br>39.0983  | 20 <b>Ca</b><br>カルシウム<br>Calcium<br>40.078    | 21 <b>Sc</b><br>スカンジウム<br>Scandium<br>44.9559 | 22 <b>Ti</b><br>チタン<br>Titanium<br>47.867          | 23 <b>V</b><br>バナジウム<br>Vanadium<br>50.9415 | 24 <b>Cr</b><br>クロム<br>Chromium<br>51.9961      | 25 <b>Mn</b><br>マンガン<br>Manganese<br>54.938  | 26 <b>Fe</b><br>鉄<br>Iron<br>55.845          | 27 <b>Co</b><br>コバルト<br>Cobalt<br>58.9332       | 28 <b>Ni</b><br>ニッケル<br>Nickel<br>58.6934          | 29 <b>Cu</b><br>銅<br>Copper<br>63.546            | 30 <b>Zn</b><br>亜鉛<br>Zinc<br>65.38              | 31 <b>Ga</b><br>ガリウム<br>Gallium<br>69.723     | 32 <b>Ge</b><br>ゲルマニウム<br>Germanium<br>72.630 | 33 <b>As</b><br>砒(ヒ)素<br>Arsenic<br>74.9216   | 34 <b>Se</b><br>セレン<br>Selenium<br>78.971       | 35 <b>Br</b><br>臭素<br>Bromine<br>79.904      | 36 <b>Kr</b><br>クリプトン<br>Krypton<br>83.798   |
| 5    | 37 <b>Rb</b><br>ルビジウム<br>Rubidium<br>85.4678 | 38 <b>Sr</b><br>ストロンチウム<br>Strontium<br>87.62 | 39 <b>Y</b><br>イットリウム<br>Yttrium<br>88.9058   | 40 <b>Zr</b><br>ジルコニウム<br>Zirconium<br>91.224      | 41 <b>Nb</b><br>ニオブ<br>Niobium<br>92.9064   | 42 <b>Mo</b><br>モリブデン<br>Molybdenum<br>95.95    | 43 <b>Tc</b><br>テクネチウム<br>Technetium<br>[99] | 44 <b>Ru</b><br>ルテニウム<br>Ruthenium<br>101.07 | 45 <b>Rh</b><br>ロジウム<br>Rhodium<br>102.906      | 46 <b>Pd</b><br>パラジウム<br>Palladium<br>106.42       | 47 <b>Ag</b><br>銀<br>Silver<br>107.868           | 48 <b>Cd</b><br>カドミウム<br>Cadmium<br>112.414      | 49 <b>In</b><br>インジウム<br>Indium<br>114.818    | 50 <b>Sn</b><br>錫(スズ)<br>Tin<br>118.710       | 51 <b>Sb</b><br>アンチモン<br>Antimony<br>121.760  | 52 <b>Te</b><br>テルル<br>Tellurium<br>127.60      | 53 <b>I</b><br>沃(ヨウ)素<br>Iodine<br>126.904   | 54 <b>Xe</b><br>キセノン<br>Xenon<br>131.293     |
| 6    | 55 <b>Cs</b><br>セシウム<br>Cesium<br>132.905    | 56 <b>Ba</b><br>バリウム<br>Barium<br>137.327     | ※1                                            | 72 <b>Hf</b><br>ハフニウム<br>Hafnium<br>178.49         | 73 <b>Ta</b><br>タンタル<br>Tantalum<br>180.948 | 74 <b>W</b><br>タングステン<br>Tungsten<br>183.84     | 75 <b>Re</b><br>レニウム<br>Rhenium<br>186.207   | 76 <b>Os</b><br>オスミウム<br>Osmium<br>190.23    | 77 <b>Ir</b><br>イリジウム<br>Iridium<br>192.217     | 78 <b>Pt</b><br>白金(プラチナ)<br>Platinum<br>195.084    | 79 <b>Au</b><br>金<br>Gold<br>196.967             | 80 <b>Hg</b><br>水銀<br>Mercury<br>200.592         | 81 <b>Tl</b><br>タリウム<br>Thallium<br>204.384   | 82 <b>Pb</b><br>鉛<br>Lead<br>207.2            | 83 <b>Bi</b><br>ビスマス<br>Bismuth<br>208.980    | 84 <b>Po</b><br>ポロニウム<br>Polonium<br>[210]      | 85 <b>At</b><br>アスタチン<br>Astatine<br>[210]   | 86 <b>Rn</b><br>ラドン<br>Radon<br>[222]        |
| 7    | 87 <b>Fr</b><br>フランシウム<br>Francium<br>[223]  | 88 <b>Ra</b><br>ラジウム<br>Radium<br>[226]       | ※2                                            | 104 <b>Rf</b><br>ラザホージウム<br>Rutherfordium<br>[267] | 105 <b>Db</b><br>ドブニウム<br>Dubnium<br>[268]  | 106 <b>Sg</b><br>シーボーギウム<br>Seaborgium<br>[271] | 107 <b>Bh</b><br>ボーリウム<br>Bohrium<br>[272]   | 108 <b>Hs</b><br>ハッシウム<br>Hassium<br>[277]   | 109 <b>Mt</b><br>マイトネリウム<br>Meitnerium<br>[276] | 110 <b>Ds</b><br>ダームスタチウム<br>Darmstadtium<br>[281] | 111 <b>Rg</b><br>レントゲニウム<br>Roentgenium<br>[280] | 112 <b>Cn</b><br>コベルニシウム<br>Copernicium<br>[285] | 113 <b>Nh</b><br>ニホニウム<br>Nihonium<br>[278]   | 114 <b>Fl</b><br>フレロビウム<br>Flerovium<br>[289] | 115 <b>Mc</b><br>モスコビウム<br>Moscovium<br>[289] | 116 <b>Lv</b><br>リバモリウム<br>Livermorium<br>[293] | 117 <b>Ts</b><br>テネシン<br>Tennessine<br>[293] | 118 <b>Og</b><br>オガネソン<br>Oganesson<br>[294] |

|               |                                              |                                            |                                                      |                                               |                                               |                                              |                                               |                                                |                                              |                                                  |                                                   |                                             |                                                  |                                                 |                                                 |
|---------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ※1<br>ランタノイド系 | 57 <b>La</b><br>ランタン<br>Lanthanum<br>138.905 | 58 <b>Ce</b><br>セリウム<br>Cerium<br>140.116  | 59 <b>Pr</b><br>プラセオジウム<br>Praseodymium<br>140.908   | 60 <b>Nd</b><br>ネオジウム<br>Neodymium<br>144.242 | 61 <b>Pm</b><br>プロメチウム<br>Promethium<br>[145] | 62 <b>Sm</b><br>サマリウム<br>Samarium<br>150.36  | 63 <b>Eu</b><br>ユウロビウム<br>Europium<br>151.964 | 64 <b>Gd</b><br>ガドリニウム<br>Gadolinium<br>157.25 | 65 <b>Tb</b><br>テルビウム<br>Terbium<br>158.925  | 66 <b>Dy</b><br>ジスプロシウム<br>Dysprosium<br>162.500 | 67 <b>Ho</b><br>ホルミウム<br>Holmium<br>164.930       | 68 <b>Er</b><br>エルビウム<br>Erbium<br>167.259  | 69 <b>Tm</b><br>ツリウム<br>Thulium<br>168.934       | 70 <b>Yb</b><br>イッテルビウム<br>Ytterbium<br>173.045 | 71 <b>Lu</b><br>ルテチウム<br>Lutetium<br>174.967    |
| ※2<br>アクチノイド系 | 89 <b>Ac</b><br>アクチニウム<br>Actinium<br>[227]  | 90 <b>Th</b><br>トリウム<br>Thorium<br>232.038 | 91 <b>Pa</b><br>プロトアクチニウム<br>Protactinium<br>231.036 | 92 <b>U</b><br>ウラン<br>Uranium<br>238.029      | 93 <b>Np</b><br>ネプツニウム<br>Neptunium<br>[237]  | 94 <b>Pu</b><br>プルトニウム<br>Plutonium<br>[239] | 95 <b>Am</b><br>アメリシウム<br>Americium<br>[243]  | 96 <b>Cm</b><br>キュリウム<br>Curium<br>[247]       | 97 <b>Bk</b><br>バークリウム<br>Berkelium<br>[247] | 98 <b>Cf</b><br>カリホルニウム<br>Californium<br>[252]  | 99 <b>Es</b><br>アインスタイニウム<br>Einsteinium<br>[252] | 100 <b>Fm</b><br>フェルミウム<br>Fermium<br>[257] | 101 <b>Md</b><br>メンデレビウム<br>Mendelevium<br>[258] | 102 <b>No</b><br>ノーベリウム<br>Nobelium<br>[259]    | 103 <b>Lr</b><br>ローレンシウム<br>Lawrencium<br>[262] |

原子って何からできてる?

- 原子核 (+)、電子 (-)
- 原子核 = 陽子 + 中性子

Wikipediaより引用



# 素粒子!

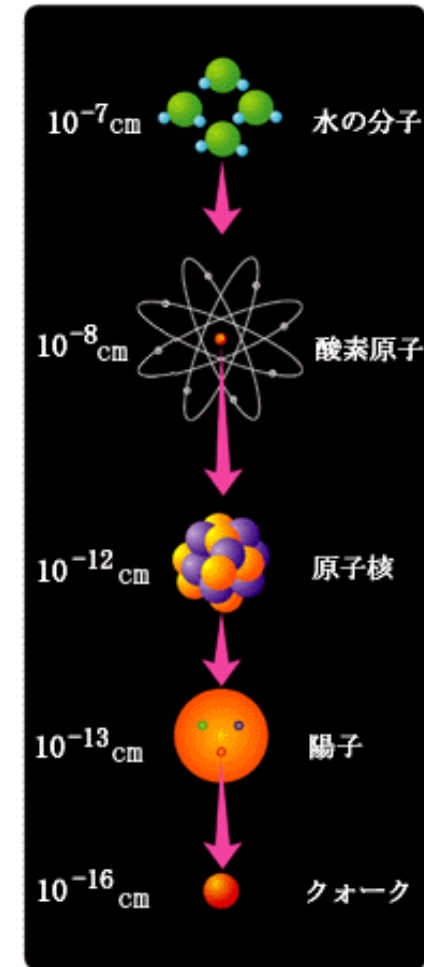
素粒子：これ以上細かくできないもの

- 陽子 = 「クォーク」の集まり
- 電子は素粒子

# 素粒子!

素粒子：これ以上細かくできないもの

- 陽子 = 「クォーク」の集まり
- 電子は素粒子



KEK HPより引用

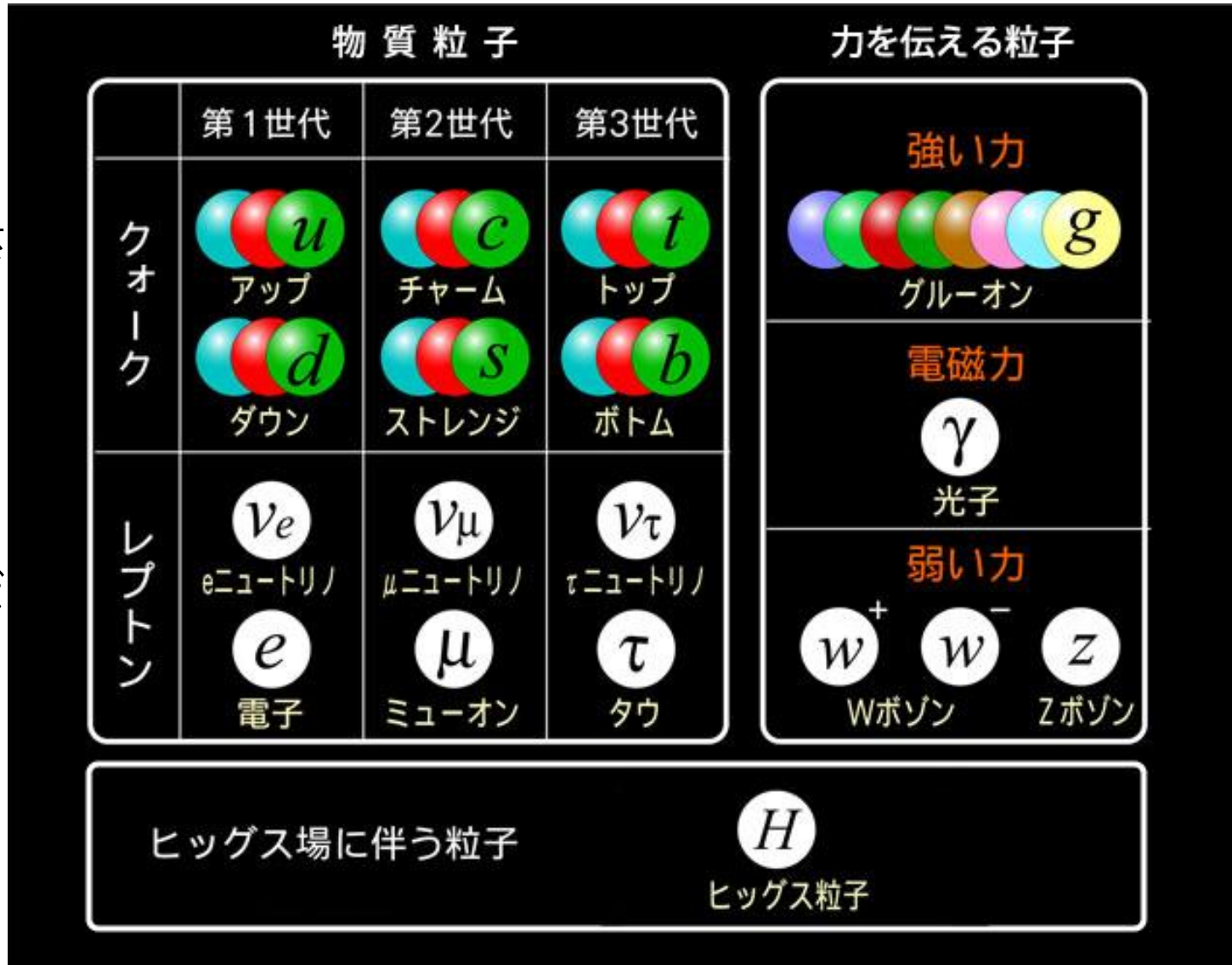
# 素粒子!

素粒子：

- 陽子 =
- 電子は素

他には？

- クォーク
- ゲージボ
- ヒッグス



KEK HPより引用

# 3. 理論

目標：「標準模型」を知る

# フェルミオン・ボソン

素粒子は「モノ」だけじゃない

- 「力を伝える粒子」
- 例：フォトン (光)

## フェルミオン

- 「モノ」を作る
- クォーク、電子

## ボソン

- 力を伝える
- 質量を与える

KEK HPより引用

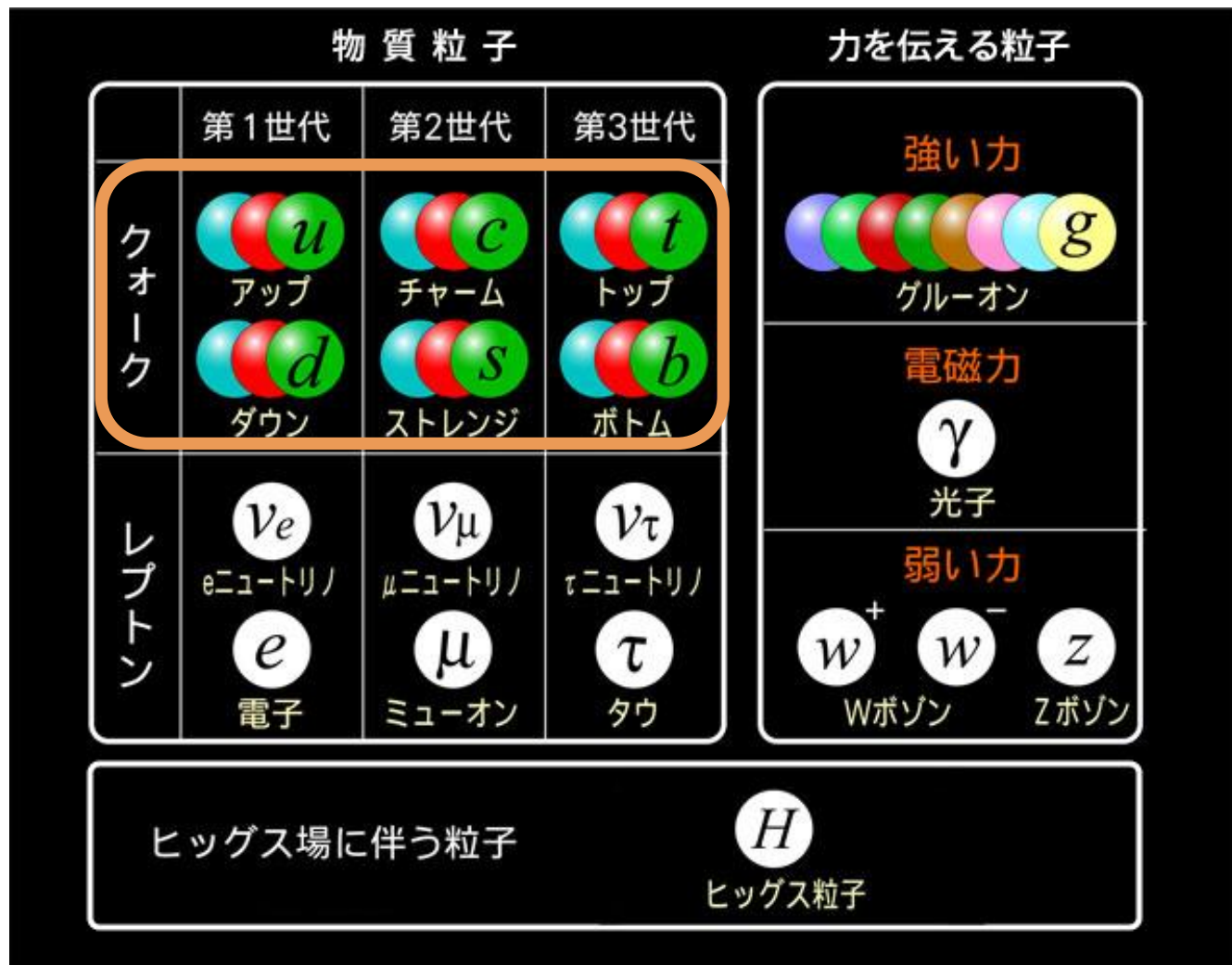


# クォーク

## 原子核を作る

- 全部で6種類
- 陽子 = uud
- 中性子 = udd
- 電荷 :  $+\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}$
- 質量 : 2eV~172GeV
- eV (electron volt) とは?
  - 電子1つを1Vの電圧で加速した時のエネルギー
  - 素粒子で良く使われる単位
  - keV=10<sup>3</sup>eV、MeV=10<sup>6</sup>eV、GeV=10<sup>9</sup>eV  
(物理の教科書の後ろの方に載っている)

KEK HPより引用

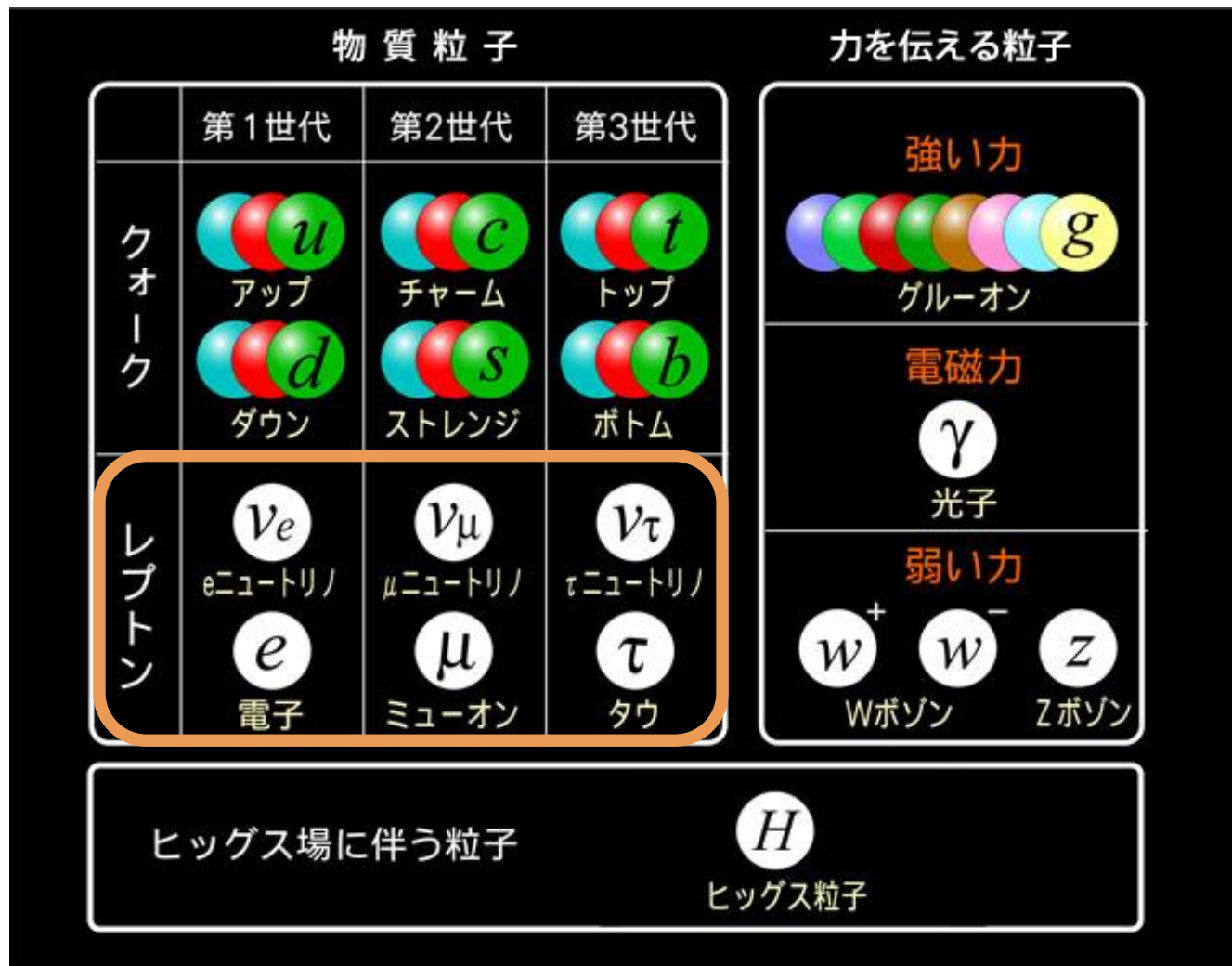


# レプトン

## 電子の仲間

- 全部で6種類
- 電子の仲間：3種類
- ニュートリノ
- 電荷：0, -1
- 質量：
  - ニュートリノ：数meV程度?
  - 電子：511keV
  - ミューオン：106MeV
  - タウ：1.8GeV

KEK HPより引用



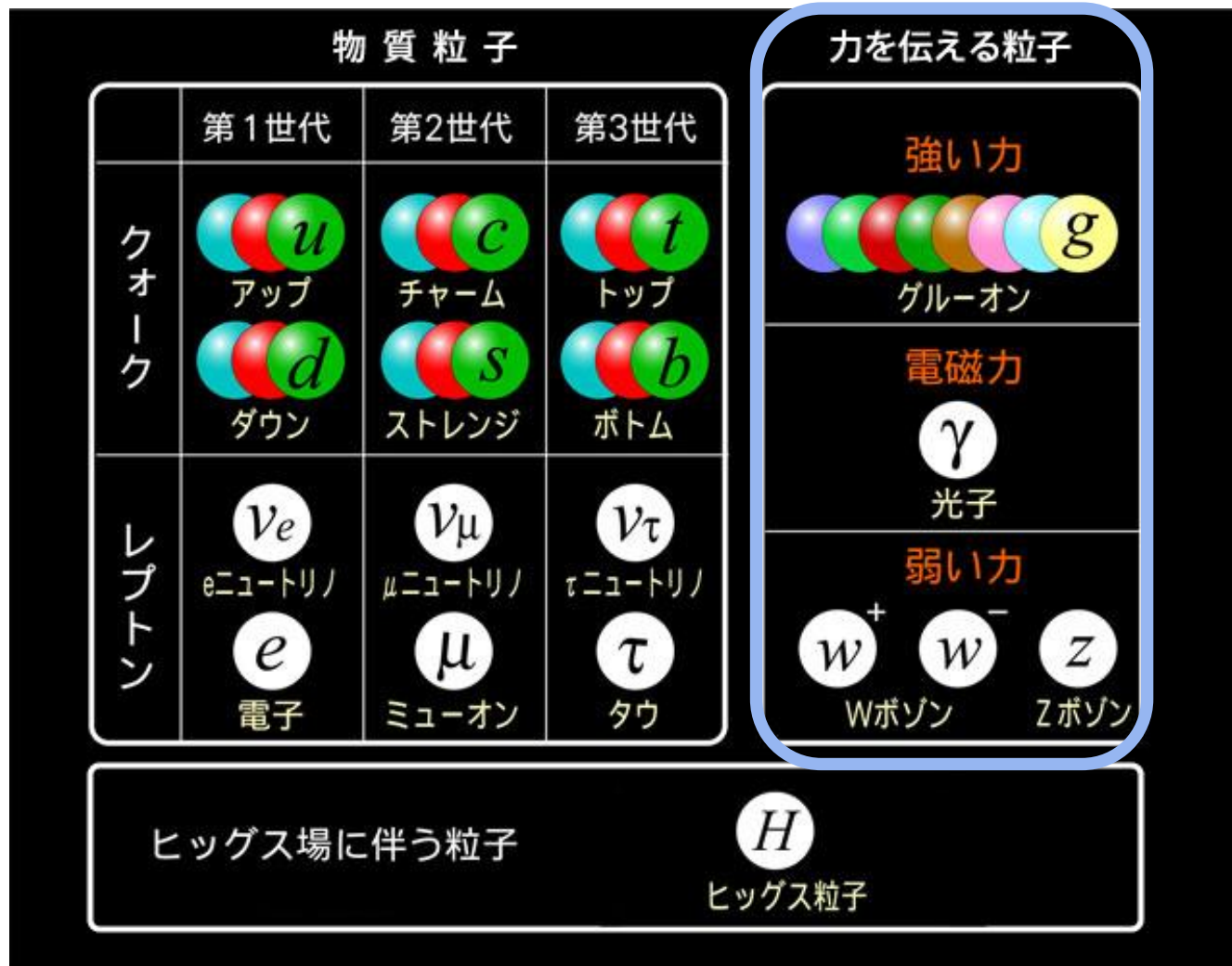


# ゲージボソン

## 力を伝える

- 力は3種類
  - この世界に存在する「重力」以外の全ての力を説明する
- 強い力：原子核内
- 電磁気力
- 弱い力：中性子の崩壊
- 粒子の「キャッチボール」で力が伝わる

KEK HPより引用

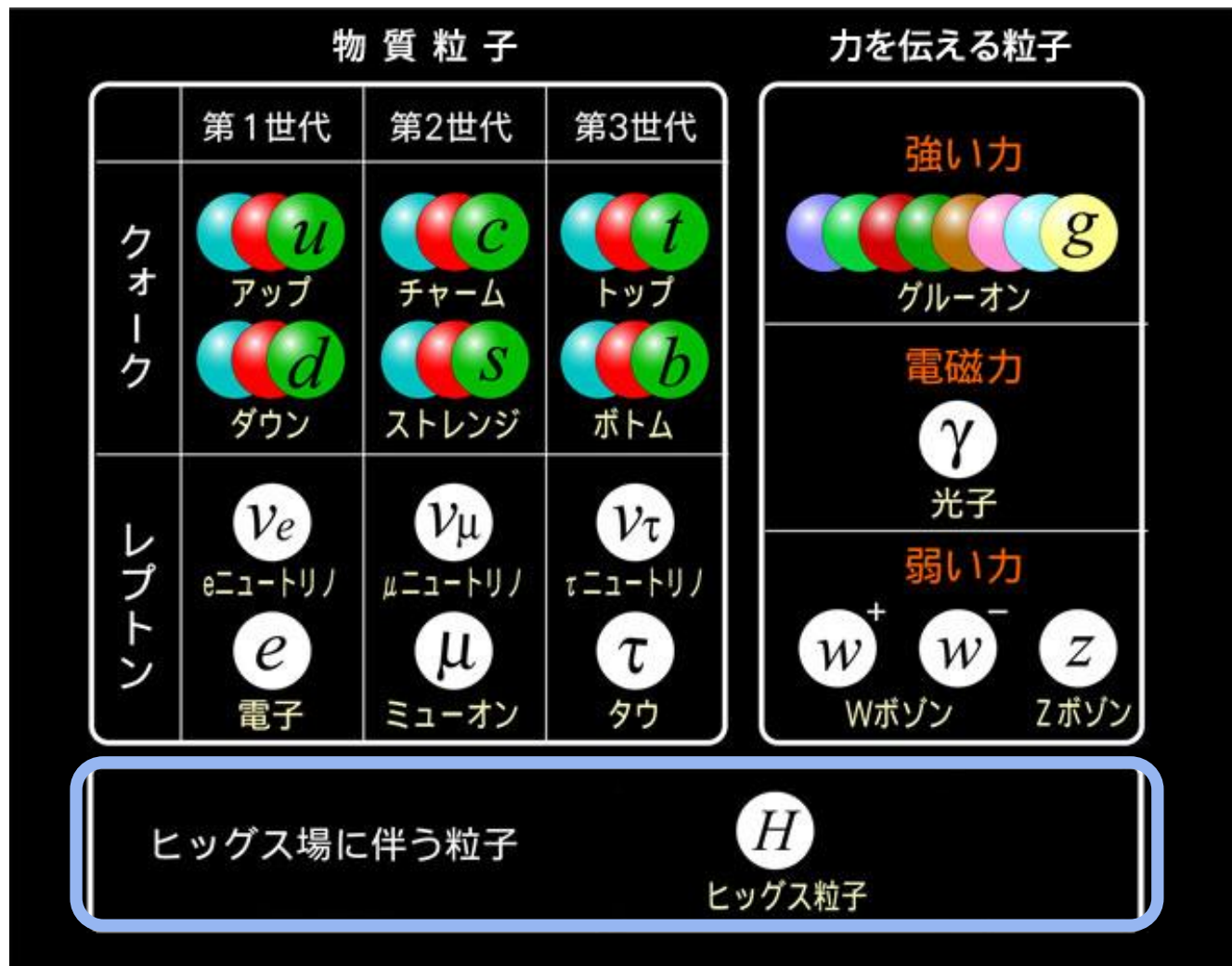


# ヒッグスボソン

## 質量を与える

- 2012年に発見
- 一番新しい
- 他の粒子に質量を与える役割
- 電荷：0
- 質量：125GeV

KEK HPより引用



# 標準模型

## 素粒子を記述する理論

- ここまで紹介してきた素粒子は、「**標準模型** (Standard Model, SM)」と呼ばれる理論で記述される
    - 2012年にヒッグスボソンが発見されて一応完成した
    - 「**場の量子論**」(または単に「場の理論」)と呼ばれる理論を使っている
    - 量子力学 + 相対性理論
    - 3つの力と、 $6+6+4+1=17$ 種類の粒子が含まれる
  - 場の理論の性質は未だ十分に分かっていない
    - 例えば、原子核内部に働く「**強い力**」はとても難しい
    - 現在も、場の理論の性質を解明するための研究が進められている
- 「理論研究」の章

# 4. 実験

# どうやって素粒子を見つけたの？

- 電子、u、d以外の素粒子はどうやって見つけたの？

# どうやって素粒子を見つけたの？

- 電子、u、d以外の素粒子はどうやって見つけたの？

実験!!

# どうやって素粒子を見つけたの？

- 電子、u、d以外の素粒子はどうやって見つけたの？

## 実験!!

- 質量が大きい → エネルギーが大きい
  - $E = mc^2$
  - エネルギーが大きい → 実験が大変
- 加速器
  - 高いエネルギーを作るため、粒子を光速近くまで加速する
  - 加速した粒子を衝突させて新たな粒子を作る

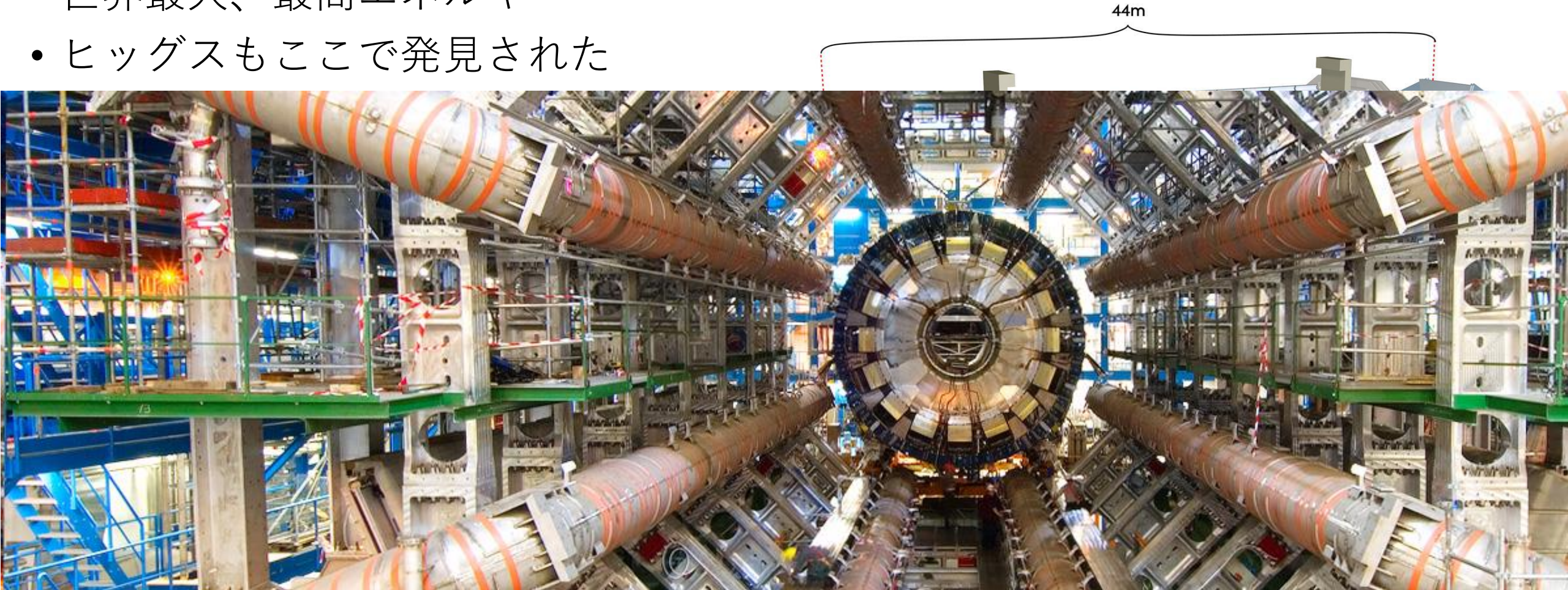


# 加速器実験

## LHC (Large Hadron Collider) @CERN (スイス)

ATLAS実験 HPより引用

- 世界最大、最高エネルギー
- ヒッグスもここで発見された



はじめに (3)

導入 (3)

理論 (6)

実験/まとめ (2/7)

理論研究 (7)

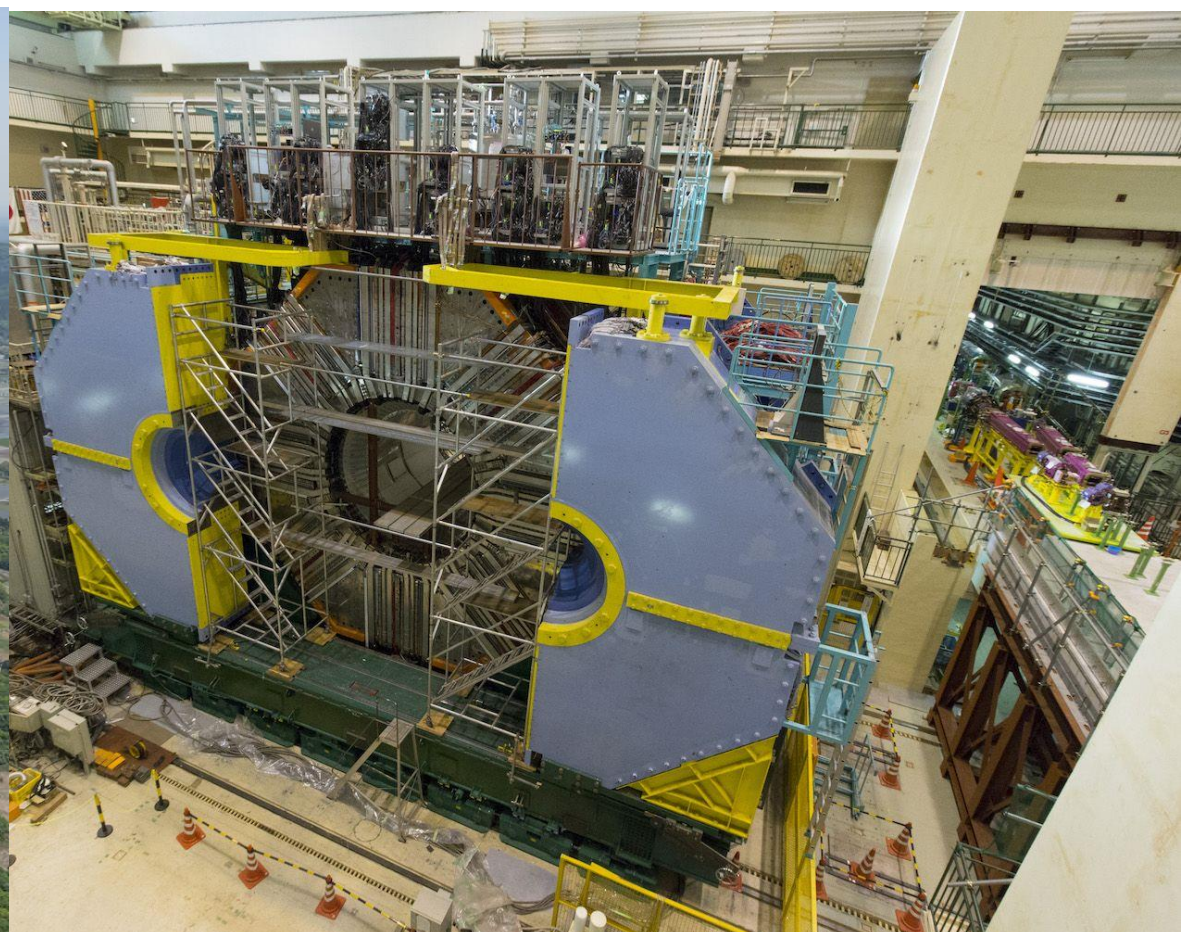


# 日本の加速器 (1)

## Super KEK-B

- 茨城県つくば市に「高エネルギー加速器研究機構 (KEK)」という研究所がある

KEK HPより引用



はじめに (3)

導入 (3)

理論 (6)

実験/まとめ (3/7)

理論研究 (7)

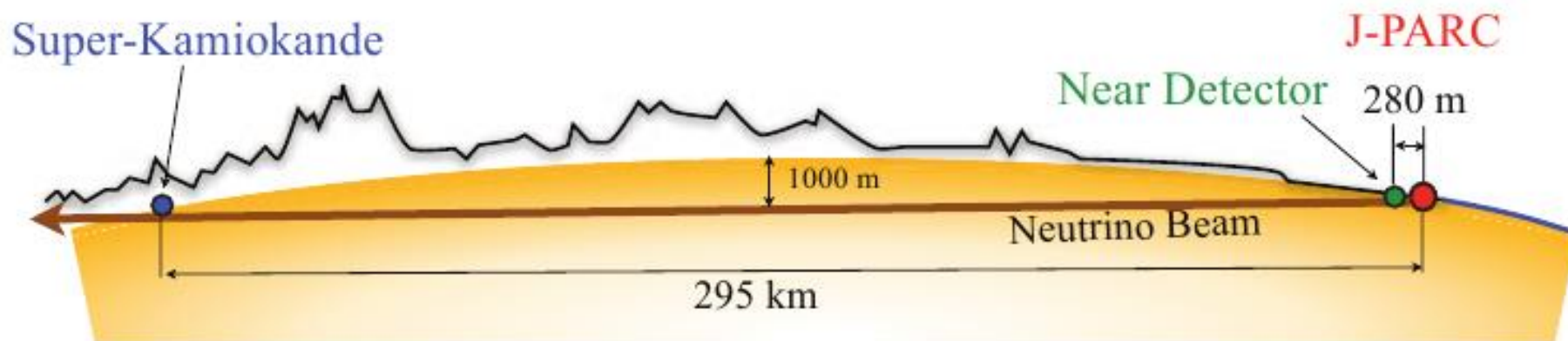


# 日本の加速器 (2)

## J-PARC

- 茨城県東海村に「J-PARC」という実験施設がある
- T2K実験
  - Tokai to Kamioka の略
  - 岐阜県にある「スーパーカミオカンデ」に向けてニュートリノビームを打ち出している
  - ニュートリノの性質を詳しく調べる

KEK HPより引用



# ここまでのまとめ

# 素粒子は本当に素粒子か？

素粒子はこれ以上小さくできないのか？

- 「今のところは素粒子だと思われる」というのが正しい
- 将来、もっと理論・実験が進展すれば、更に細かい構造があると分かるかも？

究極の理論？

- 「**超弦理論**」
  - 「すべての素粒子は『ひも』の振動で作られる」
  - 究極的には、とても小さい「ひも」のみがいる
  - 標準模型の3つの力に加え、重力も統一的に記述できる
- もしかしたら本当の素粒子は「ひも」かも？

# この世界は「素粒子」でできている

## 「素粒子」とは？

- 17種類の粒子、3種類の力
- 「**標準模型**」という理論で書かれる

## 素粒子は未だ分かっていないことが沢山ある

- 理論
  - 超弦理論、場の量子論の研究 → このトークの後半
- 実験
  - 加速器実験
- 他にも沢山の研究が世界中で進められている！

# 素粒子はすごい!

## ノーベル賞

- 日本人のノーベル物理学賞受賞者(日本出身者も含む)11人のうち、素粒子関係の研究者が7人
  - 湯川秀樹(日本人最初のノーベル賞)
  - 理論：5人
  - 実験：2人
  - 最近の受賞者は、梶田さん(2015年)
- 素粒子は特に日本人が多く活躍してきた分野
- 今も日本人が世界的に活躍している

# 5. 理論研究

理論研究の雰囲気伝えられたら、と思っています。



# 標準模型の一部を詳しく見てみよう

## QCD (Quantum ChromoDynamics)

- 原子核内部で働く「**強い力**」に関する理論

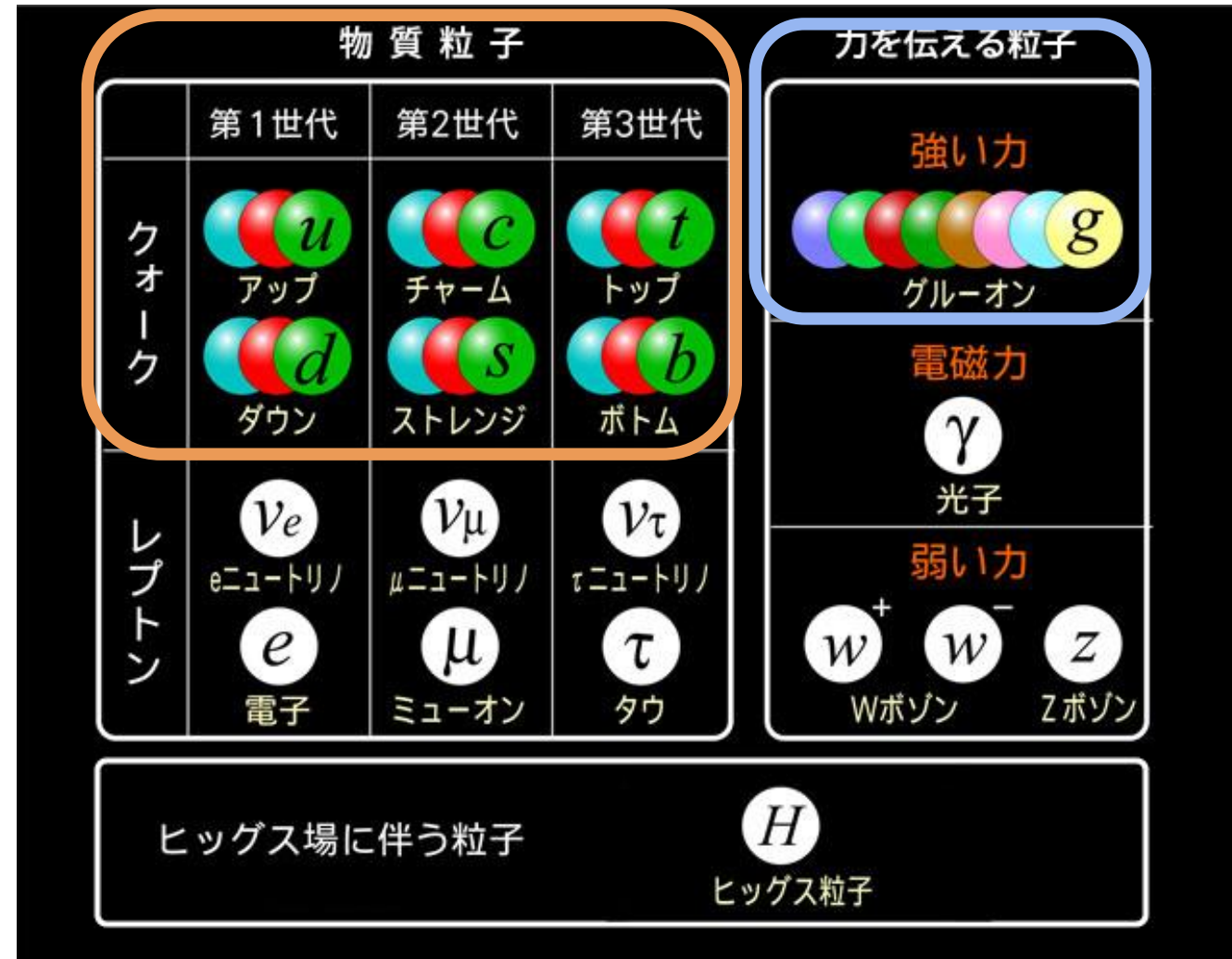
- 性質が未だ良く分かっていない
- クォークの閉じ込め
- 「ミレニアム問題」

$$S = \int d^4x \{ \bar{\psi} i \gamma^\mu (\partial_\mu - i g A_\mu) \psi - \frac{1}{4} \text{tr}[F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}] \}$$

- 強い力**

- クォークをグルーオンが結び付けている
- 陽子・中性子(核子)を $\pi$ (中間子)が結び付けている(核力)

KEK HPより引用



# 湯川秀樹の計算 (1)

## 湯川秀樹

- 日本人初のノーベル賞
- 陽子・中性子を結合させる「**中間子**」の理論的予言



## 湯川が中間子論を提唱した頃の物理は...?

- 原子が陽子・中性子からなる原子核と、電子でできていることは知られていた
- 当時の“素粒子”は、陽子・中性子・電子の3つ
- しかし、
  - 陽子と中性子が原子核として結合できるのはなぜか?
  - 電荷が+と0の物を近くに集めると、電磁気力が強く働いて反発しそう
  - 電気の反発力よりも「強い力」で繋ぎとめる必要がある
- **「新しい力」が必要!** (と、湯川は考えた)
- 「新しい力」はどんな性質?
  - 陽子と中性子を原子核としてまとめる
  - 原子核は小さい → 原子核の大きさ程度の距離で強い引力、それより遠いとほぼ働かない



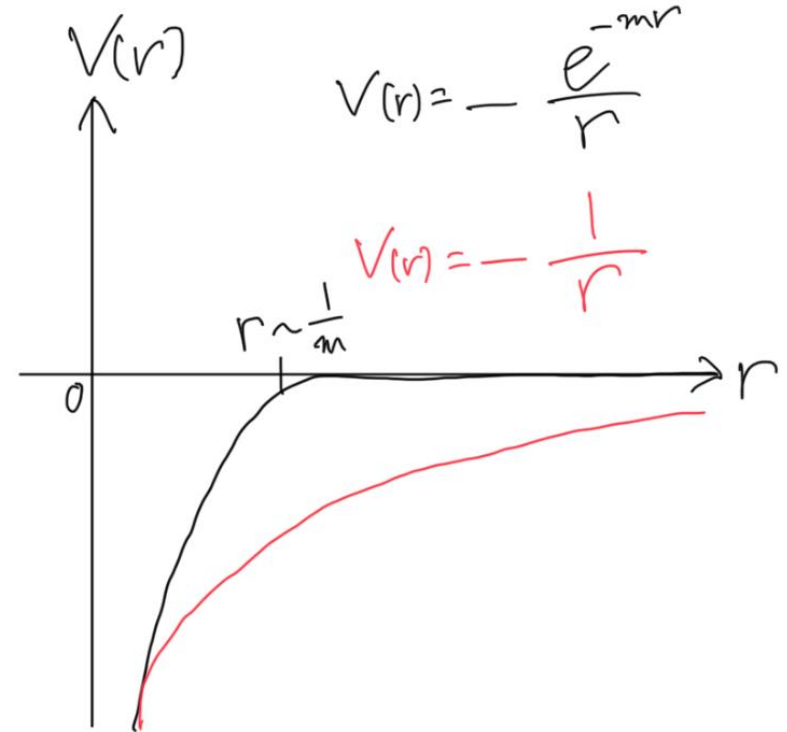
# 湯川秀樹の計算 (2)

「新しい力」を実現するには？

- 距離 $r$ 離れた時、力は以下になると予想

ポテンシャル： $V(r) = -a \frac{e^{-mr}}{r}$       力： $F(r) = a \frac{e^{-mr}}{r} (m + \frac{1}{r})$

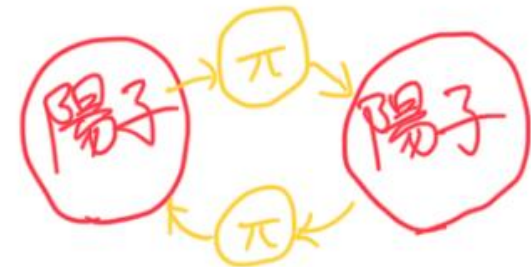
- Yukawa potentialと呼ばれる
- $a$ は力の強さを決める定数(実験と合うように決める)
- $m$ は？
- 陽子・中性子は「**中間子**」によって結合してる！
  - 質量 $m$ の粒子(中間子)をキャッチボールすることで引力が働く
  - 当時知られていなかった、新たな粒子とその質量を予言
  - 実際に中間子が実験で発見されたためノーベル賞！



陽子・中性子は $\pi$ 中間子という粒子によって結合している

- $\pi$ 中間子の質量を計算してみよう！
  - 原子核の半径は $1\text{fm} (=10^{-15}\text{m})$ 程度
  - 距離 $r$ 離れた時に働くポテンシャルは $V(r) = -a \frac{e^{-mr}}{r}$
  - ただし、ここでは $c = 1$ と $\hbar = 1$ という単位系を使っている

と、強い引力が働く



# $\pi$ 中間子の質量を計算してみよう!

ポテンシャル： $V(r) = -a \frac{e^{-mr}}{r}$

力： $F(r) = a \frac{e^{-mr}}{r} (m + \frac{1}{r})$

- $\pi$ 中間子の質量 $m$ を、eV単位で求めたい

- $c$ と $\hbar$ が1の単位系から、 $c$ と $\hbar$ を復活させる

- 光速：光の速さ。相対論を考えるときに出てくる定数  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$

- プランク定数：量子論を考えるときに出てくる定数  $\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

- 電気素量：電子1つが持つ電荷の大きさ  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

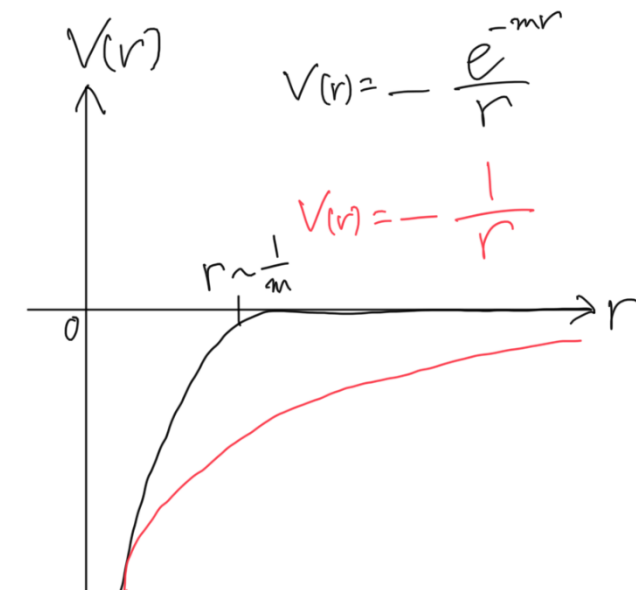
- $1\text{eV} = (\text{電子の電荷}) \times 1\text{V}$        $V = J/C$

- ヒント

- 原子核の半径は1fm ( $=10^{-15}\text{m}$ )程度 (核力が働く典型的な距離)

- 指数関数の肩は必ず無次元 (単位がない)

- $e^{-mr} = e^{-1}$ になる点が、核力が働く典型的な距離だと考えてみる  
(おまけ：g単位で求めてみると?)



はじめに (3)

導入 (3)

理論 (6)

実験/まとめ (7)

理論研究 (7)

# 中間子の質量

Review of particle physics (2020)

- 中間子の中で最も軽い粒子が $\pi$ 中間子
  - 電荷が違うものが3種類： $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$

- 質量は、

- $\pi^\pm$  : 140MeV
- $\pi^0$  : 135MeV

(計算は大体の数字を使ったので、桁が合っていればOK)

- 重い中間子も沢山存在する

- 中間子が沢山発見されたことが、陽子や中性子が素粒子ではないことに気付いたきっかけ
- 中間子はクォークと反クォークが結合したもの
- $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $\pi^- = d\bar{u}$ ,  $\pi^0 = u\bar{u} - d\bar{d}$

38

## Meson Summary Table

### LIGHT UNFLAVORED MESONS ( $S = C = B = 0$ )

For  $I = 1$  ( $\pi$ ,  $b$ ,  $\rho$ ,  $a$ ):  $u\bar{d}$ ,  $(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$ ,  $d\bar{u}$ ;  
for  $I = 0$  ( $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $h$ ,  $h'$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $f$ ,  $f'$ ):  $c_1(u\bar{u} + d\bar{d}) + c_2(s\bar{s})$

$\pi^\pm$

$$I^G(J^P) = 1^-(0^-)$$

Mass  $m = 139.57039 \pm 0.00018$  MeV ( $S = 1.8$ )

Mean life  $\tau = (2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$  s ( $S = 1.2$ )

$$c\tau = 7.8045$$
 m

$\pi^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu \gamma$  form factors [a]

$$F_V = 0.0254 \pm 0.0017$$

$$F_A = 0.0119 \pm 0.0001$$

$$F_V \text{ slope parameter } a = 0.10 \pm 0.06$$

$$R = 0.059^{+0.009}_{-0.008}$$

$\pi^-$  modes are charge conjugates of the modes below.

For decay limits to particles which are not established, see the section on Searches for Axions and Other Very Light Bosons.

| $\pi^\pm$ DECAY MODES                                          | Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )           | Confidence level | $p$<br>(MeV/c) |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|----------------|
| $\mu^+ \nu_\mu$                                                | [b] (99.98770 $\pm$ 0.00004) %           |                  | 30             |
| $\mu^+ \nu_\mu \gamma$                                         | [c] (2.00 $\pm$ 0.25) $\times 10^{-4}$   |                  | 30             |
| $e^+ \nu_e$                                                    | [b] (1.230 $\pm$ 0.004) $\times 10^{-4}$ |                  | 70             |
| $e^+ \nu_e \gamma$                                             | [c] (7.39 $\pm$ 0.05) $\times 10^{-7}$   |                  | 70             |
| $e^+ \nu_e \pi^0$                                              | (1.036 $\pm$ 0.006) $\times 10^{-8}$     |                  | 4              |
| $e^+ \nu_e e^+ e^-$                                            | (3.2 $\pm$ 0.5) $\times 10^{-9}$         |                  | 70             |
| $e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$                                      | < 5 $\times 10^{-6}$ 90%                 |                  | 70             |
| Lepton Family number (LF) or Lepton number (L) violating modes |                                          |                  |                |
| $\mu^+ \bar{\nu}_e$                                            | L [d] < 1.5 $\times 10^{-3}$ 90%         |                  | 30             |
| $\mu^+ \nu_e$                                                  | LF [d] < 8.0 $\times 10^{-3}$ 90%        |                  | 30             |
| $\mu^- e^+ e^+ \nu$                                            | LF < 1.6 $\times 10^{-6}$ 90%            |                  | 30             |

$\pi^0$

$$I^G(J^{PC}) = 1^-(0^{-+})$$

Mass  $m = 134.9768 \pm 0.0005$  MeV ( $S = 1.1$ )

$$m_{\pi^\pm} - m_{\pi^0} = 4.5936 \pm 0.0005$$
 MeV

Mean life  $\tau = (8.52 \pm 0.18) \times 10^{-17}$  s ( $S = 1.2$ )

$$c\tau = 25.5$$
 nm



# 素粒子をもっと知るには

## 文献

- 講談社ブルーバックス
  - 非専門家向けに入門的な科学の話題を扱う新書シリーズ
  - 「クォーク 第2版」 南部洋一郎 著
  - その他にもいろいろ...
- 「『宇宙のすべてを支配する数式』をパパに習ってみた」
  - 橋本幸士 著、講談社
- 雑誌「Newton」
  - 特集で素粒子や超弦理論がある
  - 最近、「ニュートン」のシリーズで色々出ている

## WEBページ

- ひっぐすたん (<https://higgstan.com/>)
  - 素粒子について分かりやすく解説している4コマ漫画

- 僕のwebページに今日のスライド(とほぼ同じ内容の物)が置いてあります

(「基研」でググってメンバーリスト→菅野のページと進むのが早いと思います。又は「菅野颯人」で検索。)

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~hayato.kanno/>

- 書籍案内のページもあります。  
(「研究紹介」のページにリンクが貼ってあります。)

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~hayato.kanno/intro/book.html>

画像引用元 (アクセス日: 2021年8月)

- KEK webサイト: <https://www.kek.jp/ja/>  
KEK イメージアーカイブ: <https://www.kek.jp/ja/publicrelations/imagearchive/>
- ATLAS実験 webサイト: <https://atlas.cern/>
- 周期表の画像: <http://www.chiba-kc.ac.jp/user/~iseri/siryo/atom.pdf>

# 今日伝えたかったこと

この世界は「素粒子」でできている

- 17種類の粒子、3種類の力
- 「**標準模型**」という理論で書かれる

素粒子は未だ分かっていないことが  
沢山ある

- 理論
- 実験
- 沢山の研究が世界中で進められている！

- 湯川秀樹は**中間子**の質量を予言したのでノーベル賞を取った

