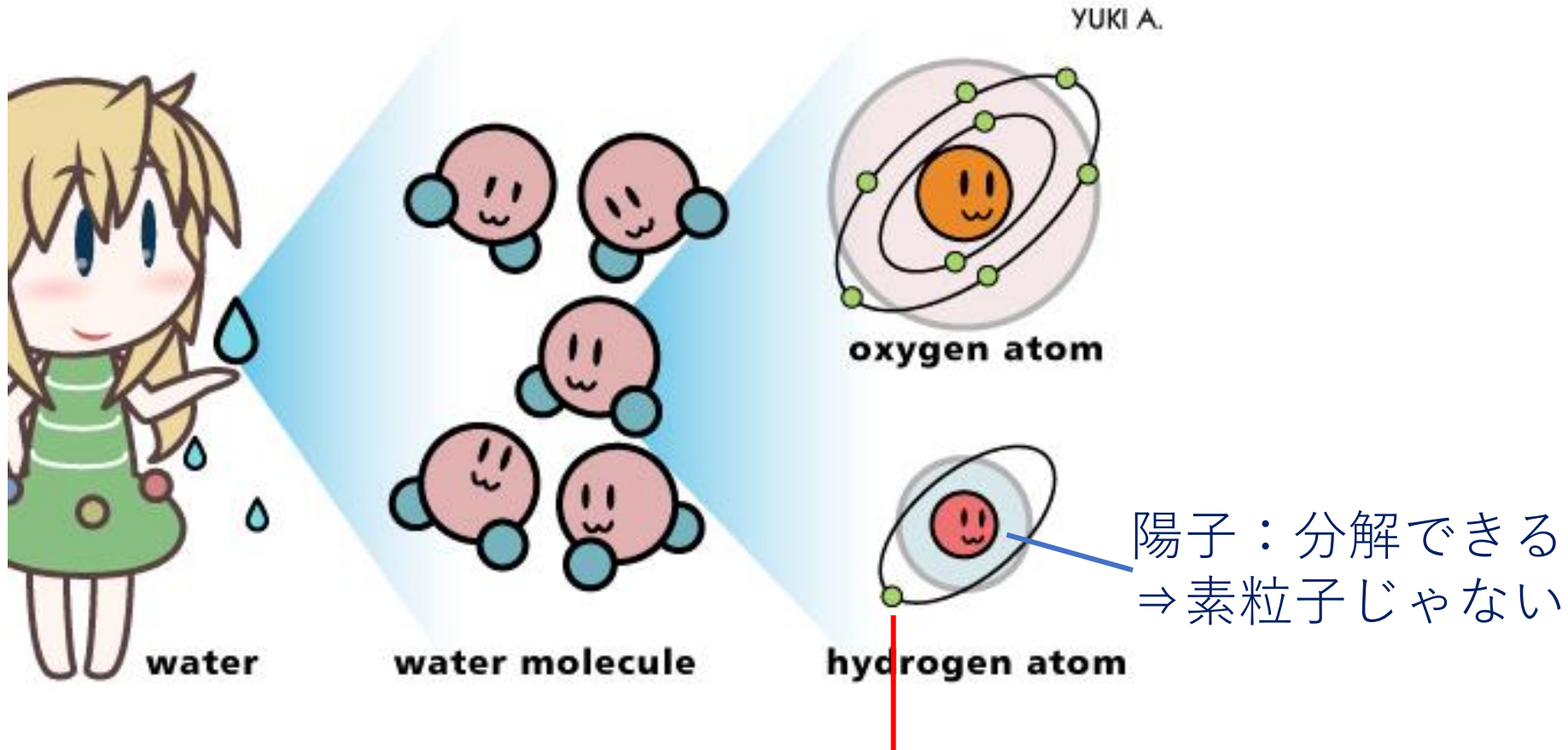


# 素粒子物理学 (高エネルギー物理学) 研究室紹介

素粒子物理学の紹介・大学院での生活  
各実験グループの紹介

# 素粒子とは

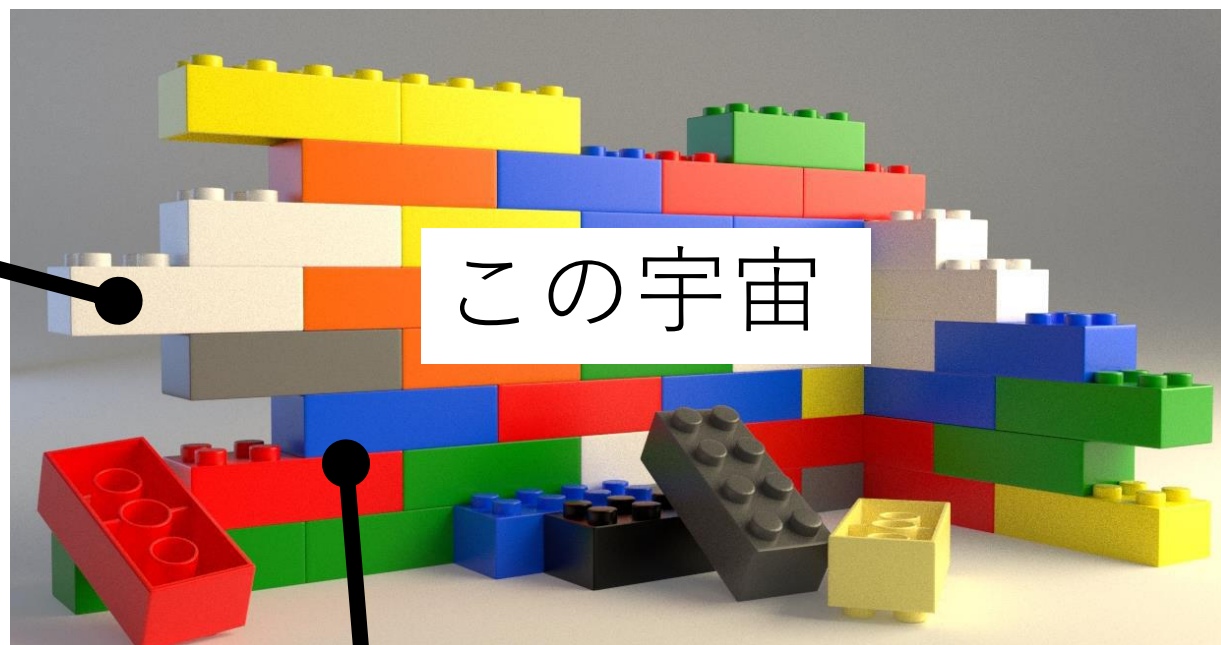
身の回りのものを分解していった時の**最小単位**



# 素粒子物理学とは

この世界の最小単位である**素粒子**と、  
そこに働く**力(法則)**を解き明かす学問  
この宇宙の究極の問いに挑む！

何でできて  
いる？  
(素粒子)

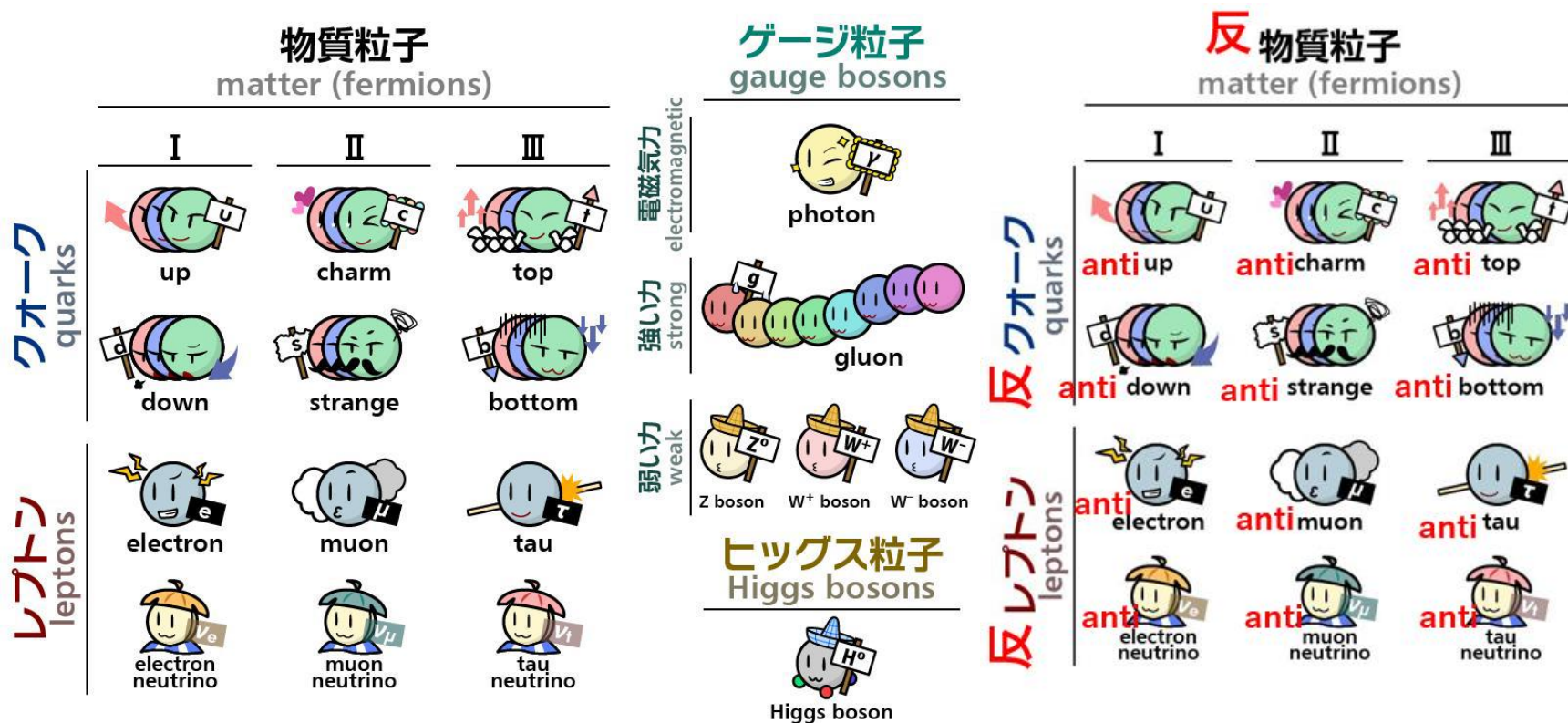


この宇宙

どうやってくっついている？ (力の法則)

# 標準模型

= 今までに分かった素粒子像



現在わかっている素粒子、力の法則をまとめて記述

**ほぼ**全ての実験、理論を説明できるすごい理論！

→ これで素粒子物理学は完成…？

# 標準模型

= 今までに分かった素粒子像



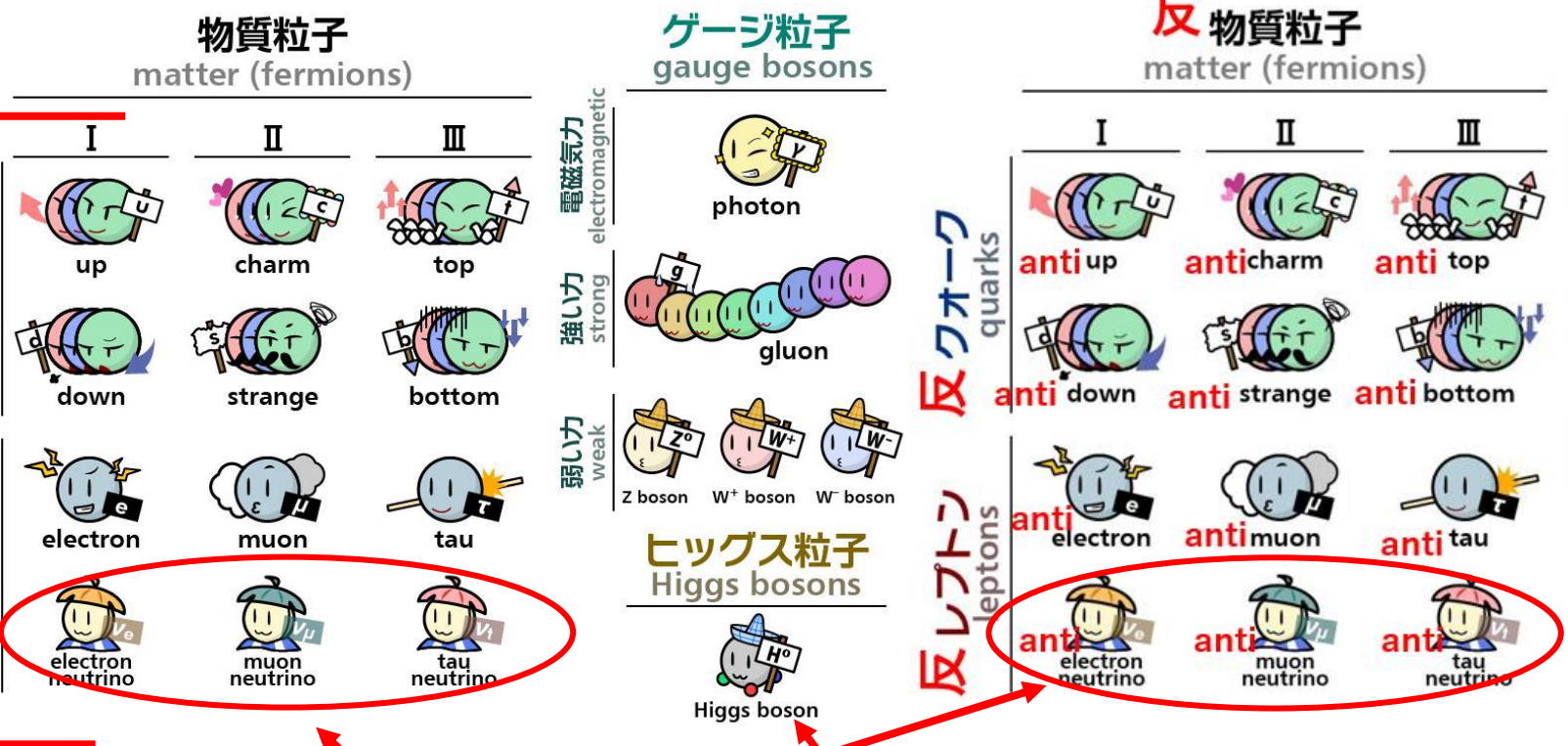
現在わかっている素粒子、力の法則をまとめて記述

**ほぼ**全ての実験、理論を説明できるすごい理論！

→ これで素粒子物理学は完成…？

# 標準模型を超えた物理へ

反物質はなぜ少ない？



統一して説明できる？

同じ？違う？

何種もある？

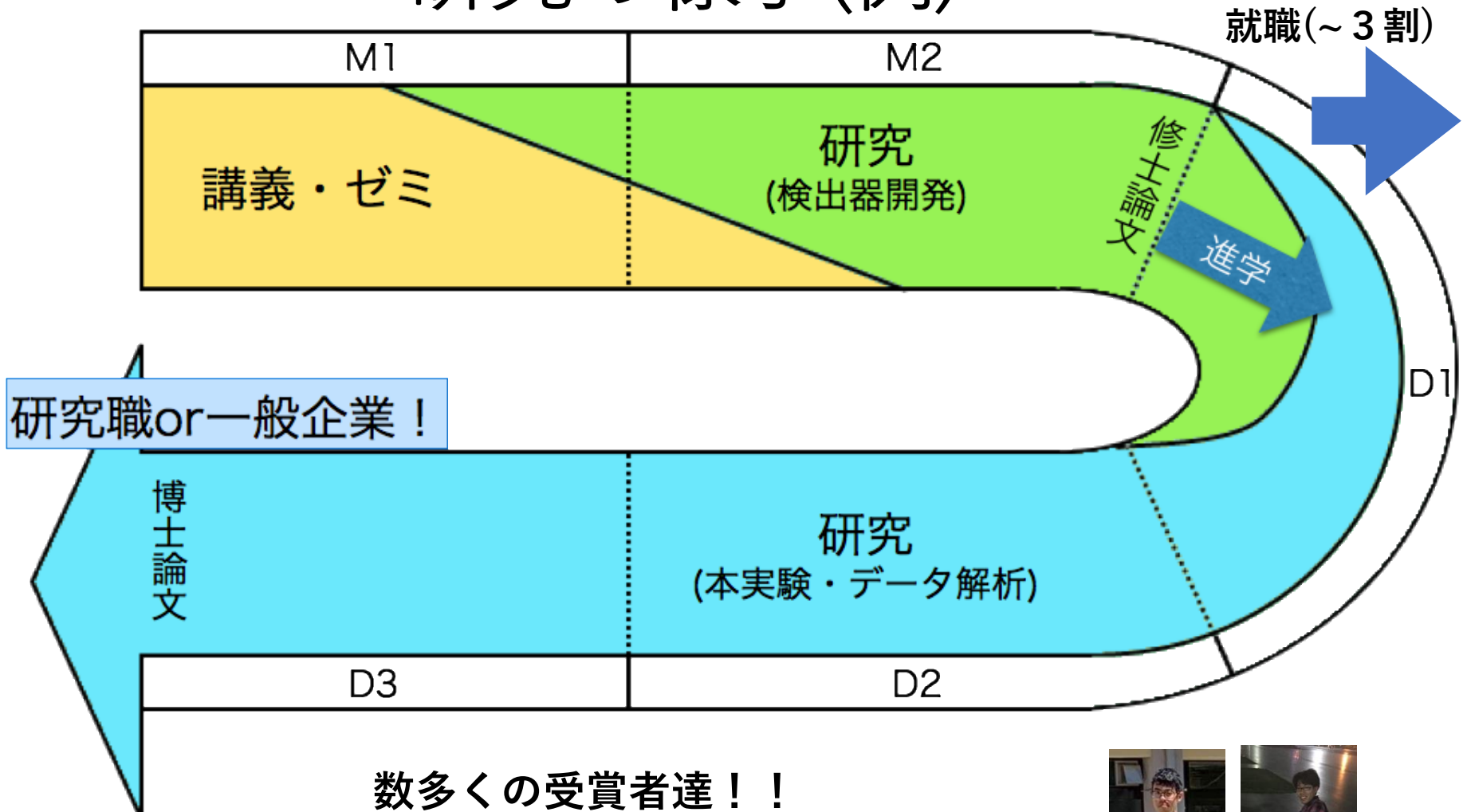
他の素粒子はある？

ダークマターって？

重力は説明できる？

今も残る謎を解明するため  
実験を通して物理に迫る！！

# 研究の様子(例)



数多くの受賞者達！！



2020年度  
測定器開発優秀論文賞  
池満(当研究室OB)

2020年度 高エネルギー物理学奨励賞  
日本物理学会若手奨励賞 芦田(OB)  
2020年度 秋季大会 学生優秀発表賞 平本(OG)・末野(現D1)  
2020年度 猿橋賞 市川(当時准教授)

など

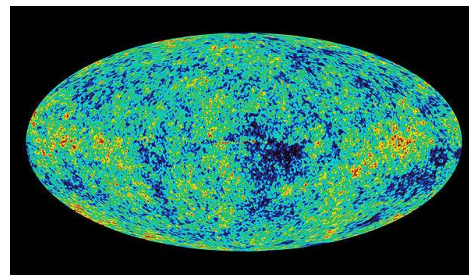


2021年度  
測定器開発優秀修士論文賞  
大塚(OB)・谷(現D1)

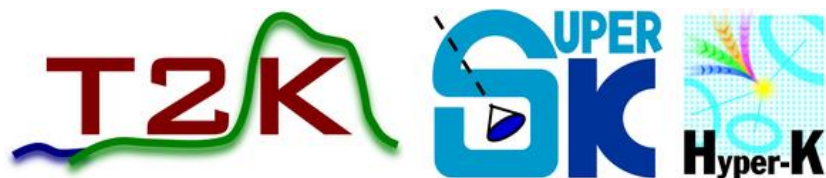
# この後4つの実験グループを紹介



ATLAS実験



CMB観測実験



T2K/SK・HK実験



AXEL実験

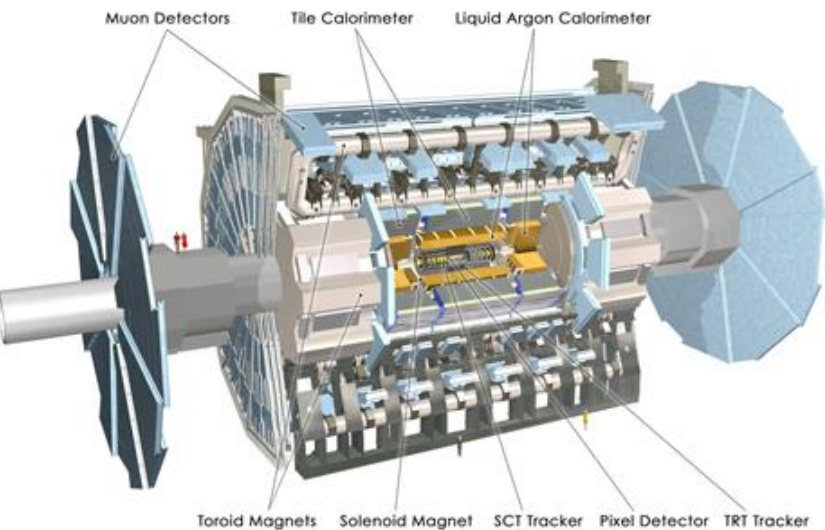
ご質問はZOOM上でもGoogle Formでもお気軽に



# ATLAS 実験紹介

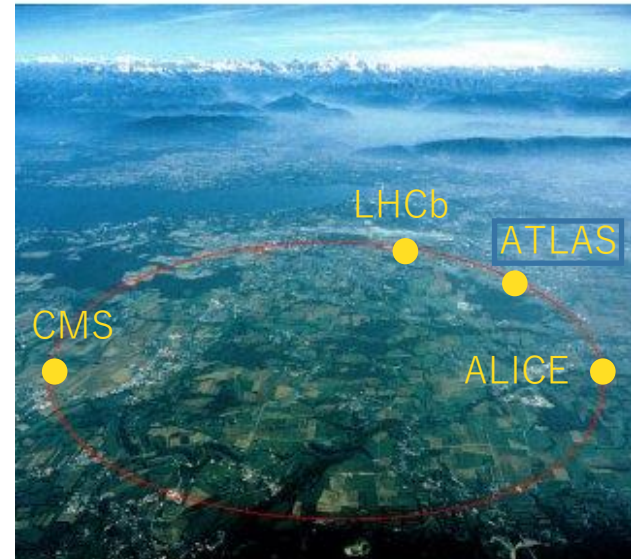
# ATLAS 実験 @ LHC

- 標準模型の検証、新物理の探索を目的とした汎用実験
- CERN の LHC 加速器を用いて、**世界最高エネルギー**で陽子同士を衝突させ、新粒子を生成し、それをATLAS 検出器で観測する



ATLAS 検出器

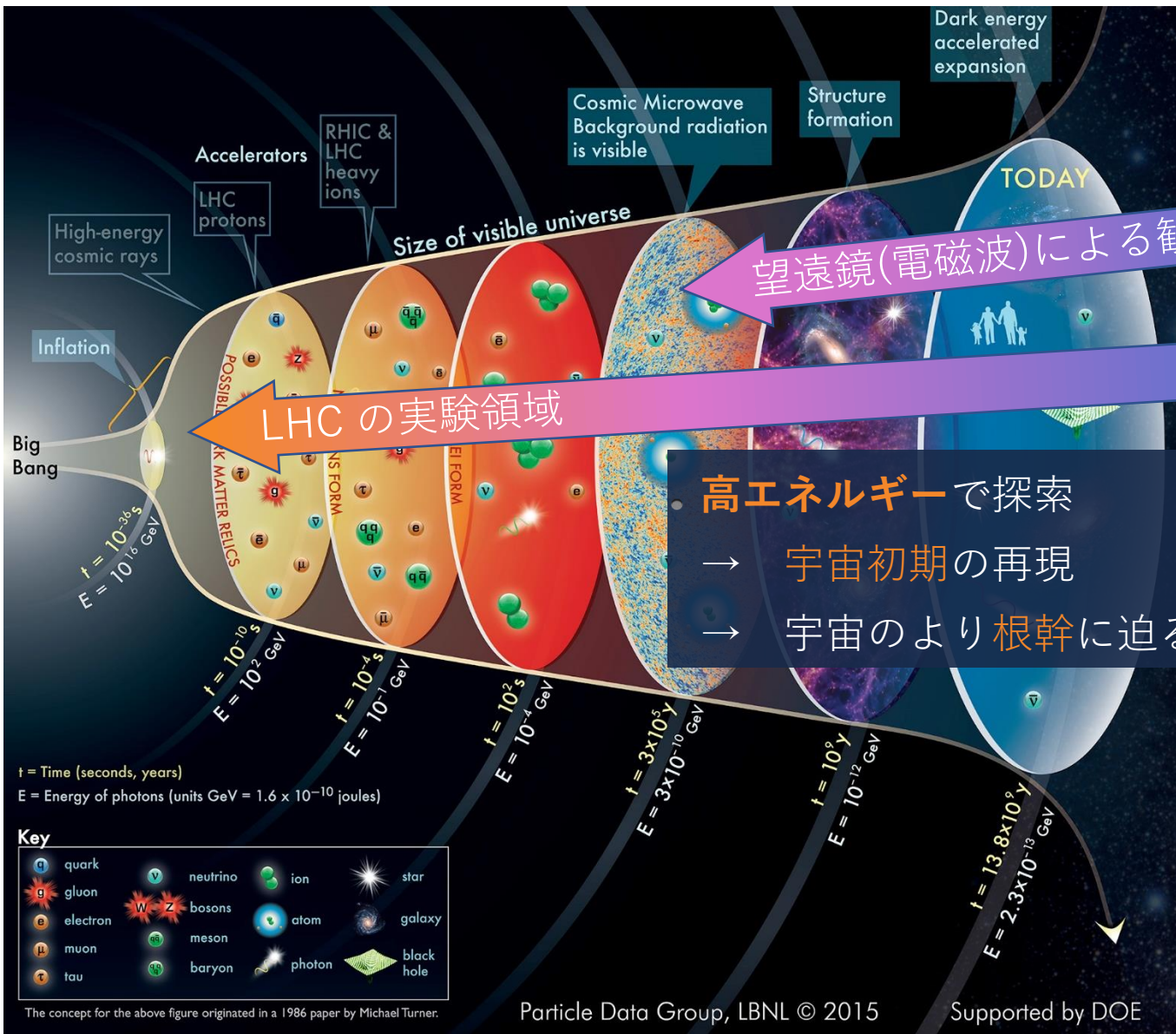
(高さ 22 m, 全長 44 m)



LHC 加速器

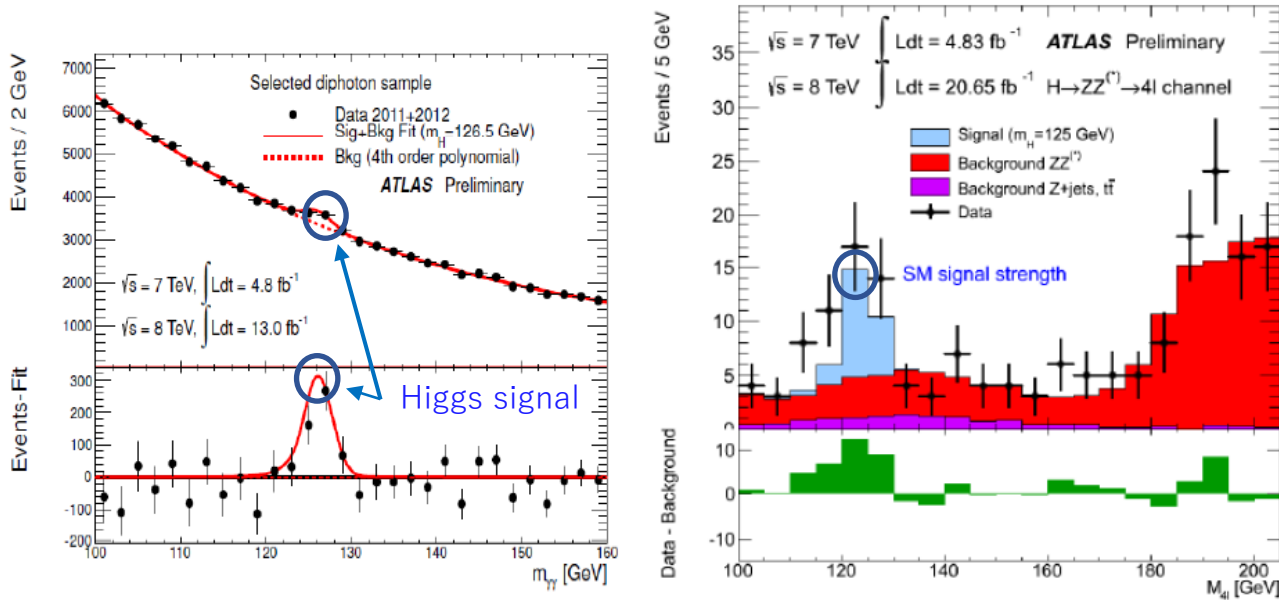
(周長 27 km, **最大重心衝突エネルギー 14TeV**)

# ATLAS 実験 @ LHC



# ヒッグス粒子の発見

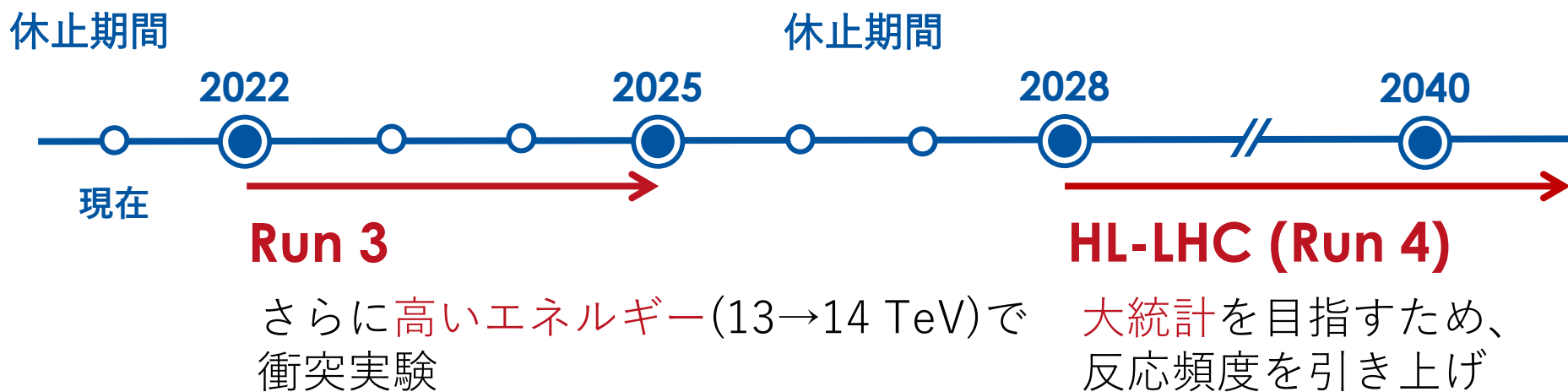
- 2012年、LHCでヒッグス粒子を発見
- 2013年、ノーベル賞受賞！



- 標準模型が完成、これで終わり？
  - ➔ 標準模型で説明できないこと(暗黒物質など)が残っている
  - ➔ 新粒子の探索、ヒッグス粒子の精密測定など課題がたくさん

# LHC アップグレード

- 新物理の発見のため、LHC のアップグレードが行われている



- Run 3 やHL-LHC に向けて、ATLAS 検出器もアップグレード

# 京都 ATLAS グループで研究していること

## ○ トリガーの性能向上のための研究

### ● トリガー

高エネルギー・高頻度の衝突

→ **膨大**な量の粒子が生成

→ 注目する粒子を絞り込む必要がある  
(1秒以内に **4万分の1**程度に)

検出器が注目する対象を決める

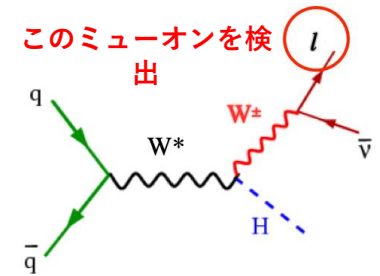
→ 検出器の性能を左右する重要なシステム

### ● ハードウェアトリガー

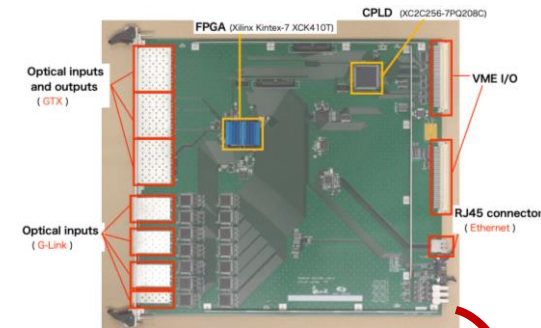
京大グループは主に**ミュオントリガー**に注力  
ミュオンの信号を使ってヒッグス粒子や新粒子の生成を確実に捉える

### ● ハイレベルトリガー

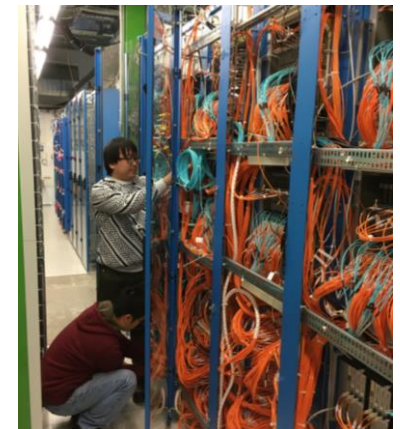
ソフトウェアを使ったより応用的なトリガー  
飛跡・崩壊点の再構成、機械学習などを利用し、より具体的な過程に注目



トリガー用の基盤



システム全体を構築

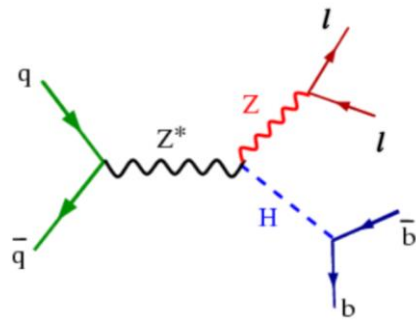


# 京都 ATLAS グループで研究していること

- 新物理発見や標準模型の精密検証のための物理データ解析

自分が興味を持ったテーマに対して、様々な解析が行われている

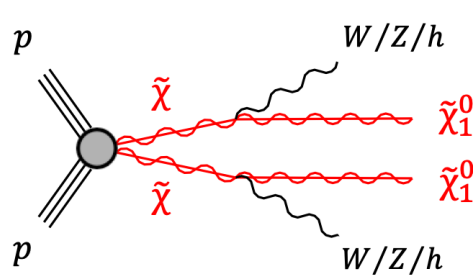
例)



ヒッグス粒子のbクォークへの崩壊測定

ヒッグス粒子の結合の精密測定

→ 標準模型とのずれから新物理を探る



超対称性粒子(SUSY)の探索

Dark Matter の候補粒子

超対称性理論の実証

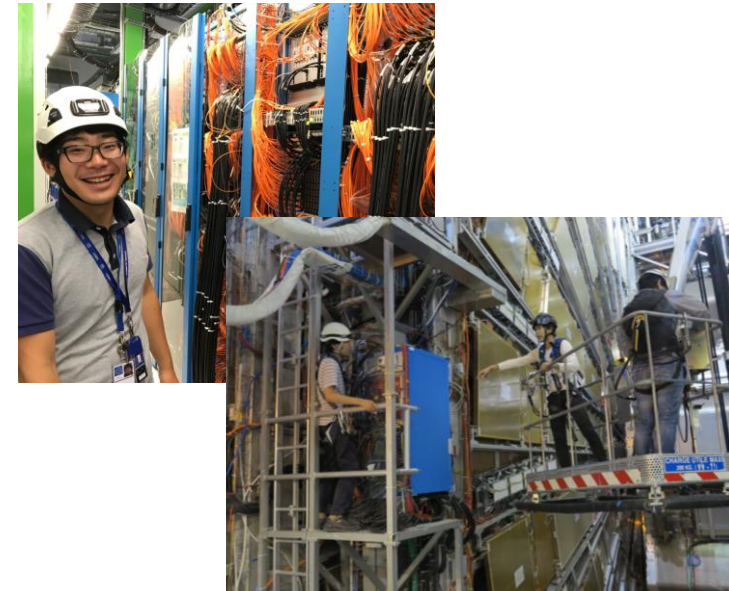
→ 力の大統一、ヒッグス質量の問題の解決

# 京都 ATLAS グループでの活動

- 世界40カ国から約3000人が参加する大規模な国際共同実験  
→ 世界中の研究者と関わりながら研究できる！
- 個々人が興味をもったテーマについて研究  
→ 学生一人ひとりの力で、最前線で活躍できる！



学生の作業の様子

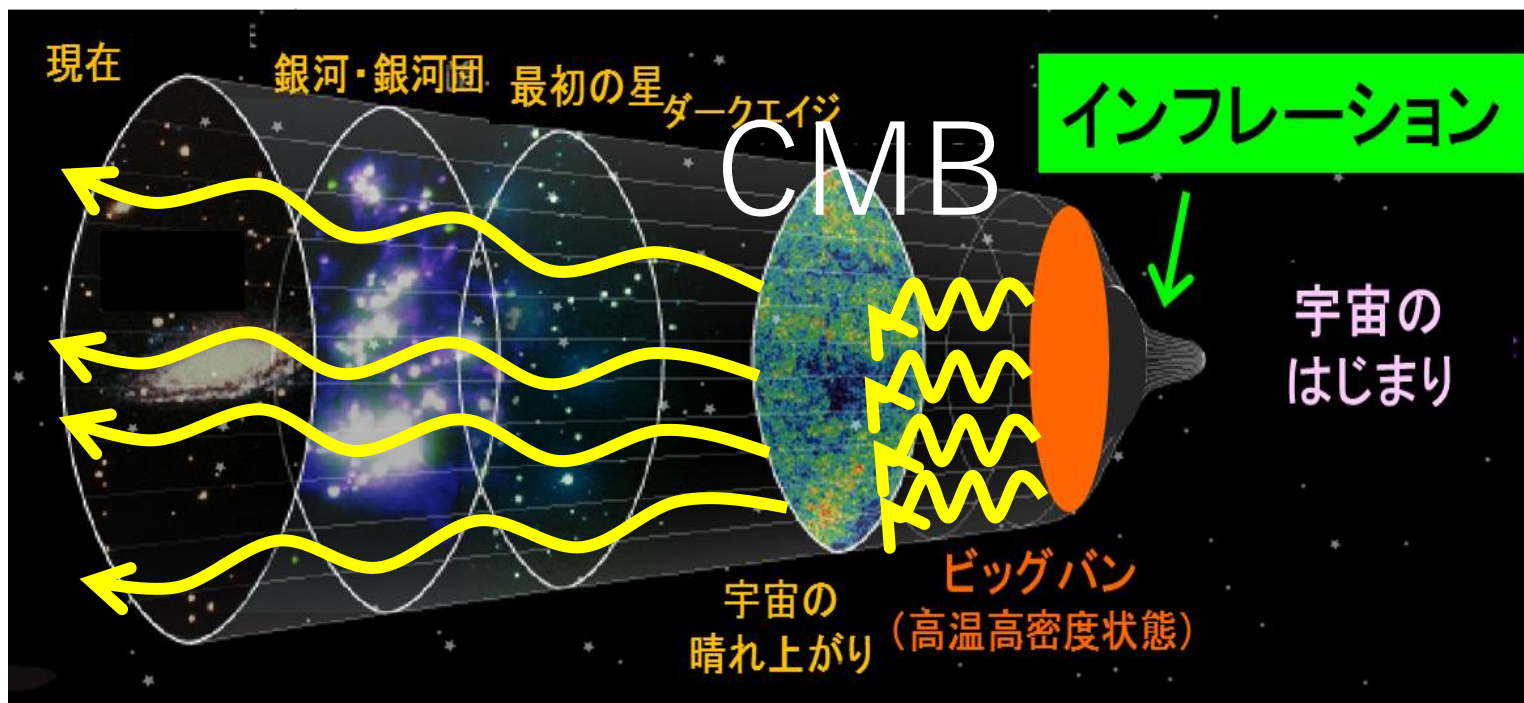




# CMB実験紹介

# CMB(Cosmic Microwave Background radiation)とは？

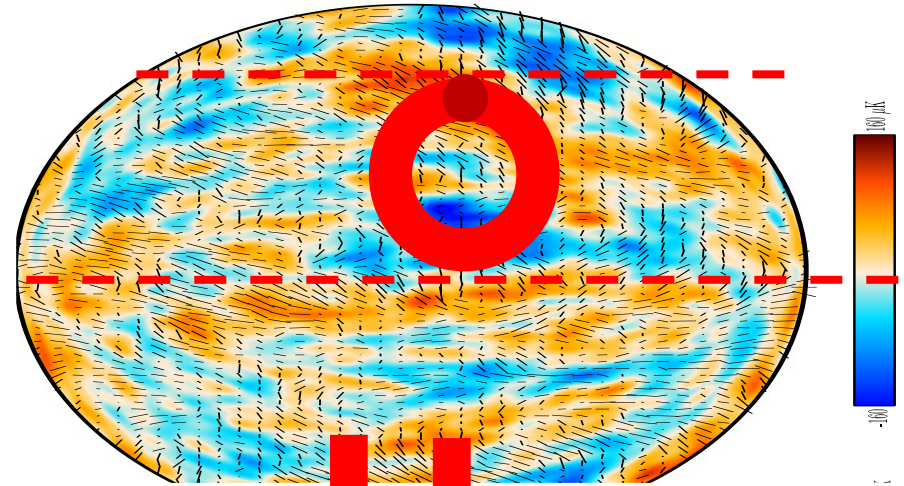
- 宇宙背景放射と呼ばれる、観測できる**最古の光**
- 全ての方向でほぼ同じ温度(2.725K)である
- しかし、わずかな温度異方性( $0(10^{-5})K$ )が存在する



CMBの温度異方性が宇宙解明の鍵！

# GroundBIRD

- スペイン、テネリフェ島で観測
- 超高速スキャン (3秒/1回転)
- 全天の40%の観測領域

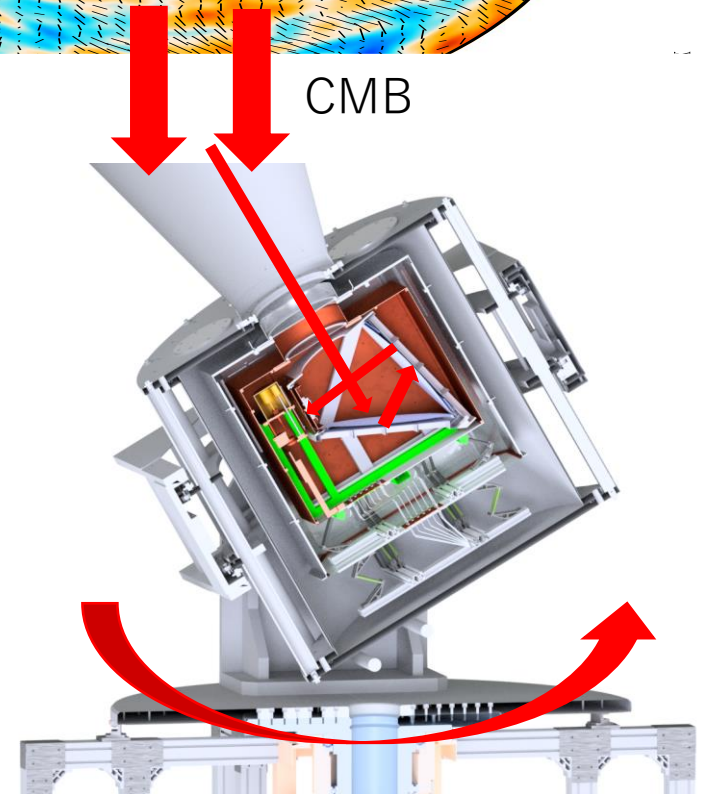
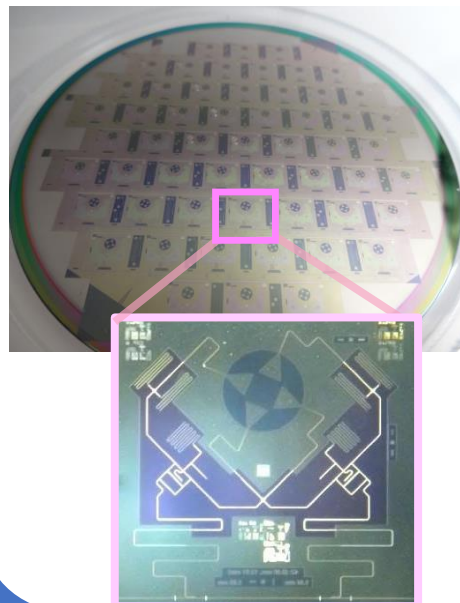


CMB

読み出し回路



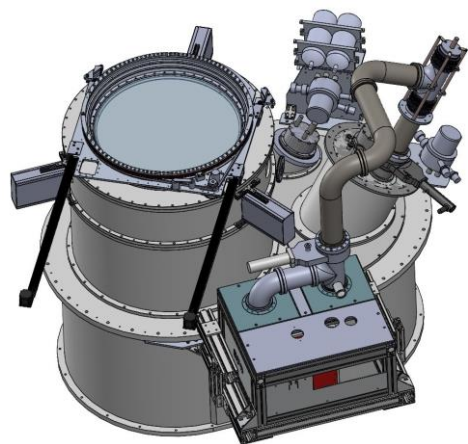
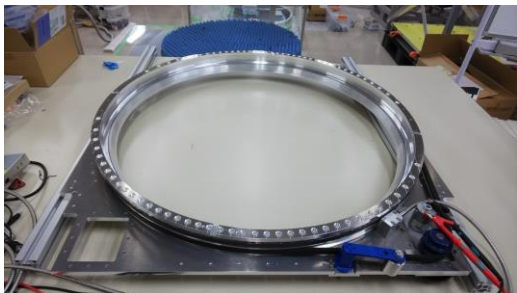
超伝導検出器



# Simons Observatory

- チリ、アタカマ高地で観測
- 3つのSATと1つのLATの望遠鏡群
- 世界最大の検出器数での最高感度の測定

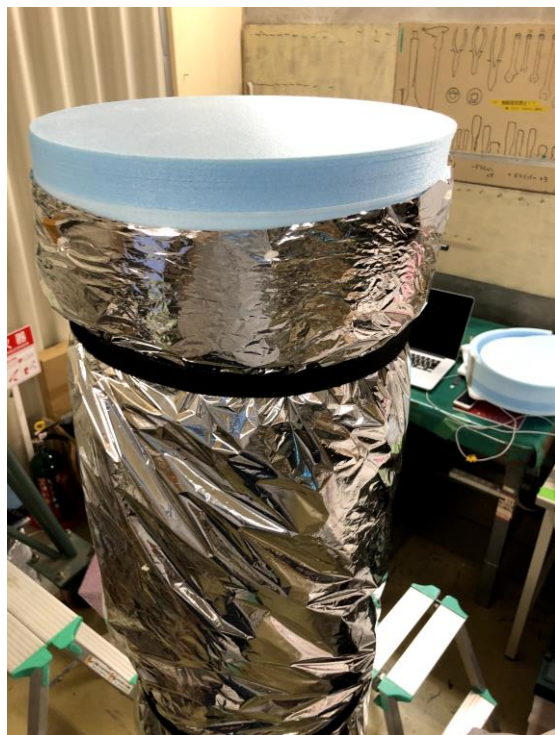
偏光校正装置



# DOSUE-RR

- 京大内でダークマター探索
- 熱ノイズの低減に成功

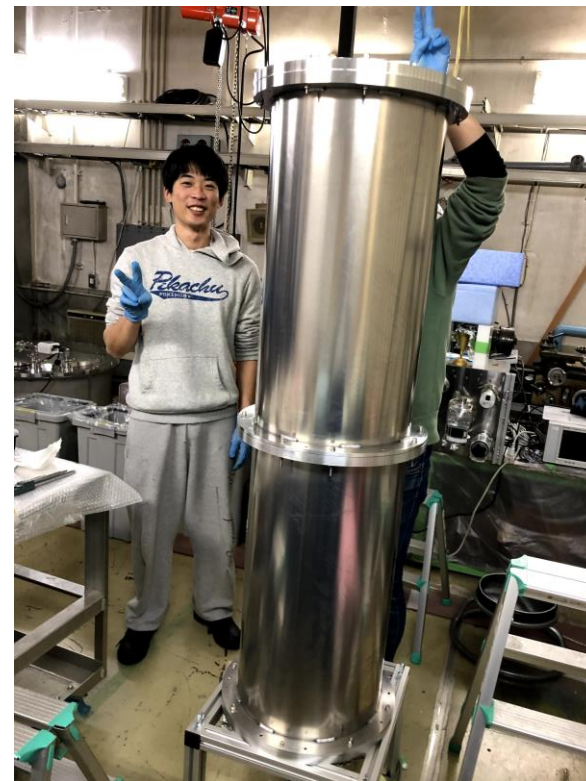
熱の流入を防ぐ



熱の反射を防ぐ

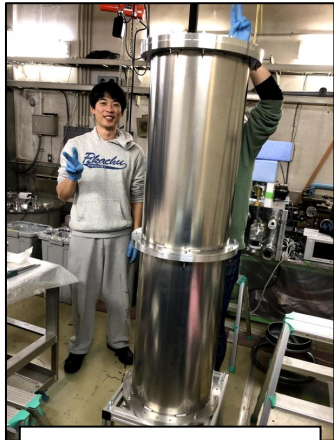


信号の入り口

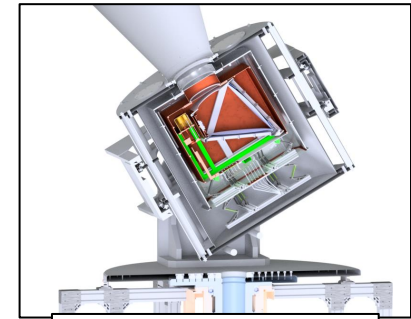


CMBグループは、2つのCMB偏光観測実験とダークマター探索実験で、宇宙創生を支配した物理法則の解明を目指している！

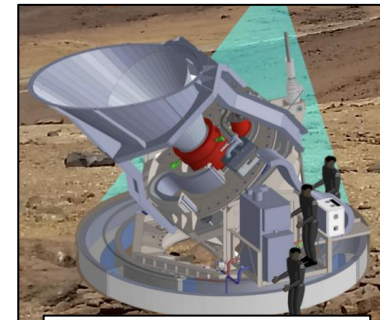
自然の階層性（ウロボロスの蛇）  
 Layer Structure of Nature (Snake of Uroboros)



DOSUE-RR



GroundBIRD



Simons Observatory

(by Glashow)



T2K / SK ・ HKグループ実験紹介

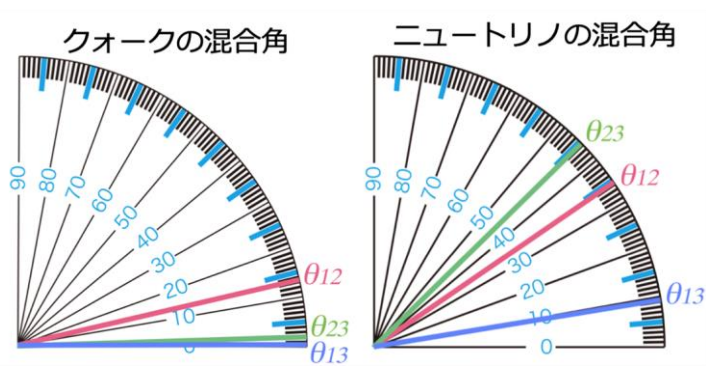
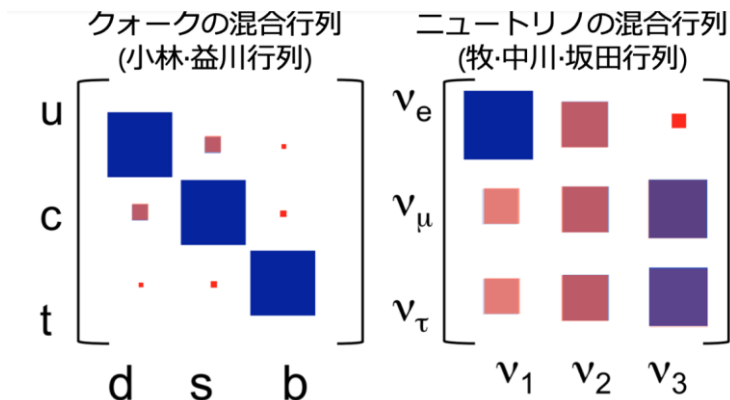
# ニュートリノの不思議な性質

クォークと比較して**フレーバー固有状態**と**質量固有状態**が大きく混合している！

=相互作用のしかた = 時間発展のしかた

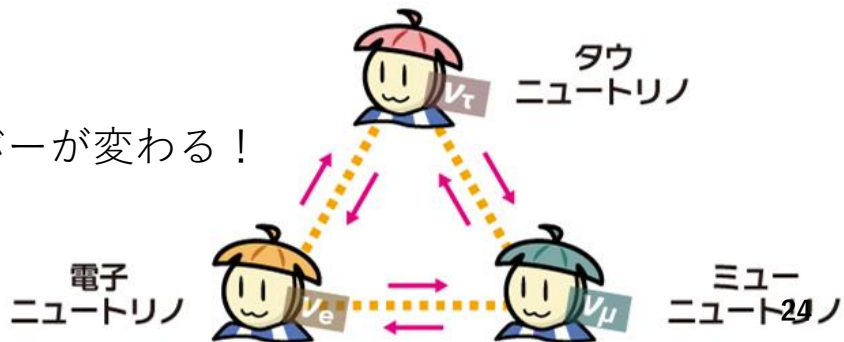
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & & \sin \theta_{13} \\ & 1 & \\ -\sin \theta_{13} & & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

混合行列



## ➡ ニュートリノ振動

- ・ニュートリノは時間発展によってフレーバーが変わる！
- ・ニュートリノ振動の発見(2015)

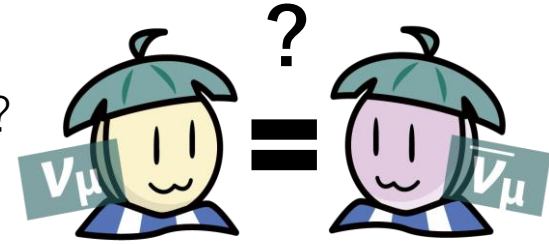




## ニュートリノ振動を見ると何が分かる？

- ・ ニュートリノと反ニュートリノでは振動のしかたが違うかも？

= CP対称性の破れ



- ➡ 現在の宇宙の物質を作ったのはニュートリノかも (Leptogenesis) ?

物質と共に対生成されたはずの反物質は宇宙を見渡してもほとんど見つからない  
反物質を減らして物質を増やしたのがニュートリノかも

- ・ ニュートリノの混合はどの程度？

ニュートリノ混合角  $\theta_{23} = 45^\circ$  かも？

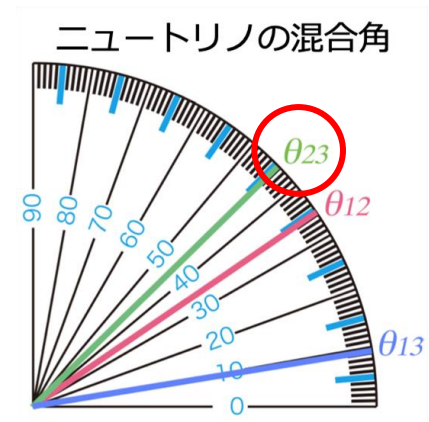
= 質量固有状態のニュートリノ3は

ミューニュートリノとタウニュートリノのちょうど半分ずつの混合

- ➡ そうさせる未知のメカニズムがあるかも？

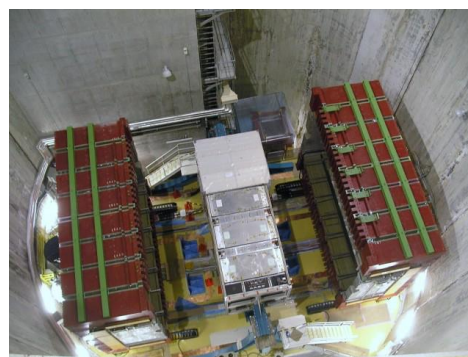
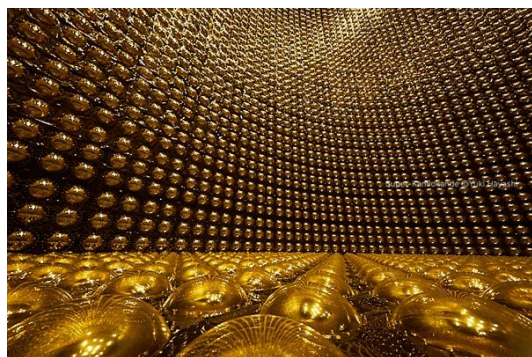
- ・ ニュートリノは本当に3種類だけ？

未知のニュートリノ (ステライルニュートリノ)  
に振動しているかも？



# どうやってニュートリノ振動を見る？：T2K実験

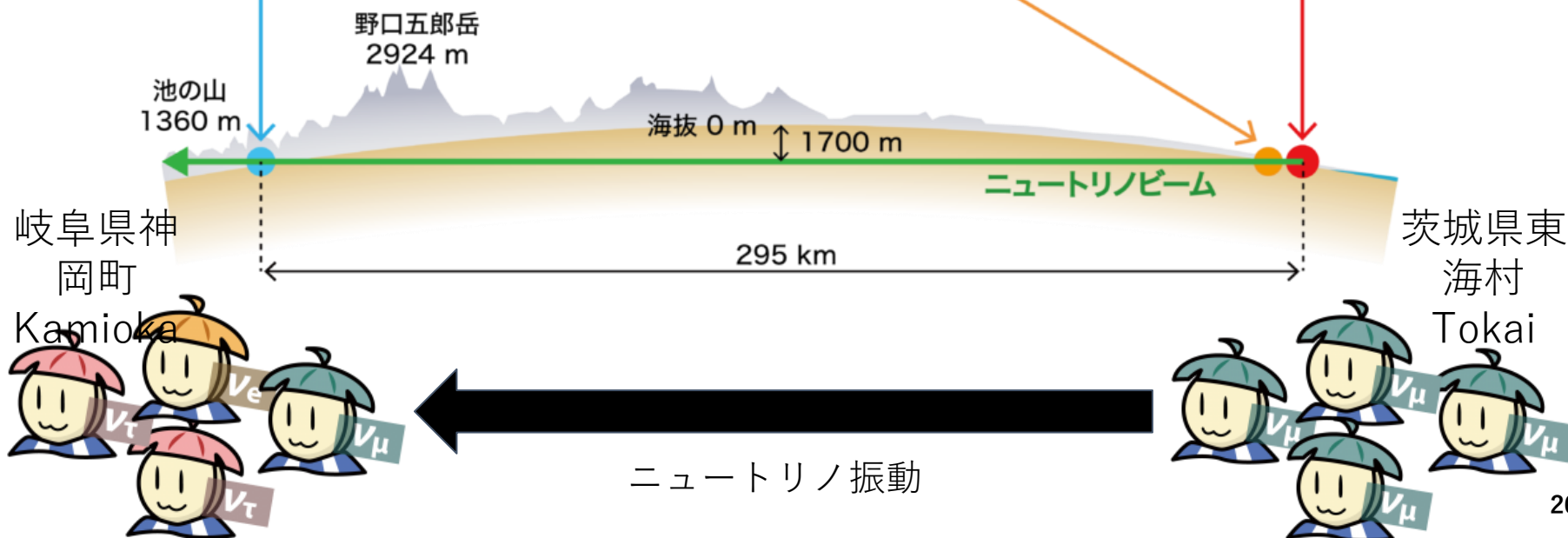
ニュートリノビームを2箇所で測定してフレーバーの変化を観測！  
京都大学はビーム・検出器の両方に貢献



スーパーカミオカンデ

前置検出器

J-PARC

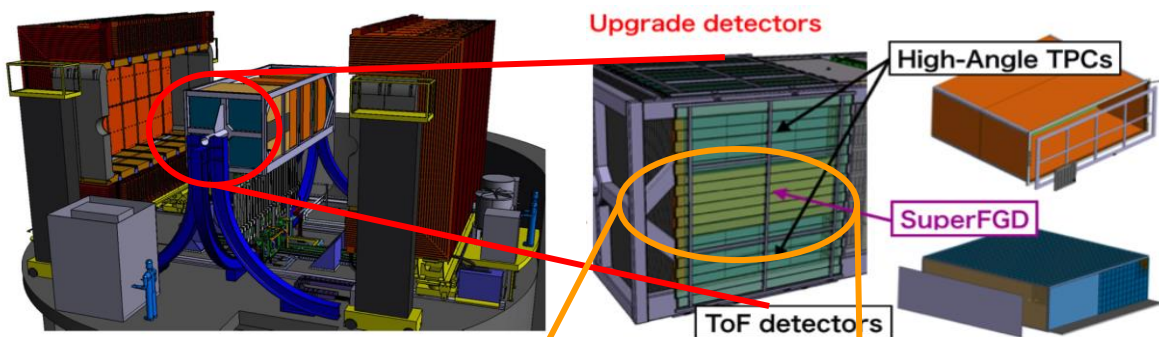


# 前置検出器ND280アップグレード計画

更なる精密測定のため前置検出器のアップグレードが進行中

新飛跡検出器SuperFGDの開発

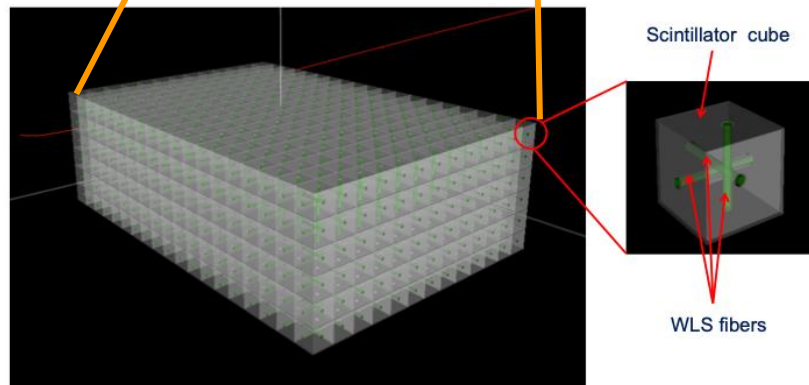
- 1 cm角のプラスチックシンチレータを200万個を積み重ねた構造
- 6万本の波長変換ファイバーで信号を読み出す



シンチレータ検査システム

- 使用するシンチレータの選別
- 組み上げ作業の検証

が京都大学で進行中！



SuperFGD検出器

# スーパーカミオカンデ検出器

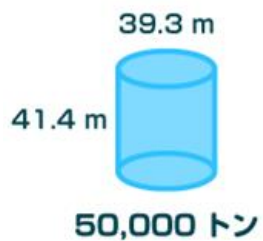
約5万 t の純水を湛える水Cherenkov検出器

➡ 水中を走る荷電粒子が発するCherenkov光を約1万本の光電子増倍管（PMT）で捉える

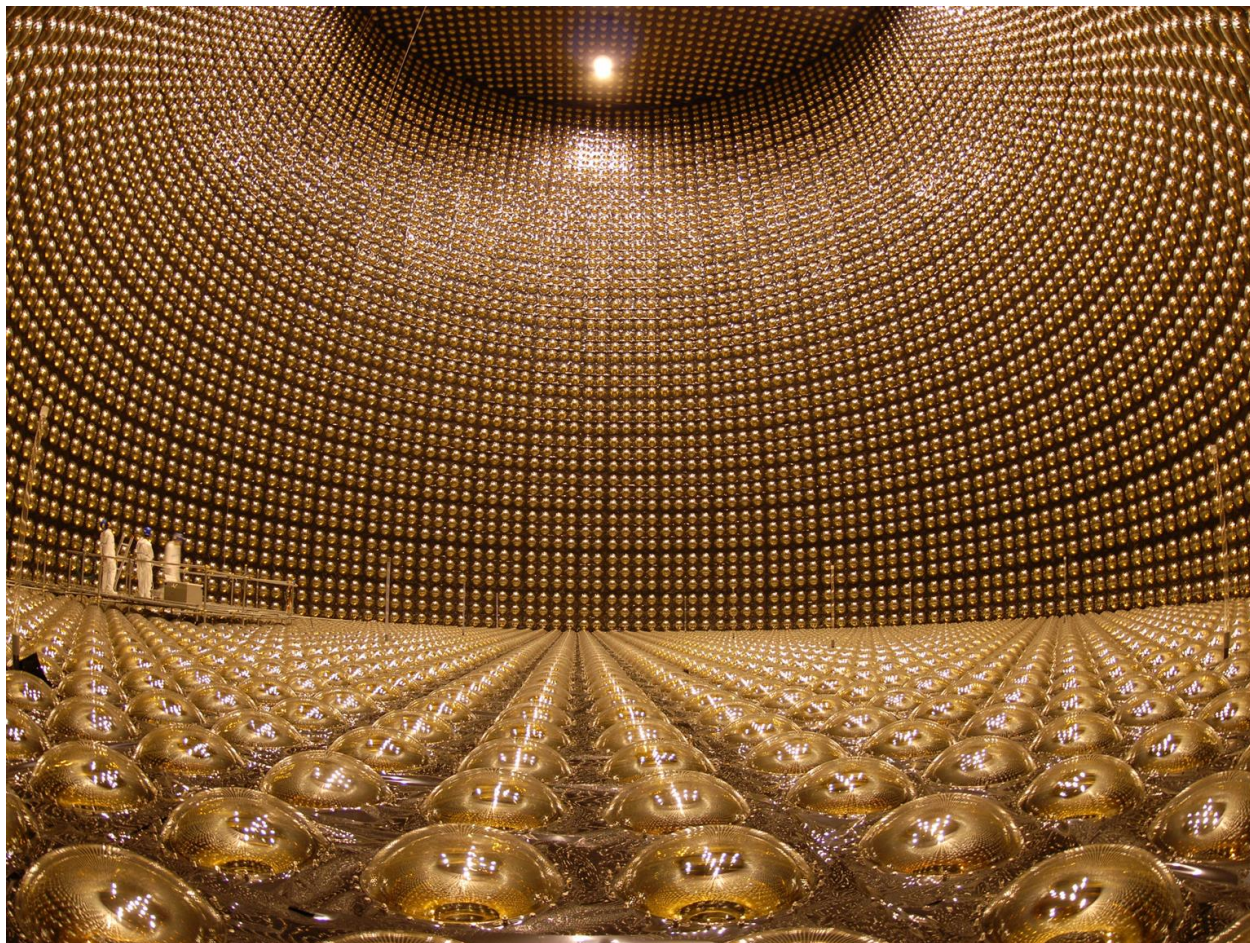
2020年

純水へのガドリニウムGdの  
注入が完了

➡ 中性子の検出効率を向上



スーパーカミオカンデ  
Super-Kamiokande  
1996年 観測開始

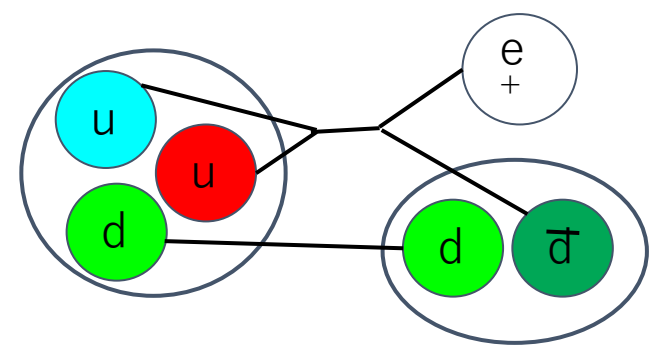


# スーパーカミオカンデで見えるもの

## 陽子崩壊

バリオン数・レプトン数を同時に破る過程

➡ 発見されれば大統一理論 (GUT) の証明



陽子 ➡ π⁰中間子 + 陽電子

## ニュートリノ

・超新星爆発ニュートリノ

➡ 天体モデルの検証

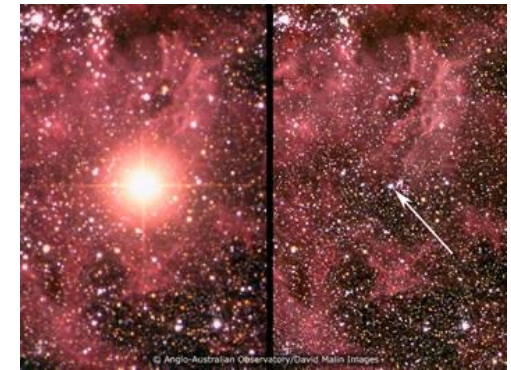
超新星爆発ニュートリノの観測  
(Kamiokande, 2002)



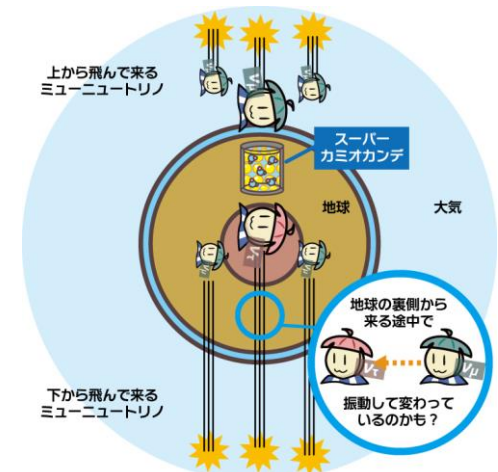
過去の超新星爆発の名残・超新星背景ニュートリノを測定

・加速器ニュートリノ・大気ニュートリノ・太陽ニュートリノ

さまざまな距離飛行したニュートリノ振動の測定から  
ニュートリノ混合角・ニュートリノ質量差がわかる！



超新星SN1987Aの爆発



# ハイパーカミオカンデ計画

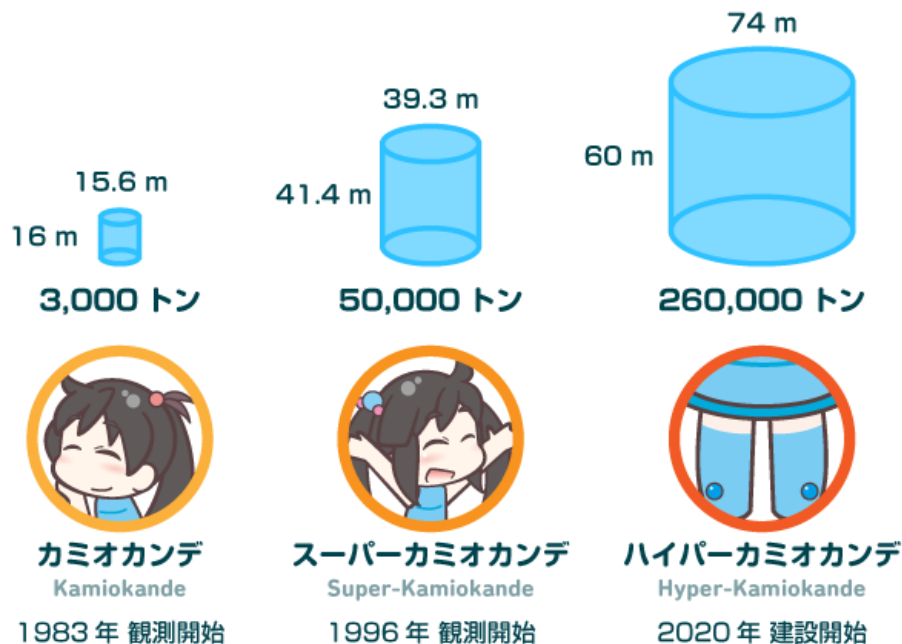
陽子崩壊・ニュートリノ検出の精度向上のため  
スーパーカミオカンデをさらに大型化！

## 有効体積

スーパーカミオカンデ：約 2万 t

10倍！ ↓

ハイパーカミオカンデ：約 20万 t



2021年

ハイパーカミオカンデ用の20 inch PMTの  
納入が開始

- ・ 2倍の光検出効率
- ・ 2倍の時間分解能
- ・ 全部で約4万本(スーパーカミオカンデの4倍)



PMTの性能評価が進行中



# AXEL(あくせる)実験紹介

# ニュートリノの謎

- ・ 異常に軽い質量



➡ ニュートリノが マヨラナ粒子  
= 粒子であり反粒子である

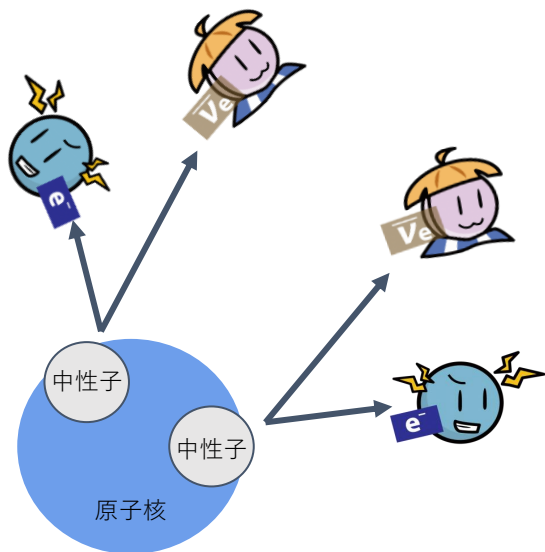


ニュートリノがマヨラナであれば

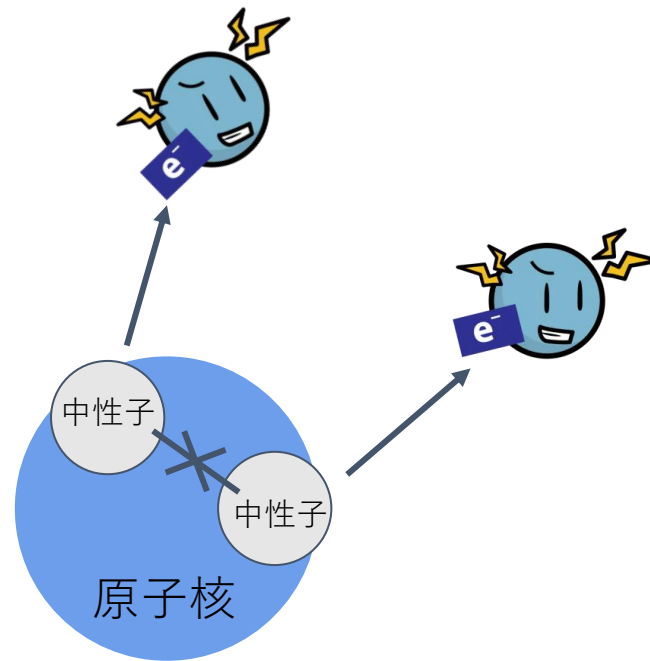
- ・ ニュートリノ質量が小さい理由
- ・ 物質優勢の宇宙の謎



# 二重ベータ崩壊



通常の二重ベータ崩壊



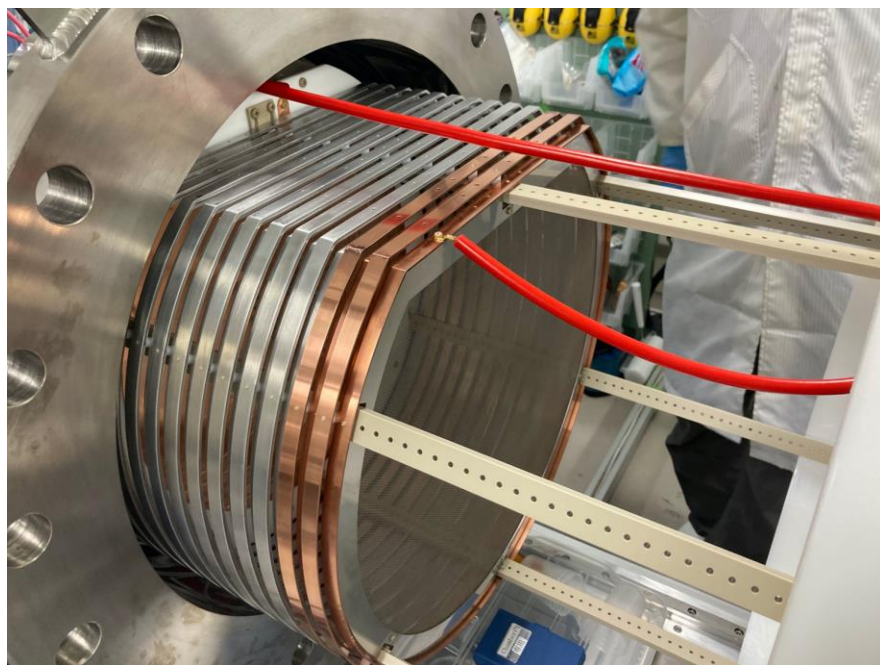
ニュートリノが出てこない二重ベータ崩壊

ニュートリノがマヨラナであれば  
この反応が起こる！

AXEL実験の目的

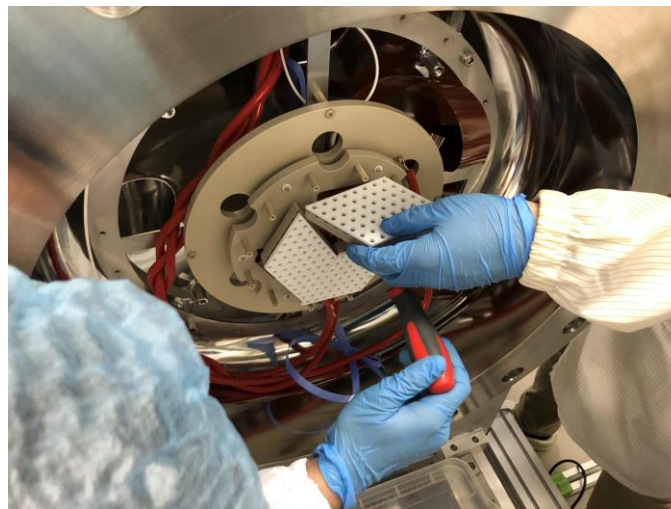
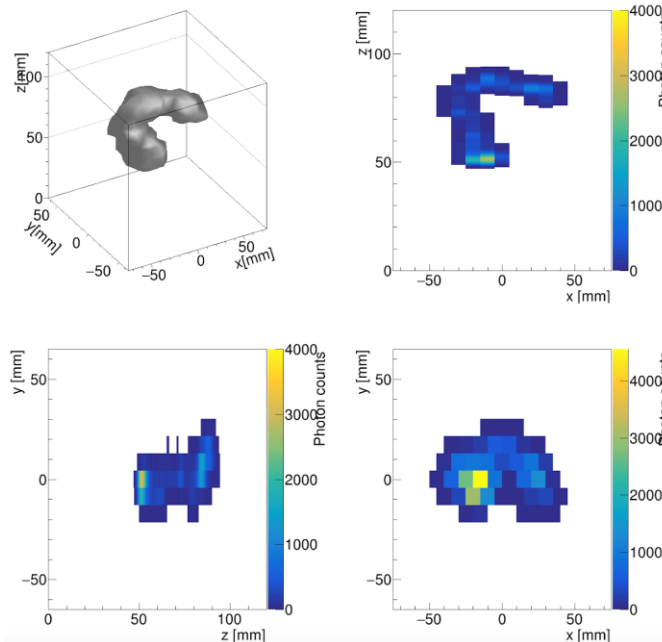
**ニュートリノが出ない二重ベータ崩壊を見つけたい！**

# AXEL180L検出器@京大

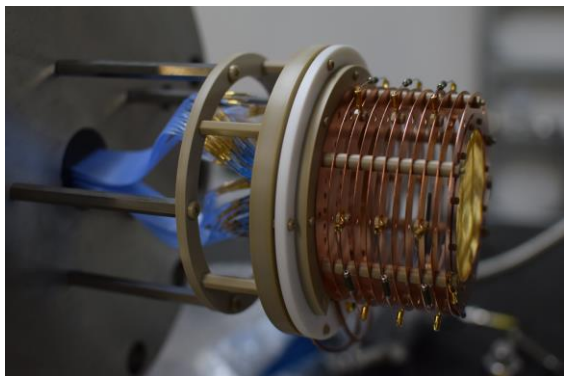


キセノンガスを使用した  
世界最高感度の検出器を目指す

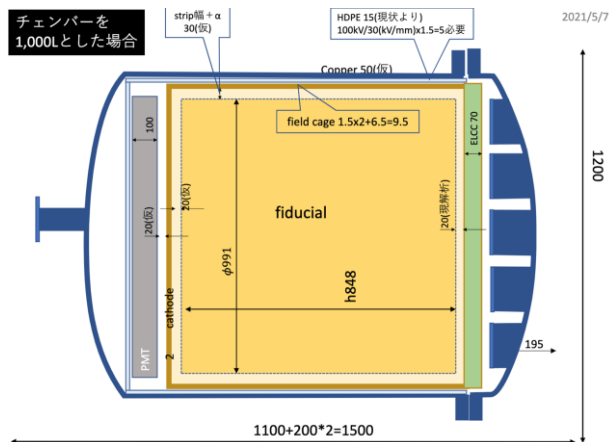
AXEL独自開発の検出器で  
大質量・高エネルギー分解能・低バックグラウンド



# ロードマップ



2014-2018  
10L試作器

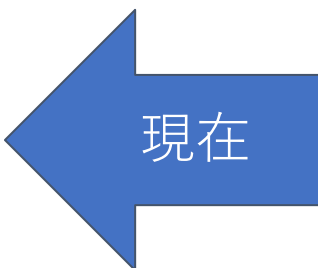
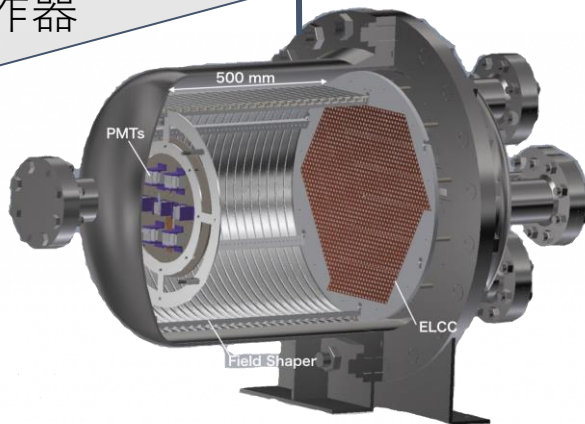


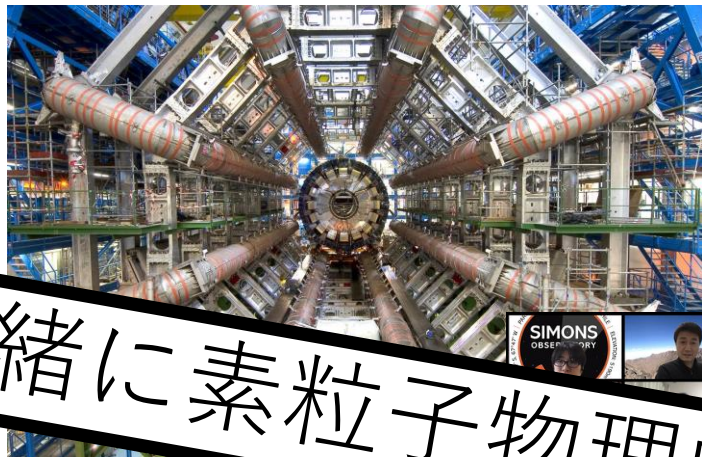
2023-  
1000L検出器  
@神岡

1 ton, 10 ton  
への大型化

2018-2021  
180L試作器

二重ベータ崩壊の探索へ！！





一緒に素粒子物理学を研究しましょう！

