

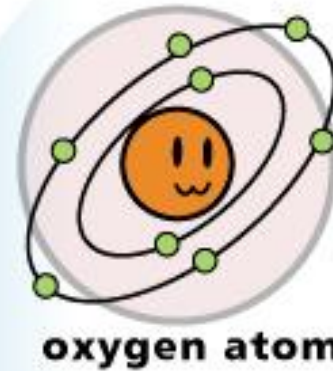
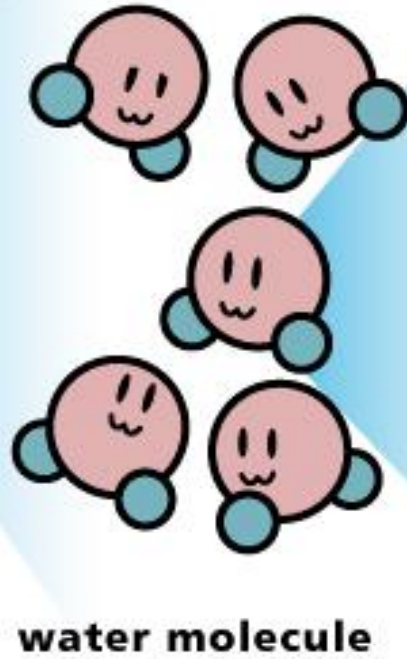
# 素粒子物理学 (高エネルギー物理学) 研究室紹介

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**

YUKI A.



陽子: 分解できる  
⇒ 素粒子じゃない

電子: 分解できない!  
⇒ 素粒子

# 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)

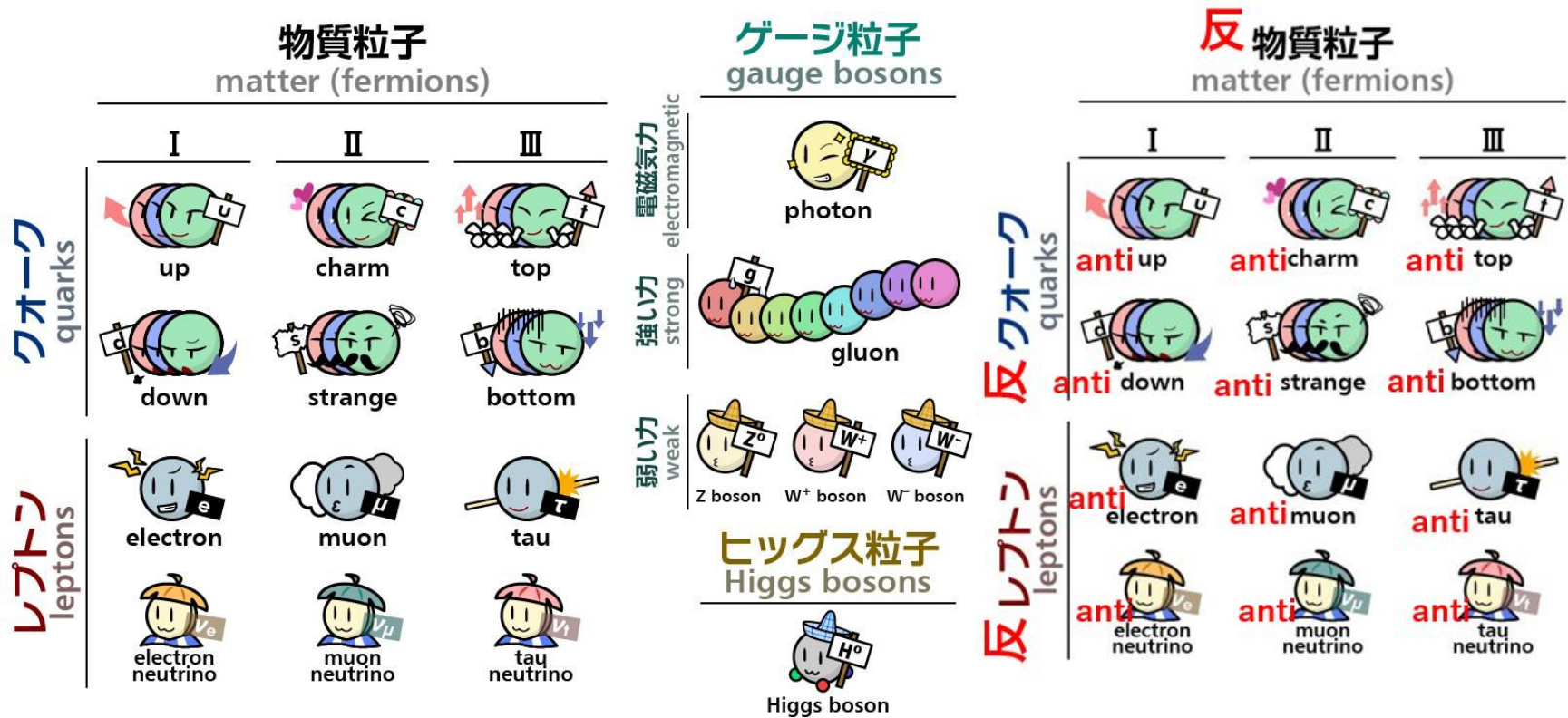


この宇宙

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



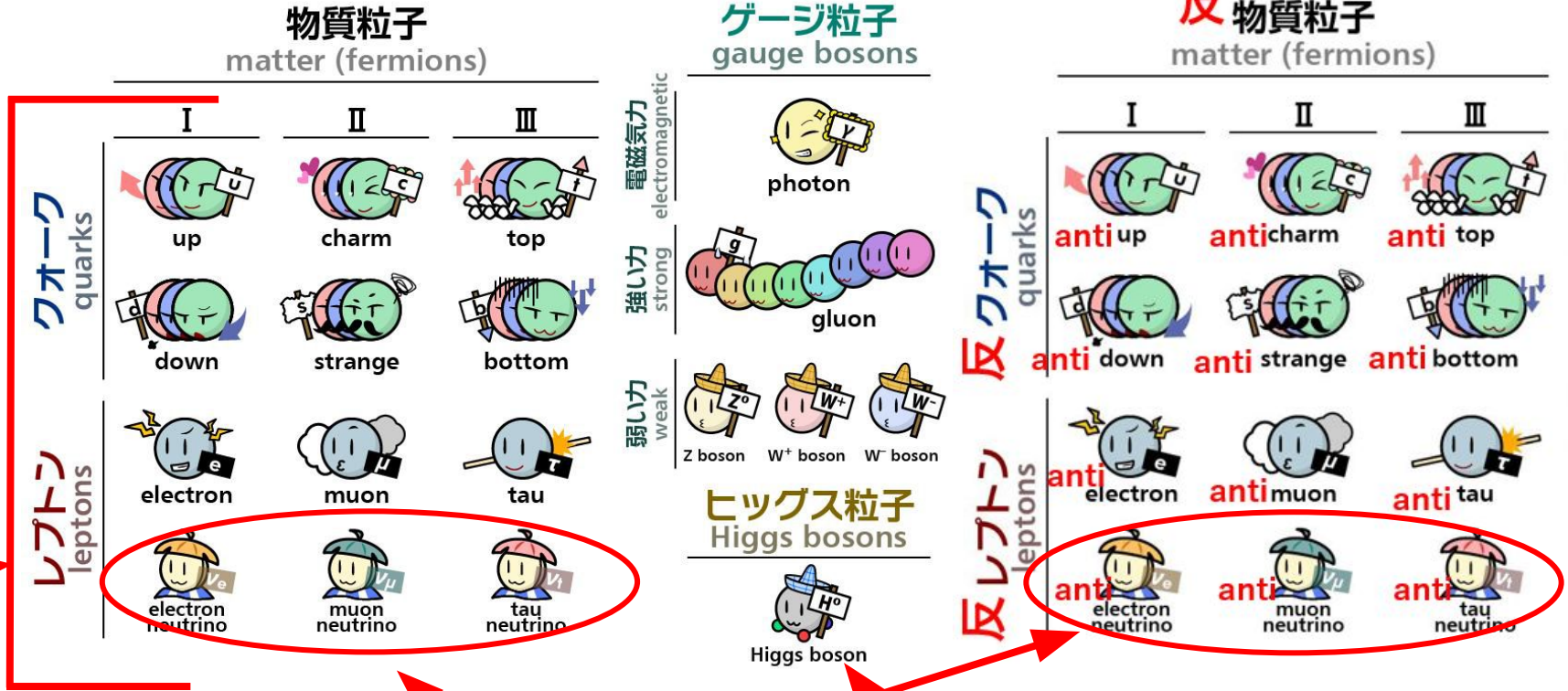
現在わかっている素粒子、力の法則をまとめて記述

**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？

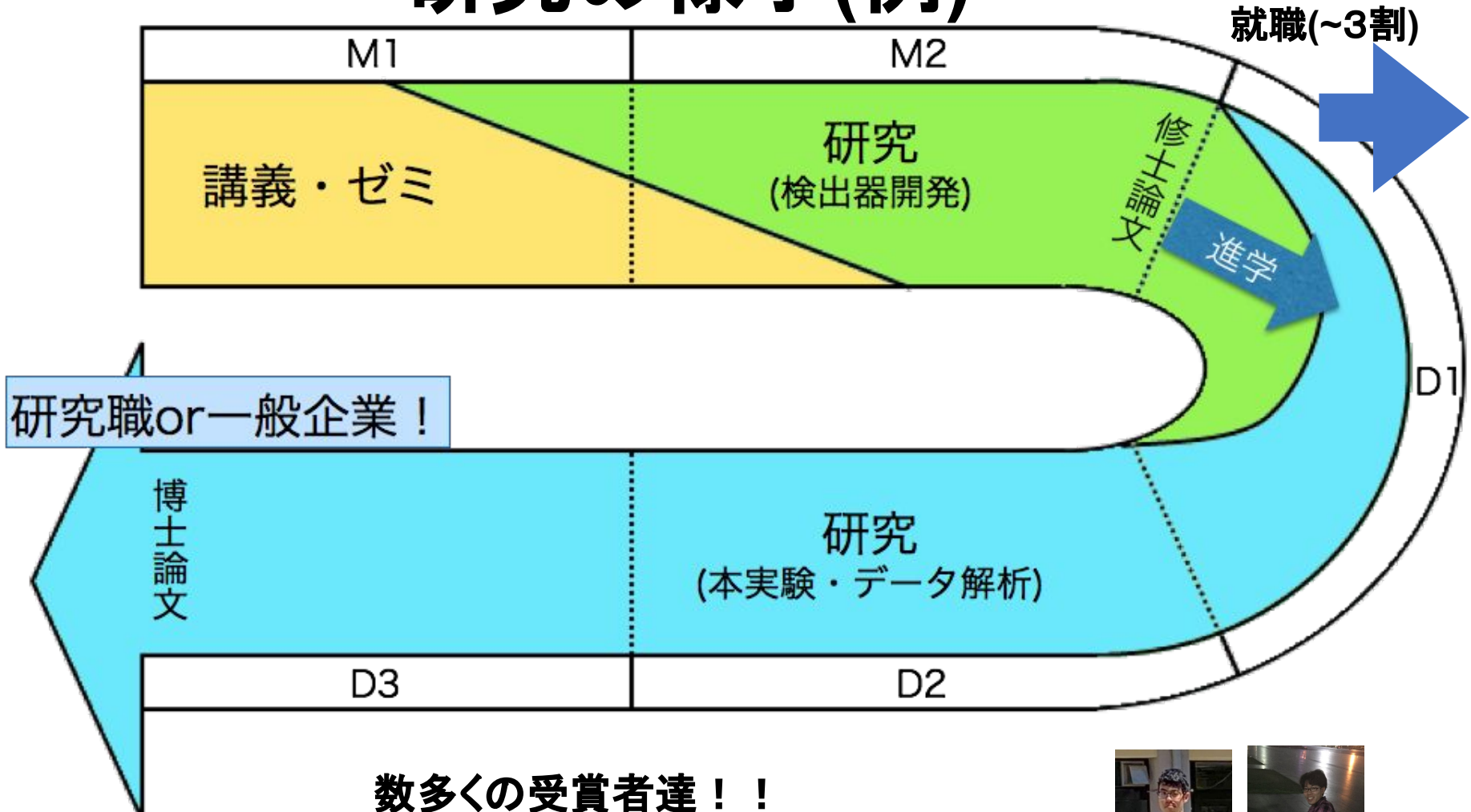
他の素粒子はある？

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)

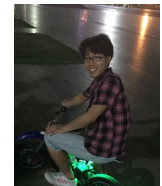


## 数多くの受賞者達！！



2020年度  
測定器開発優秀論文賞  
池満(当研究室OB)

2021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 野口(OB)・平本(OG)  
2021年度 ATLAS Outstanding Achievement Award 隅田(助教)  
2020年度 猿橋賞 市川(当時准教授)  
など

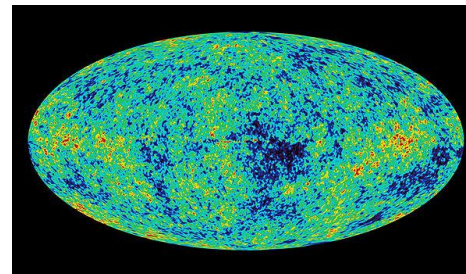


2021年度  
測定器開発優秀修士論文賞  
大塚(OB)・谷(OB)

# この後4つの実験グループを紹介



ATLAS実験



CMB観測実験



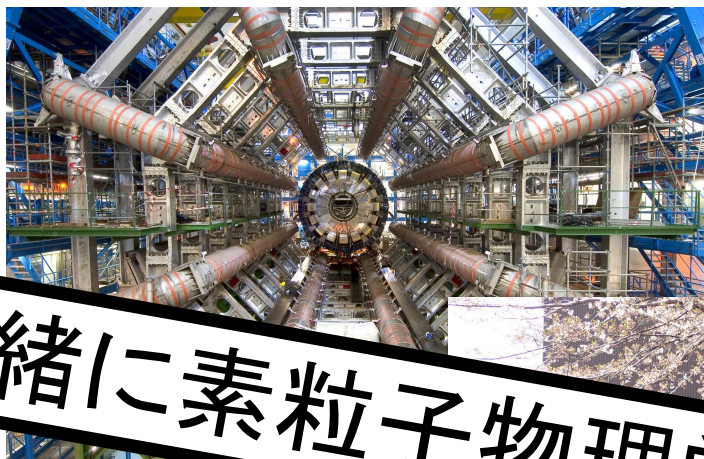
T2K/SK・HK実験



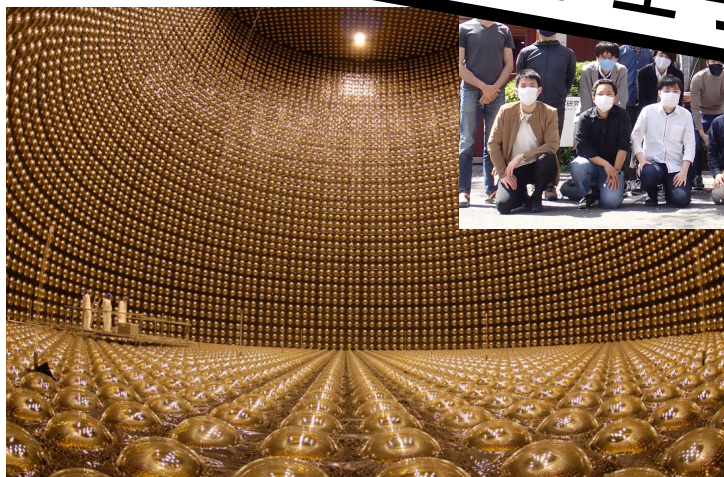
AXEL実験

ご質問はZOOM上でもGoogle Formでもお気軽に





一緒に素粒子物理学を研究しましょう！

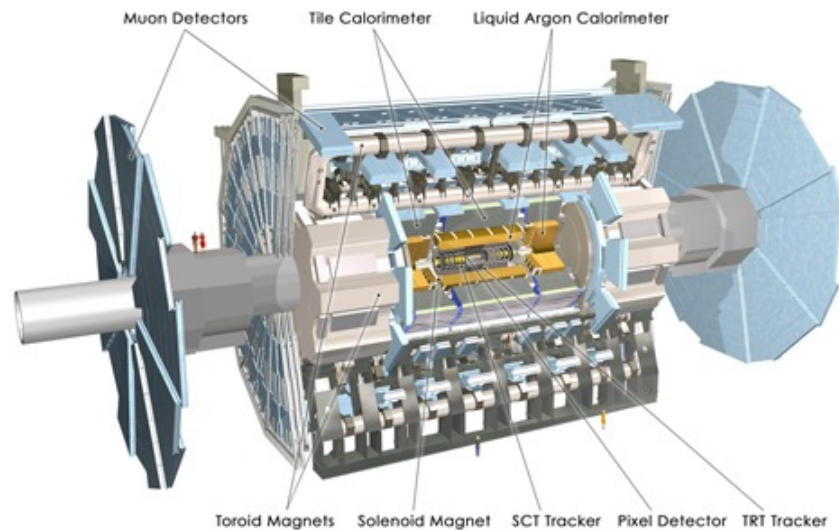




# ATLAS 実験紹介

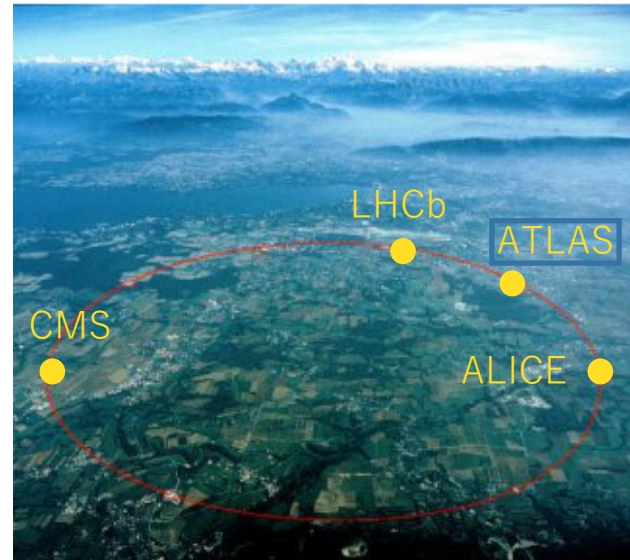
# ATLAS 実験 @ LHC

- 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

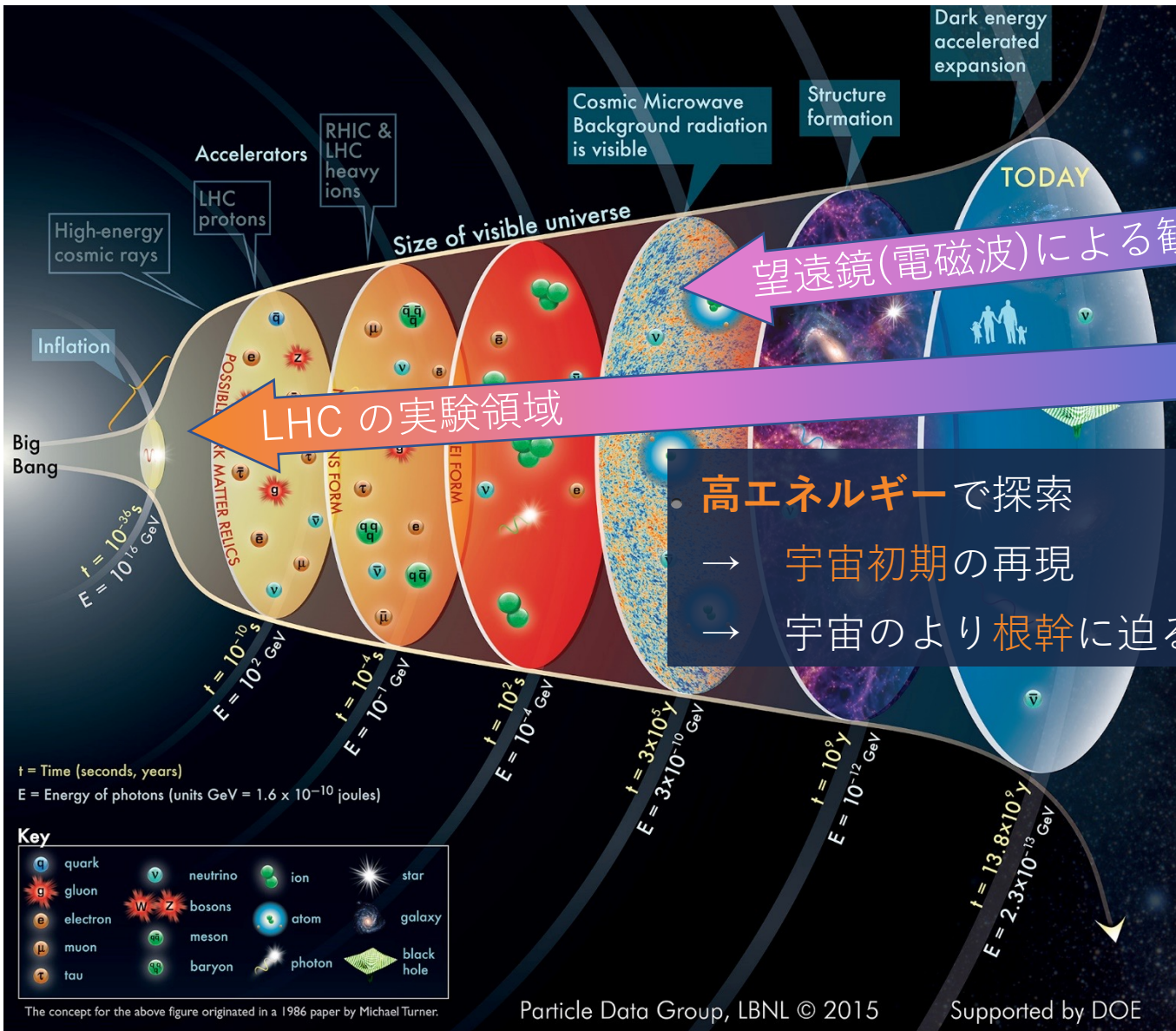
(高さ22 m, 全長 44 m)



LHC 加速器

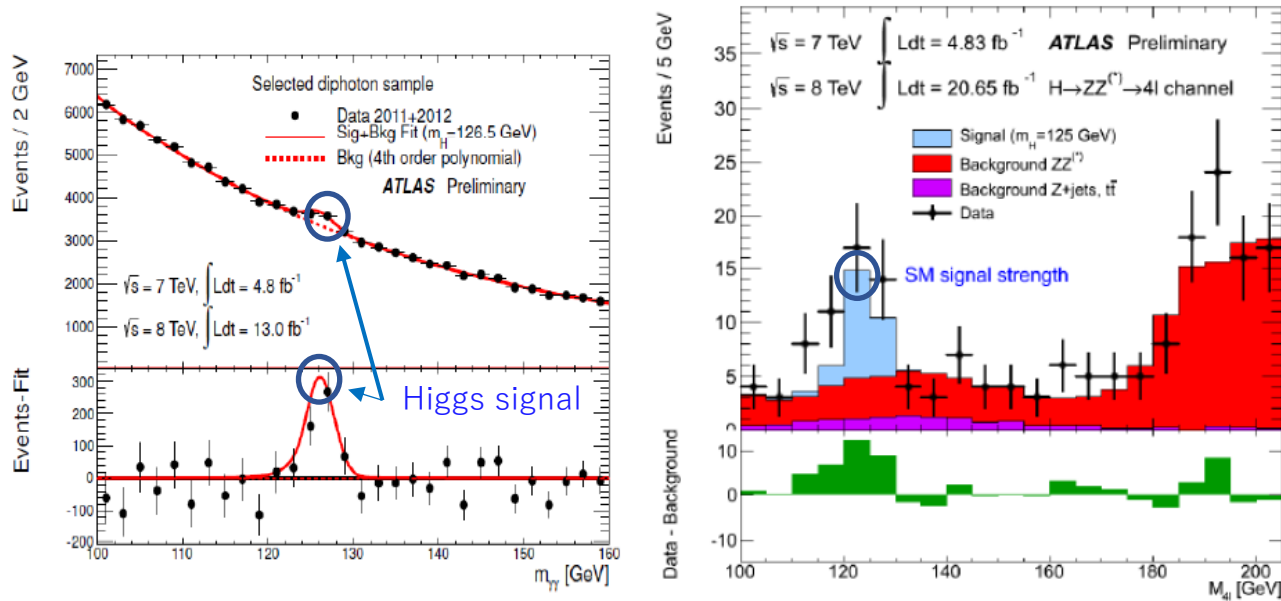
(周長 27 km, **最大重心衝突エネルギー 14 TeV**)

# ATLAS 実験 @ LHC



# ヒッグス粒子の発見

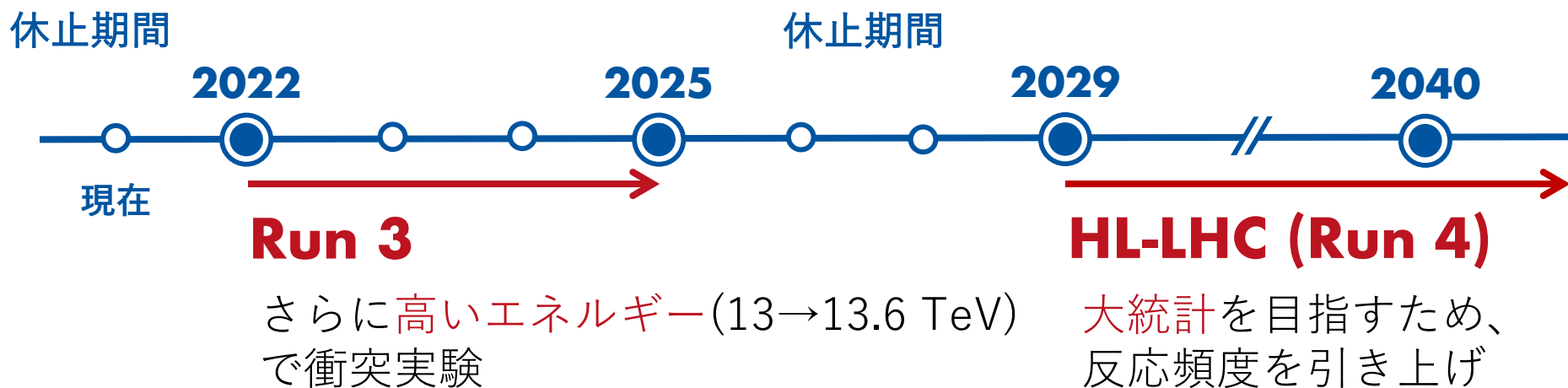
- 2012年、LHCでヒッグス粒子を発見
- 2013年、ノーベル賞受賞！



- 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

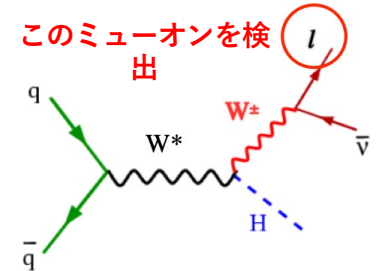
→ 検出器の性能を左右する重要なシステム

### ● ハードウェアトリガー

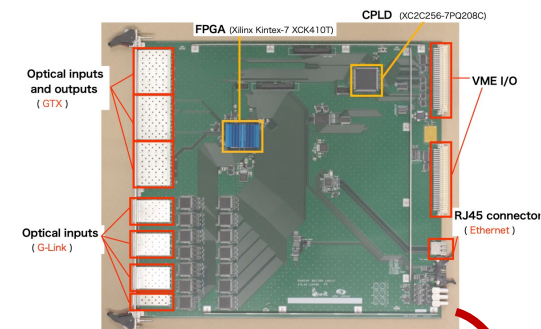
京大グループは主に**ミュオントリガー**に注力  
ミュオンの信号を使ってヒッグス粒子や新粒子の生成を確実に捉える

### ● 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

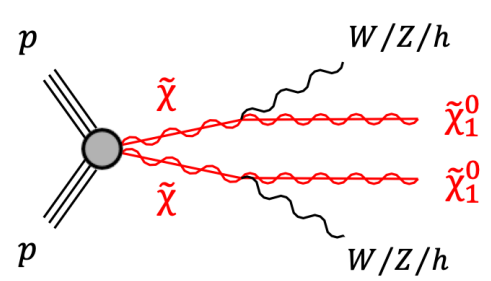


# 京都 ATLAS グループで研究していること

○ 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

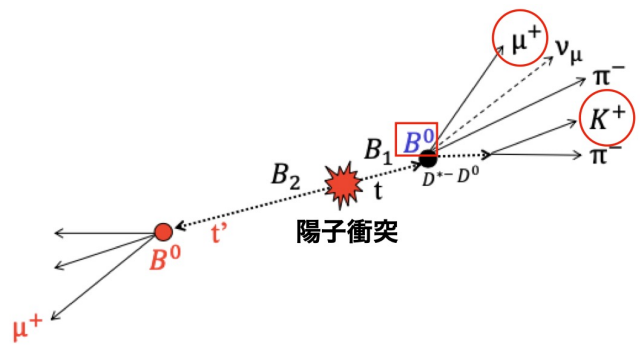
自分が興味を持ったテーマに対して、様々な解析が行われている

例)



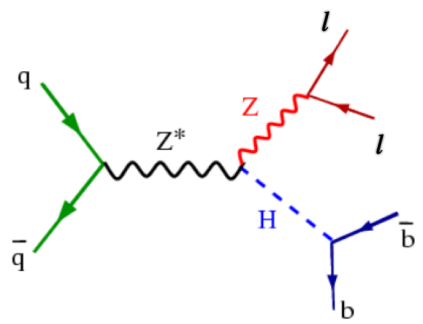
## 超対称性粒子(SUSY)の探索

Dark Matter の候補粒子  
超対称性理論の実証  
→ 力の統一、ヒッグス質量の問題の解決



## ベルの不等式の検証

2つのB中間子のフレーバーを測定  
ベルの不等式が成り立つか調べる  
→ 量子力学の検証



## ヒッグス粒子のbクォークへの崩壊測定

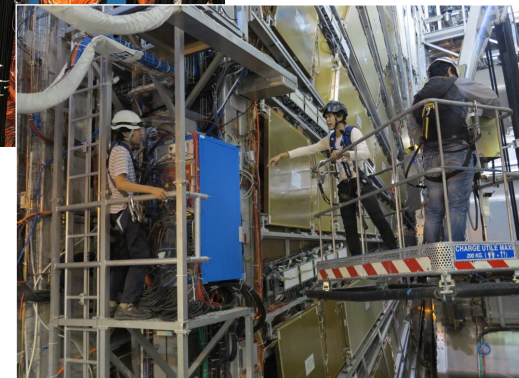
ヒッグス粒子の結合の精密測定  
→ 標準模型とのずれから新物理を探る

# 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

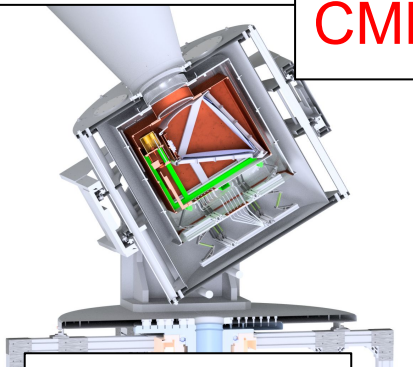


# CMB実験紹介



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！

CMB観測

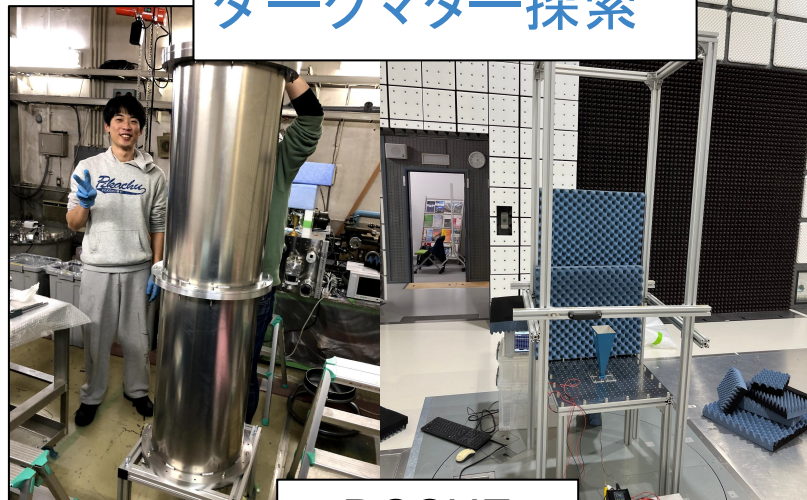


GroundBIRD



Simons  
Observatory

ダークマター探索



DOSUE

共通の電波観測技術で  
違う観測ができる



宇宙からの光の精密観測

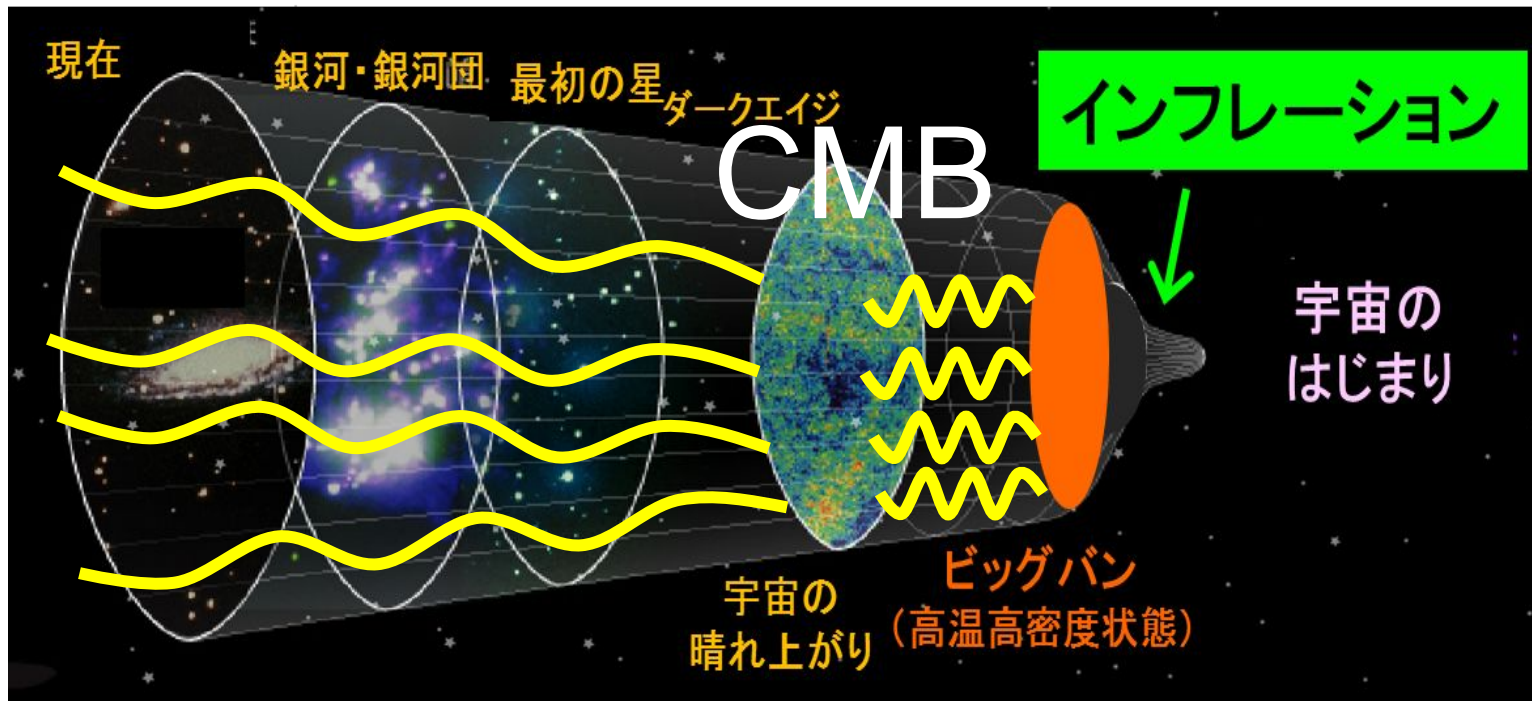


未発見粒子の直接探索



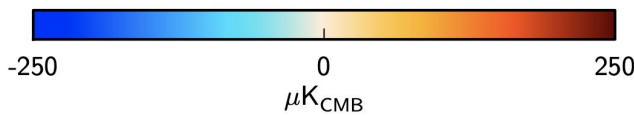
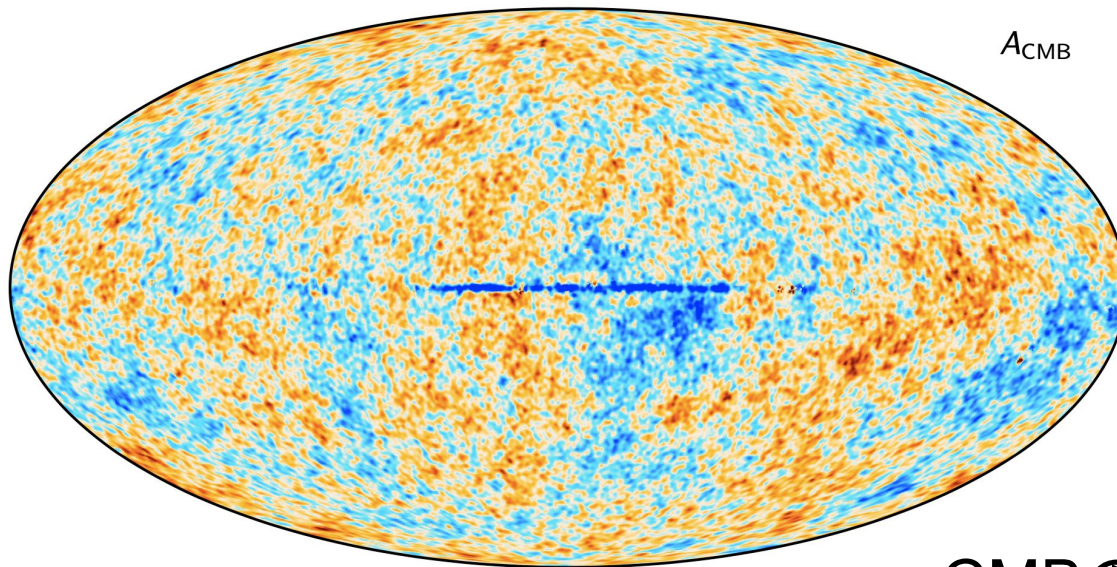
# CMB(Cosmic Microwave Background radiation)とは？

- 宇宙背景放射と呼ばれる、観測できる**最古の光**
- CMBの光は宇宙膨張で引き伸ばされ、今は電波として観測される



# CMB(Cosmic Microwave Background radiation)とは？

- 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( $O(10^{-5})K$ )が存在する



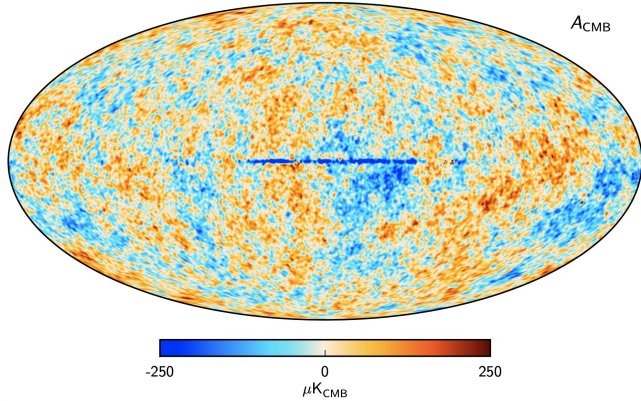
CMBの温度「ムラ」

CMBの温度異方性が宇宙解明の鍵！

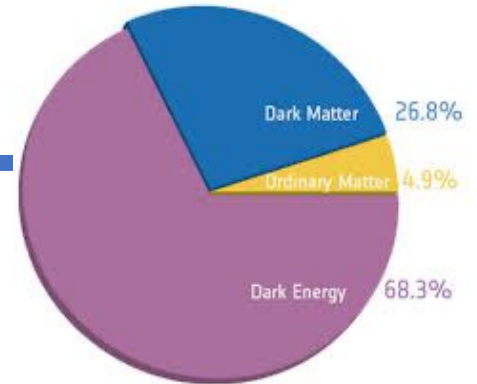
# CMBで何がわかる？

## 無偏光観測

Credit: ESA/Planck Collaboration

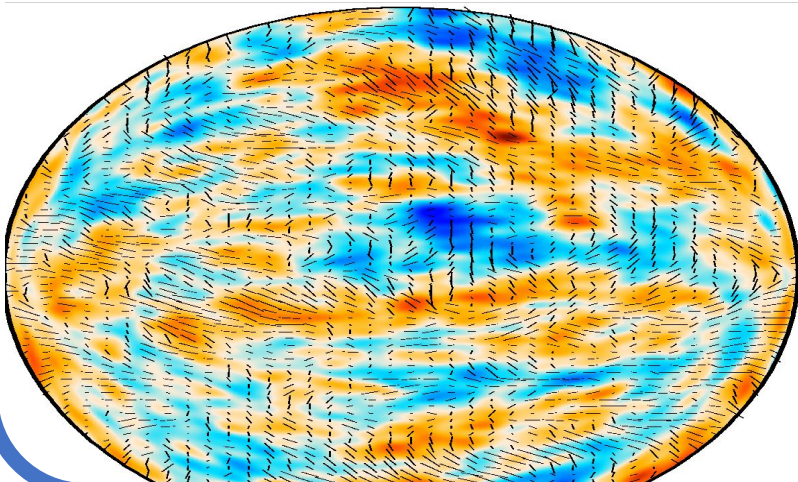


- ビッグバン宇宙論
- 宇宙論パラメータ
  - 宇宙のエネルギー密度の比



## 偏光観測

Credit: ESA/Planck Collaboration

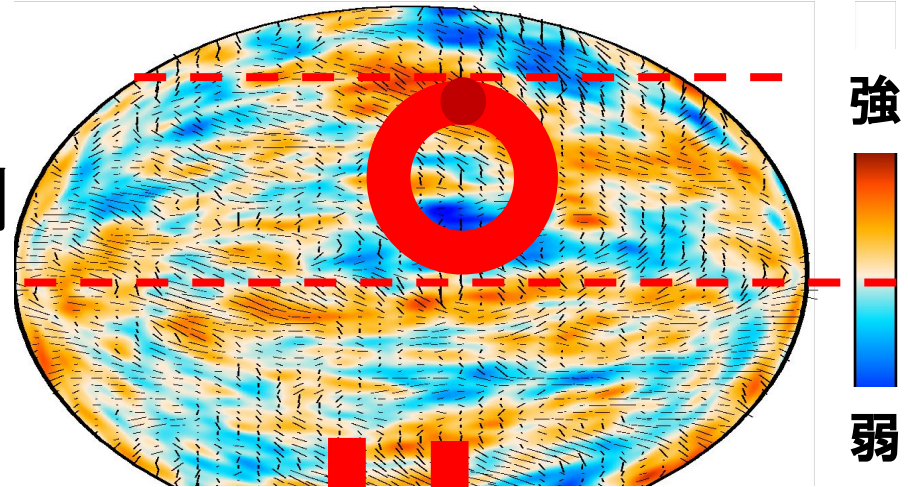


- インフレーション理論
- 重力の量子化
- 重力レンズ効果
- ニュートリノの質量和

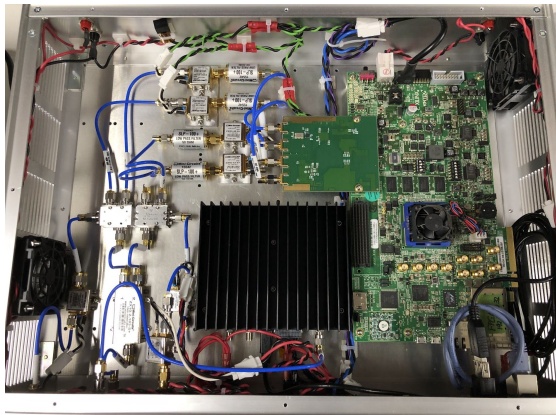


# GroundBIRD

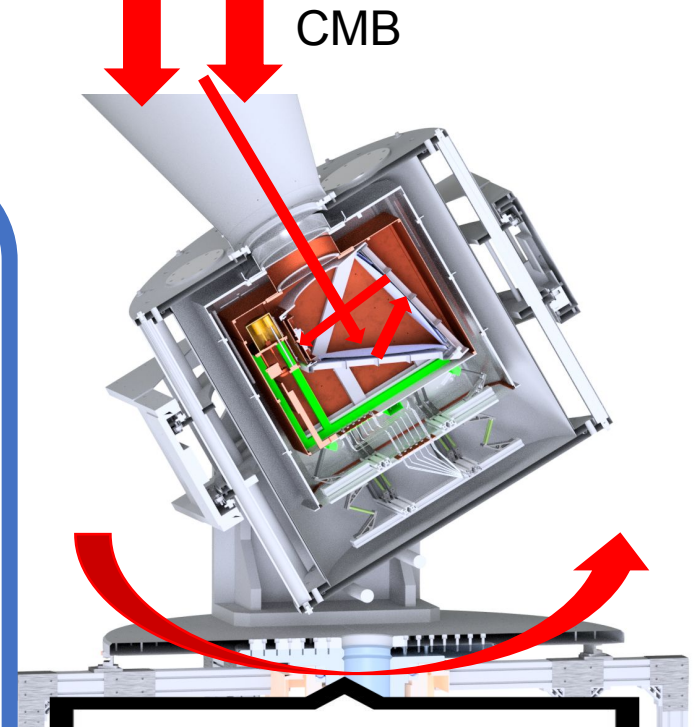
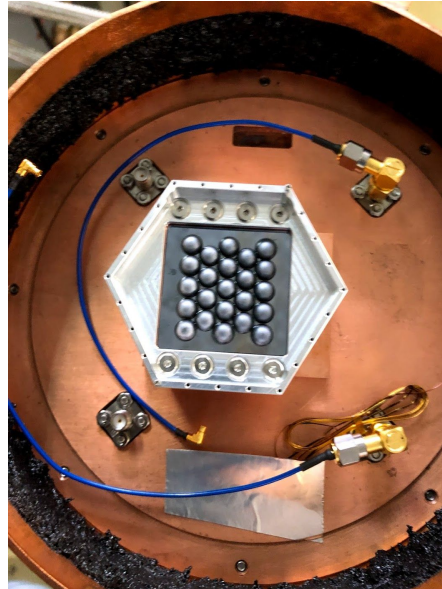
- スペイン、テネリフェ島で観測
- 超高速スキャン(3秒/1回転)
- 全天の40%の観測領域



読み出し回路



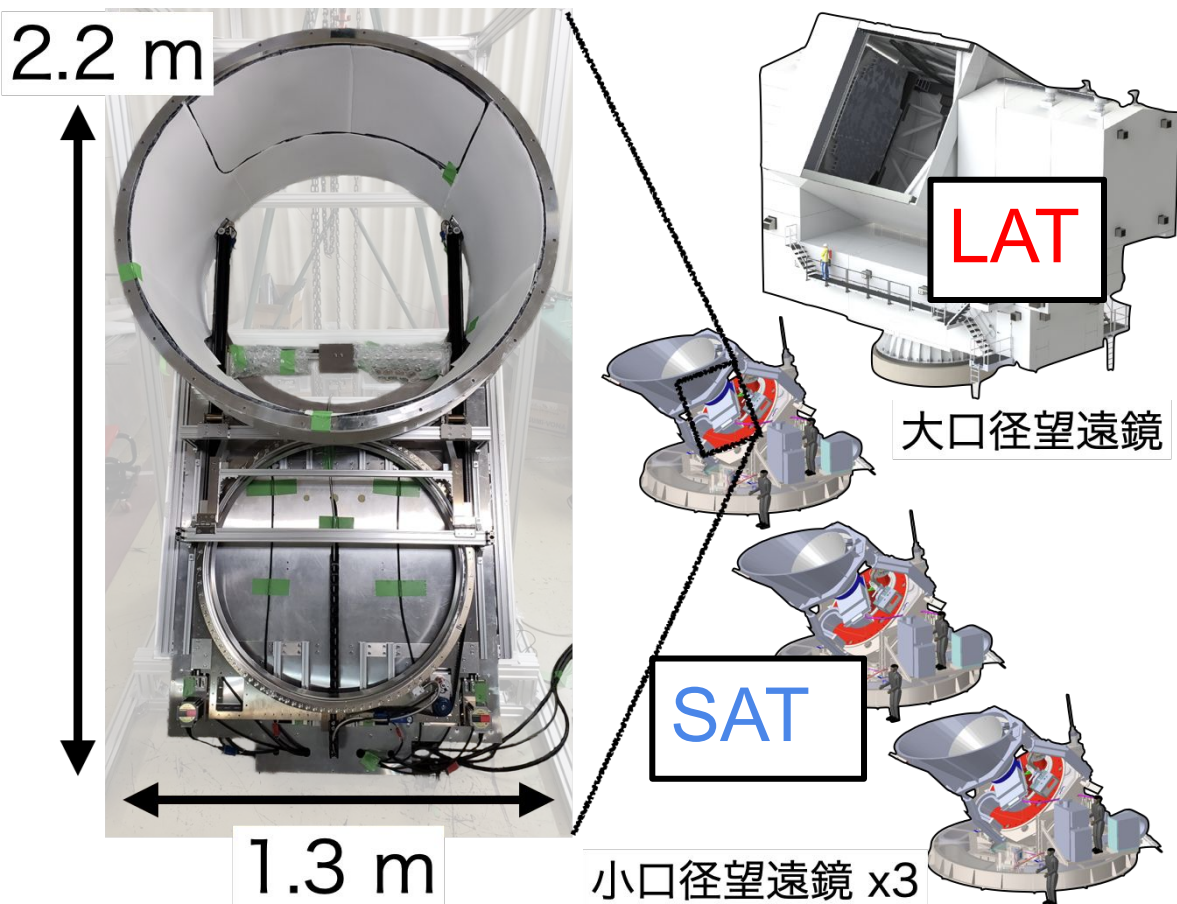
超伝導検出器



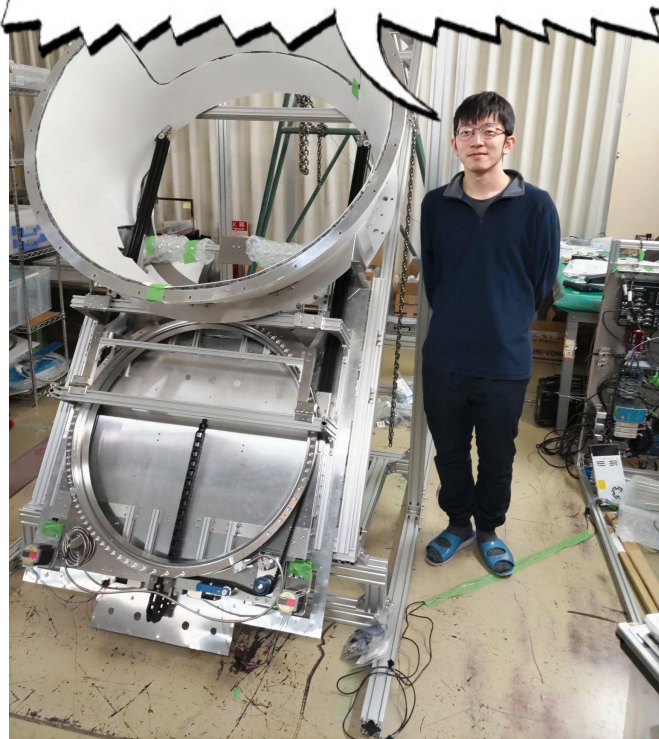
京大の院生も製作に参加!

# Simons Observatory

- チリの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



較正に必要な装置を  
京大内で作成





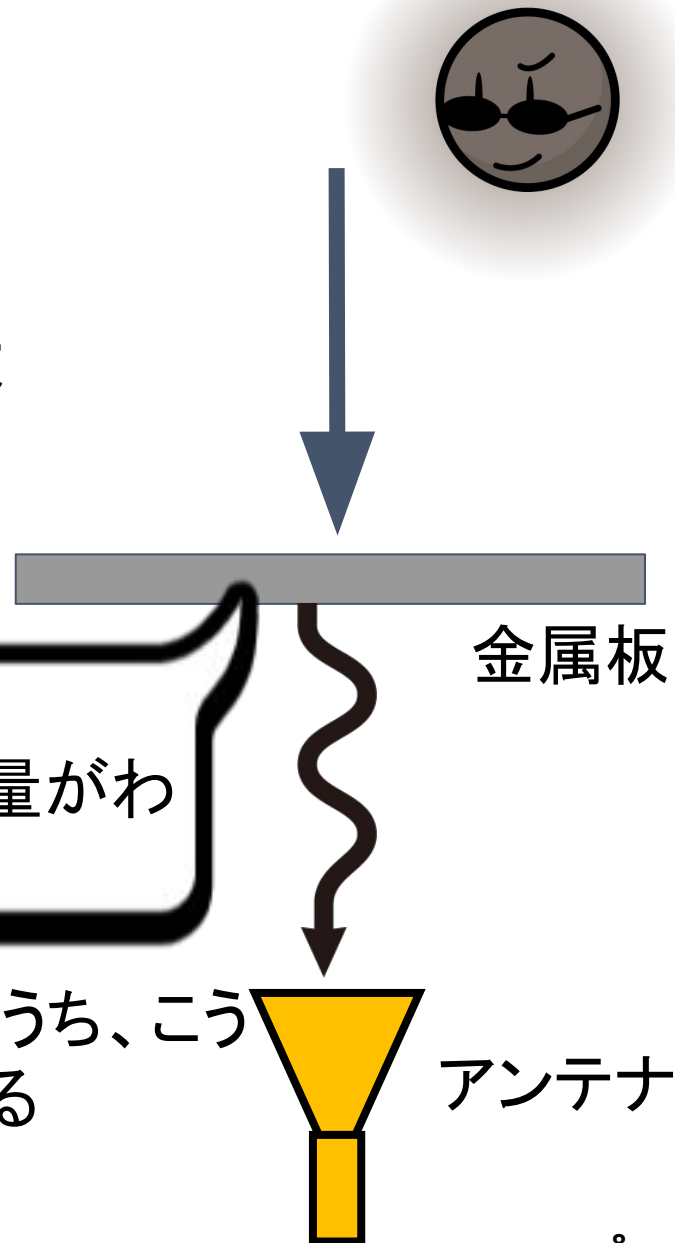
# ダークマター探索実験

- 未発見の物質ダークマターをとらえたい
- 宇宙のエネルギーの4分の1はダークマターだと言われている

金属板で電波に変換  
信号の周波数からダークマターの質量がわかる

$$mc^2 = h\nu$$

理論的に予想されるダークマター候補のうち、こういう反応するのでは？というのを探索する  
(HP-CDM)



# DOSUE-RR (ダークマター探索装置)

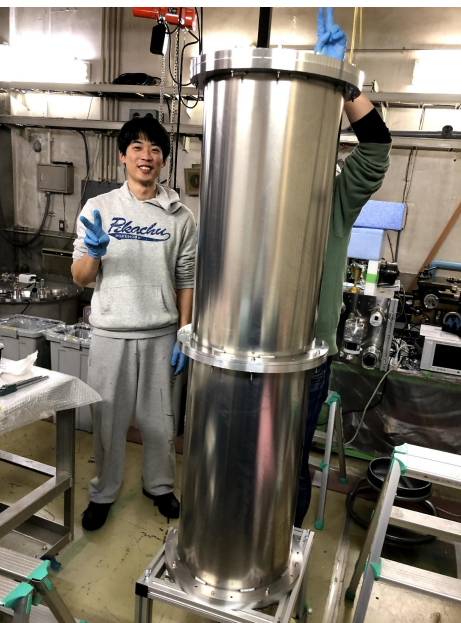
去年のお話...

- 熱ノイズの低減に成功  
→ダークマターの質量に制限を与えて論文を投稿

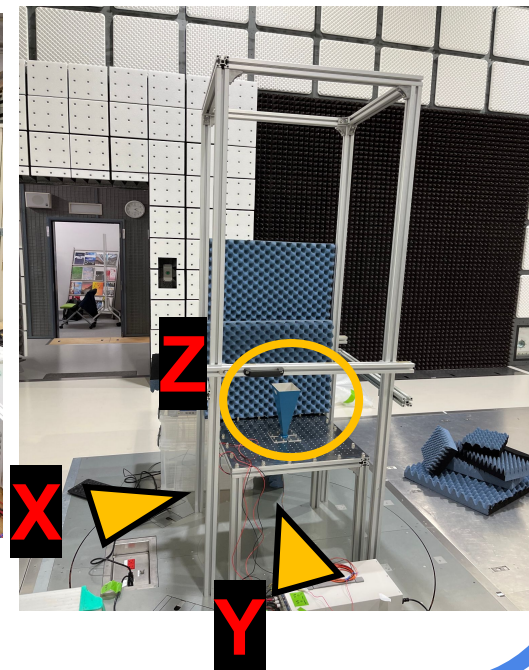
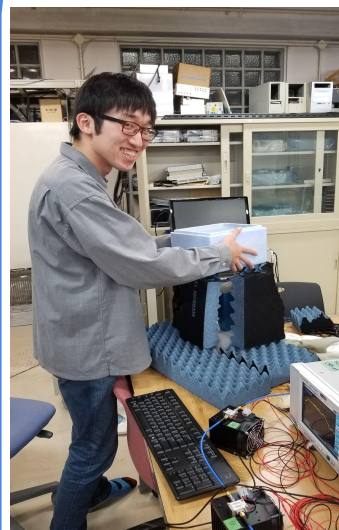
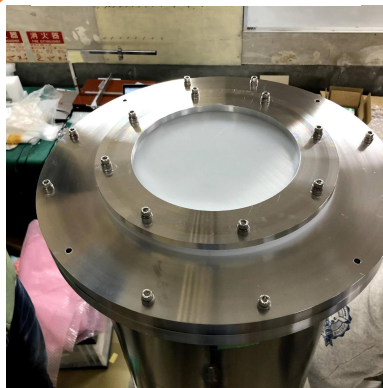
今年は

新しいDOSUEが京大  
内で作成中！

方向感度を持った探索

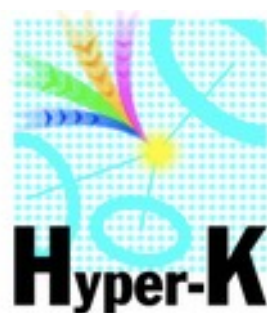


信号の入り口



**ぜひ一緒に研究しましょう！**

# T2K / SK · HK 実験紹介



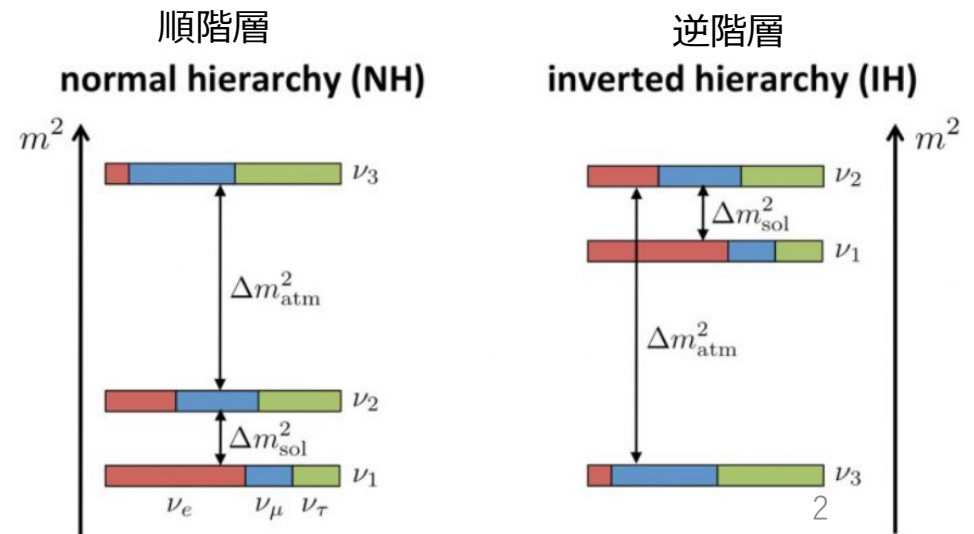
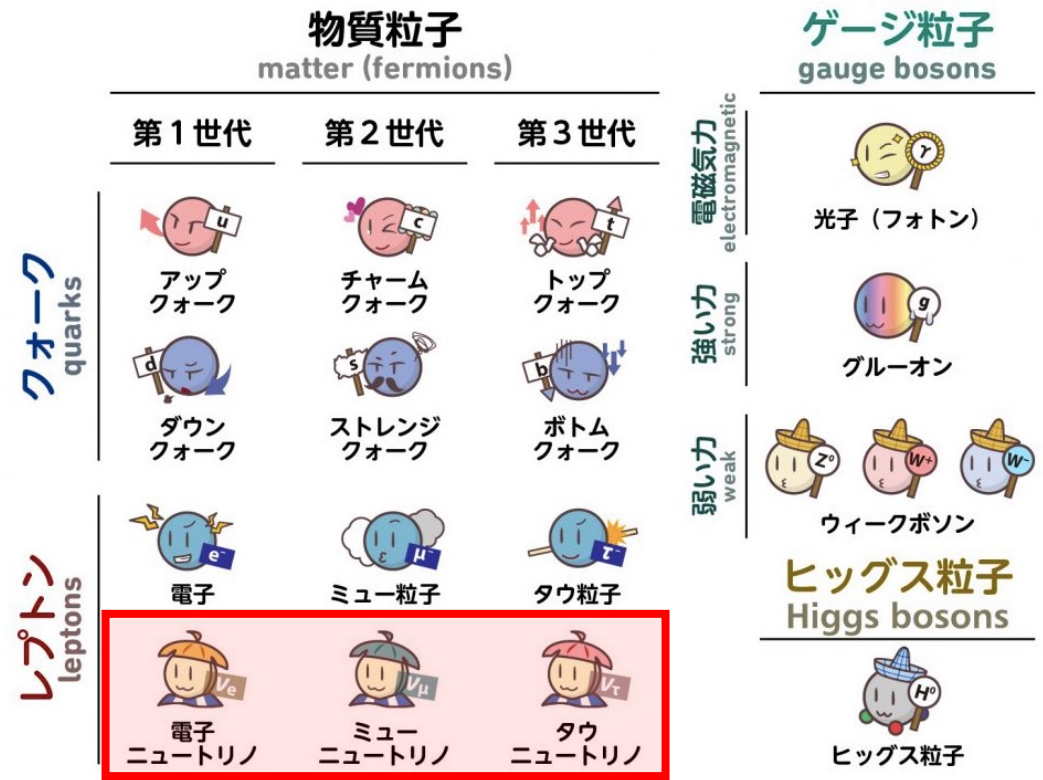
# ニュートリノって？

- 電荷 0 の3種類 (フレーバー) の素粒子  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- 3つの荷電レプトン  $e, \mu, \tau$  に対応
- 弱い相互作用のみ (=反応ほぼ起こらない)
- 標準模型では質量0

しかし…

ニュートリノ振動 (後述)の観測から  
非常に軽い質量を持つことが判明

質量がいくつかはまだわかっていない  
3つのニュートリノのどれが一番重いかすら…  
(質量階層性の問題)





# ニュートリノ振動

ニュートリノが質量を持ち、**フレーバー固有状態** ≠ **質量固有状態** のとき

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

ポンテコルボ・牧・中川・坂田 (PMNS) 行列

質量固有状態が  $e^{-iEt}$  で時間発展

⇒ 時間発展で  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  は互いに移り変わる (**ニュートリノ振動**)

2015年にノーベル賞

“for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”

# T2K実験



J-PARCからのニュートリノビーム( $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ )をスーパーカミオカンデ(SK)で観測

目的: ニュートリノの粒子・反粒子対称性 (CP対称性)の破れの実証

振動パラメータ (前頁の  $\theta_{13}, \theta_{23}$  など) の精密測定

⇒ 現在の宇宙に反物質がほとんど存在しない謎の解明への手がかり



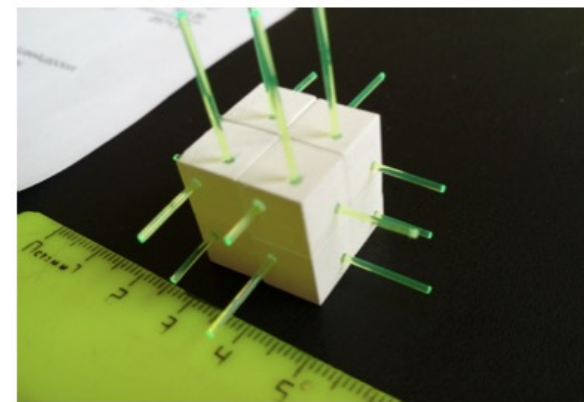
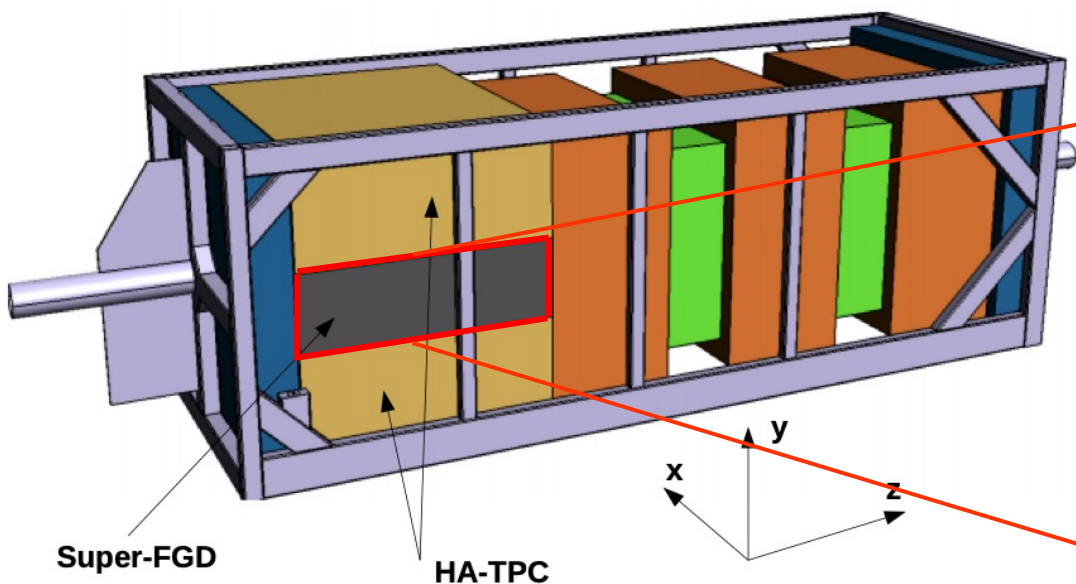
# 京大T2Kグループの取り組み

データを多く集めるため、ビームや前置検出器のアップグレード進む

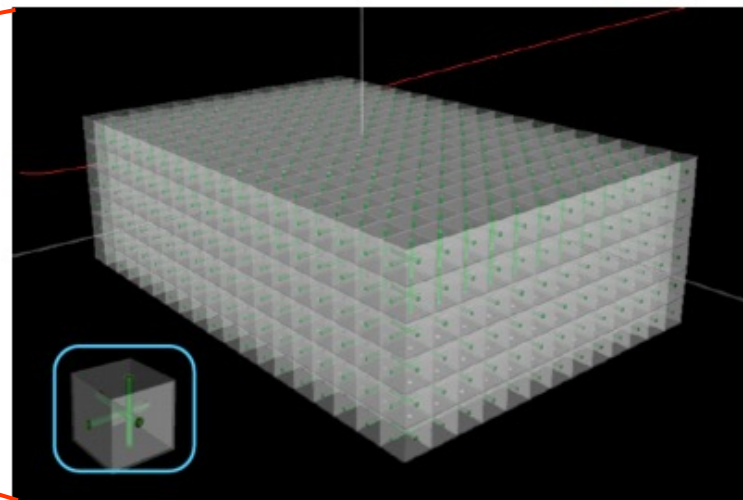
- 2022年12月: ビームアップグレード完了予定
- 2023年春: Super-FGDの建設が行われる予定

京都大学では … Super-FGDの建設に貢献. ビームモニタ関連にも.  
来年からはビーム運転が再開するので良いタイミング

アップグレード後のND280



↑ Super-FGDの実物模型



← Super-FGDの構造



# SK・HK検出器

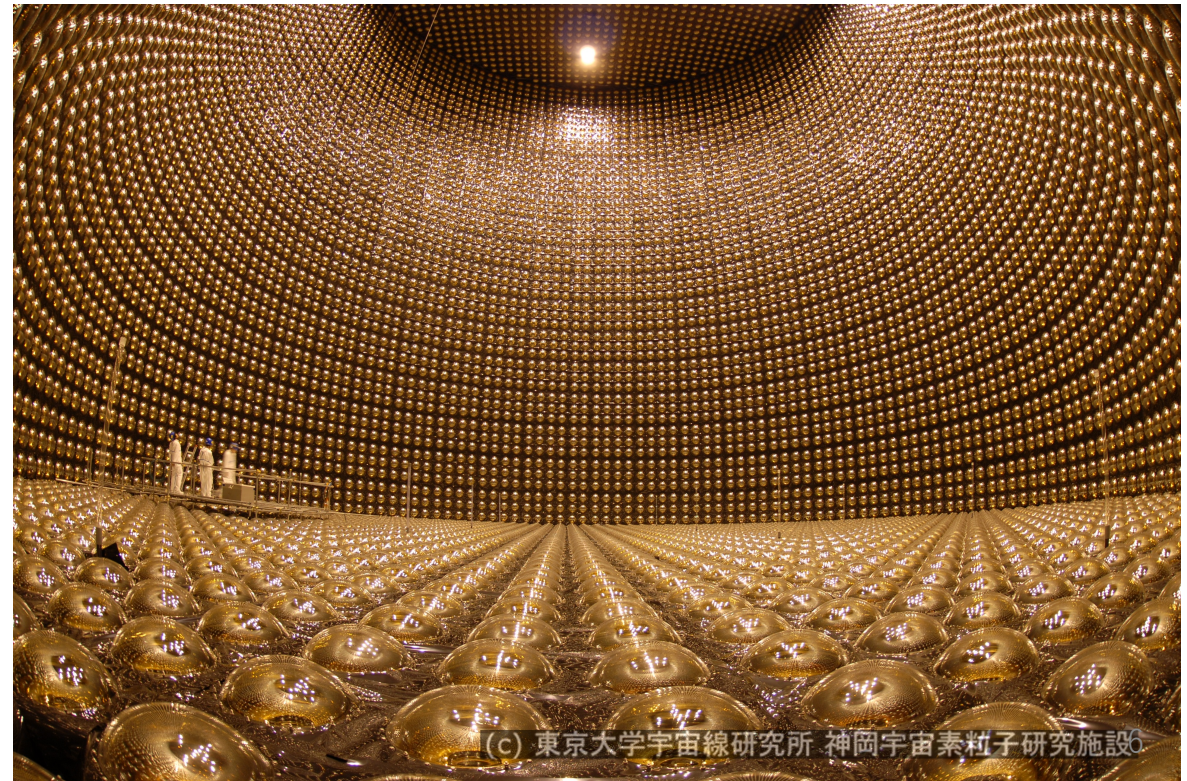
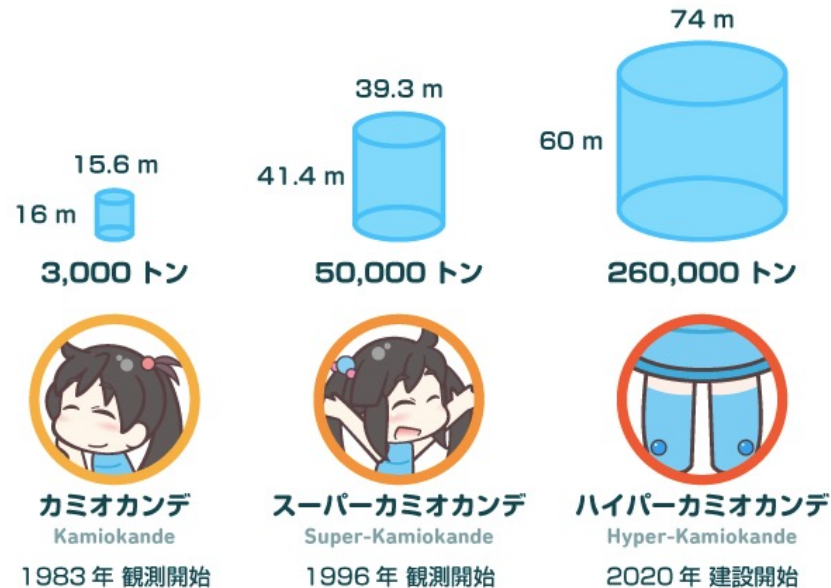
## スーパーカミオカンデ (SK)

- 5万トンの超純水で満たされた円筒型の検出器
- チェレンコフ光を約1万本の光電子増倍管で観測
- 反ニュートリノの検出効率向上のため、Gdの溶解が進む

## ハイパーカミオカンデ (HK)

- SKの約8.4倍の大きさ
- 2027年実験開始予定

↓水のないSK内部の様子





# SK・HKで何を調べるか？

## 1. 陽子崩壊

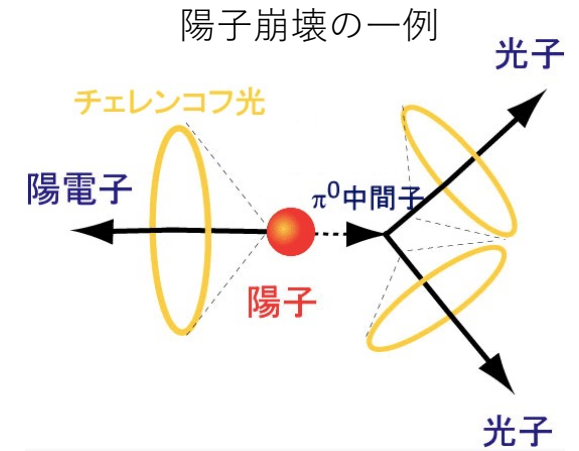
- $10^{34}$ 年といったスケールの話
- とにかく物質量を増やして観測を目指す
- 大統一理論の検証

## 2. 超新星爆発

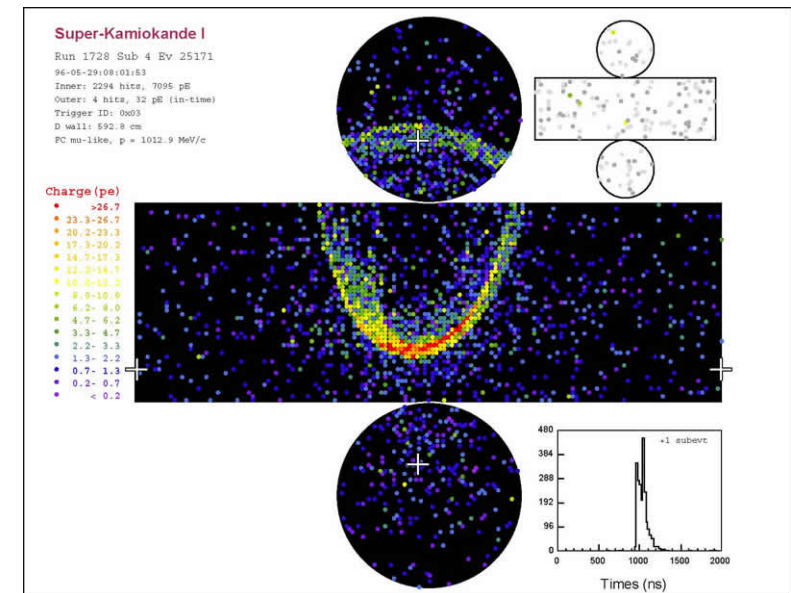
- 超新星爆発ニュートリノから、超新星爆発の詳細なメカニズムを探求

## 3. 振動パラメータの精密測定

- 太陽ニュートリノ・大気ニュートリノ  
加速器ニュートリノを測定
- CP対称性の破れの検証や質量階層性問題へのアプローチ



SKのイベントディスプレイ



# 実験紹介 AXEL(あくせる)実験



# ニュートリノとは？

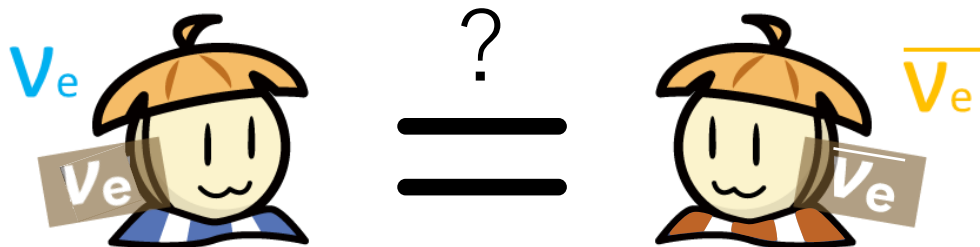
実は宇宙で光子の次に多い素粒子(標準模型中)





- ・ 異常に軽い粒子
- ・ 電氣的に中性
- ・ 弱い相互作用でのみ反応

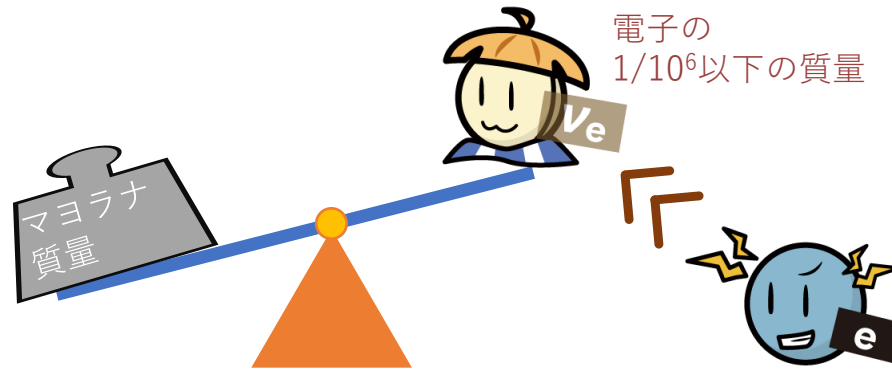
AXELのテーマ！

ニュートリノと反ニュートリノは同じもの？違うもの？



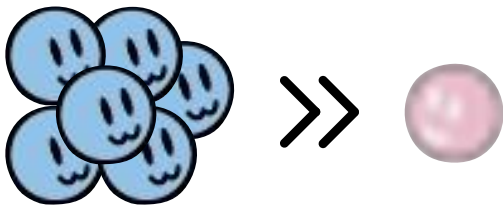
もし本当に  =  なら...

○ニュートリノが異常に軽い理由の解明？



マヨラナ粒子だけが持つ特殊な質量(マヨラナ質量)が  
すごく重いのが理由かも？ (シーソー機構)

○消えた反物質の謎の解明？

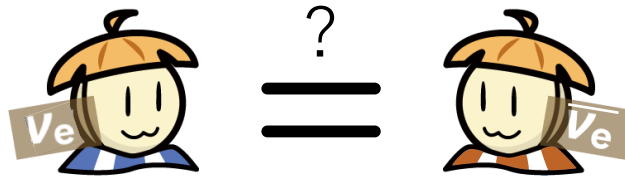


粒子数保存(レプトン数保存)を  
破る現象の観測が必要

物質に対して反物質がほとんど  
存在しない理由がわかるかも？



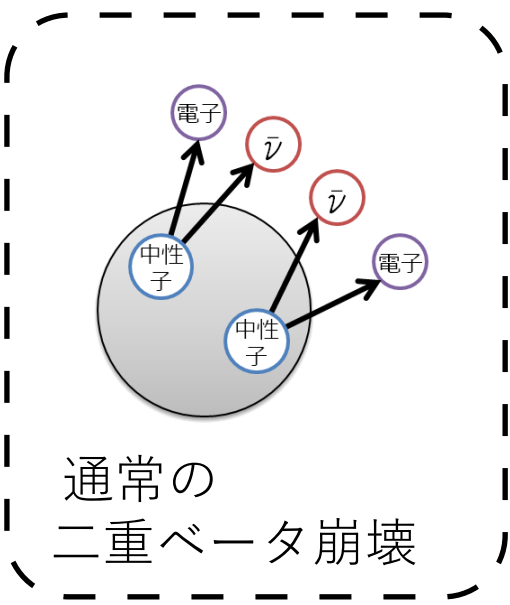
# AXEL実験では



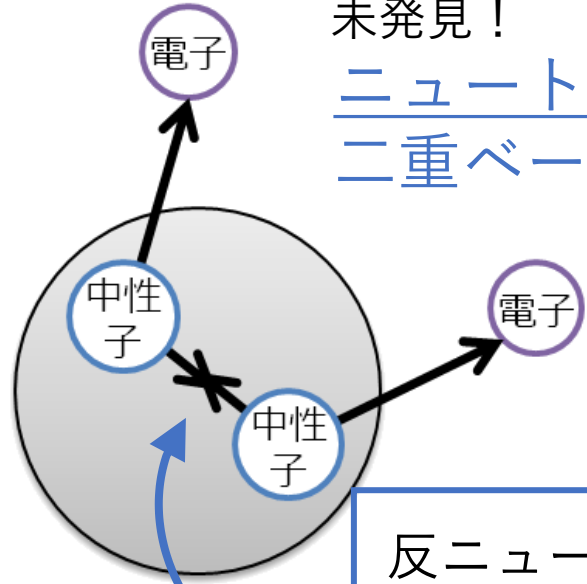
…ニュートリノと反ニュートリノが同一の粒子かどうかを検証

=マヨラナ粒子といいます。

どうやって？



通常の二重ベータ崩壊



未発見！

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を探す！

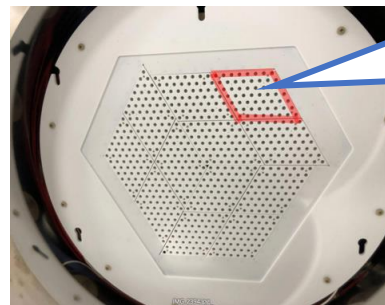
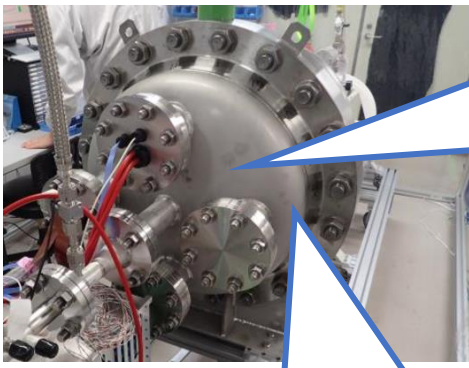
反ニュートリノ同士の(仮想的な)対消滅。  
 でないと起きない。

非常に頻度の低い二重ベータ崩壊を探索するために...  
高圧ガスキセノンの検出器を開発。

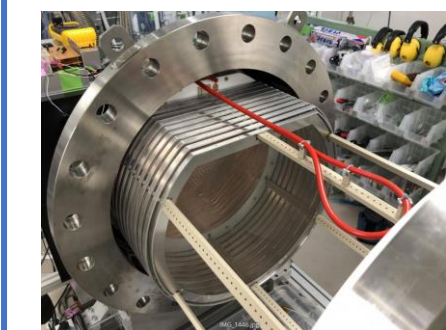
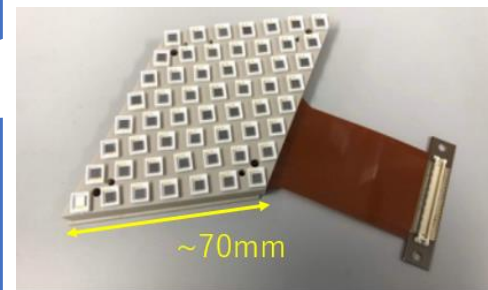
高統計・高エネルギー分解能・低バックグラウンドの実験！

# AXEL180L検出器

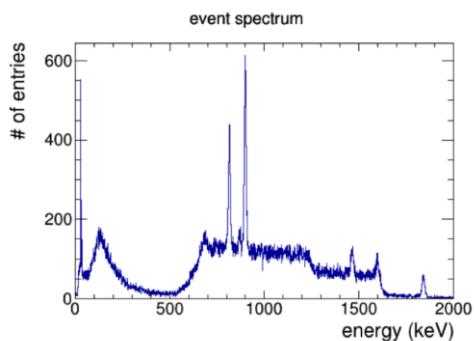
京大で稼働中



面状に検出器が並ぶ

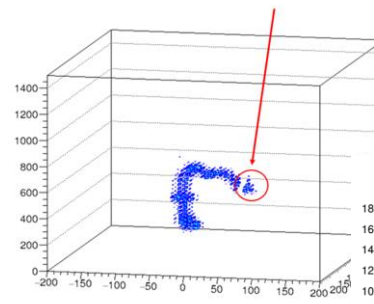


一様電場を形成

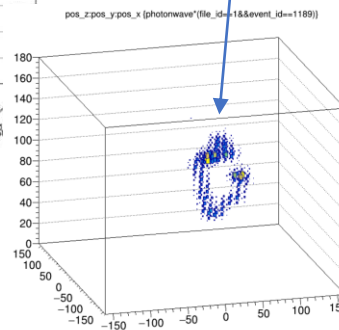


高いエネルギー分解能

キセノン特性X線



$e^+$  と  $e^-$  ?

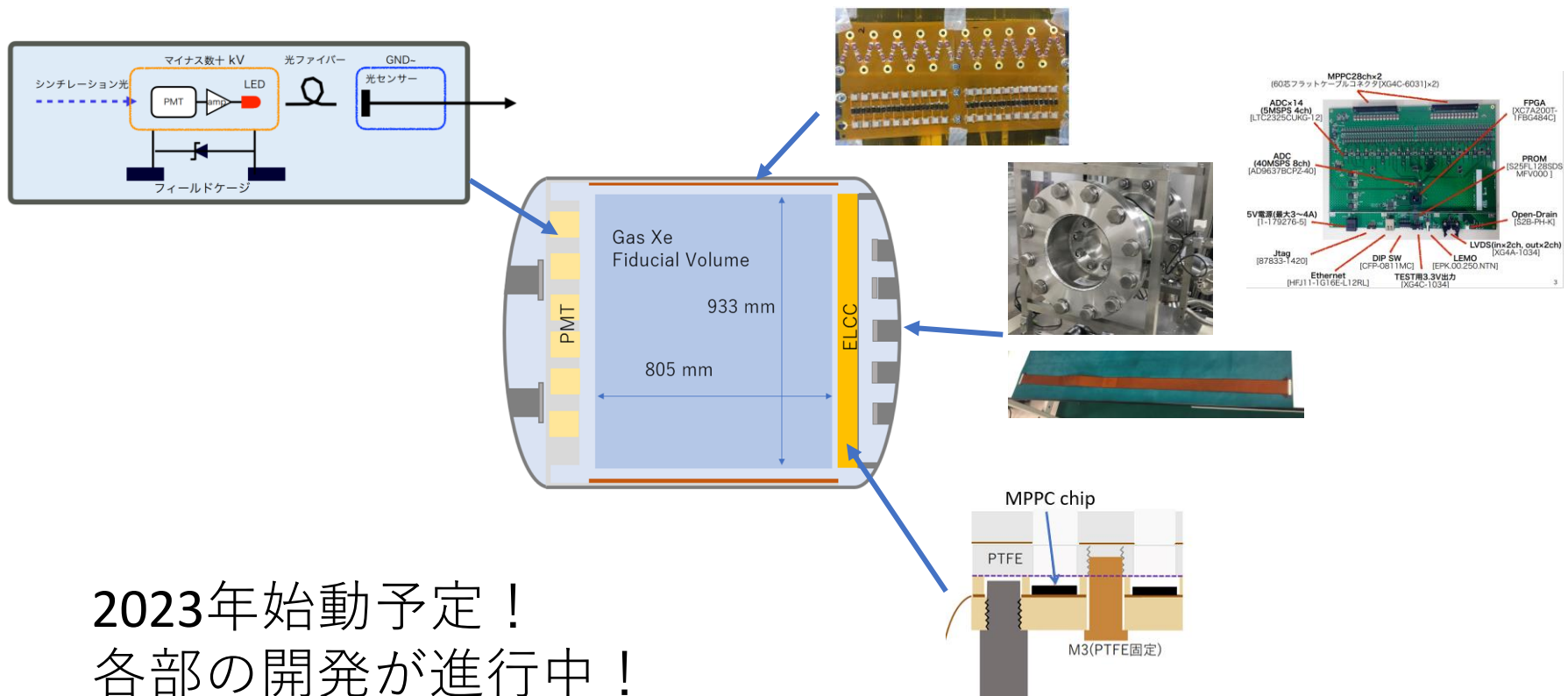


立体的な飛跡再構成

世界最高感度の検出器を目指して研究中！！

# AXEL1000L検出器

さらに**大型化**して**二重ベータ崩壊**の探索へ！！



2023年始動予定！  
各部の開発が進行中！