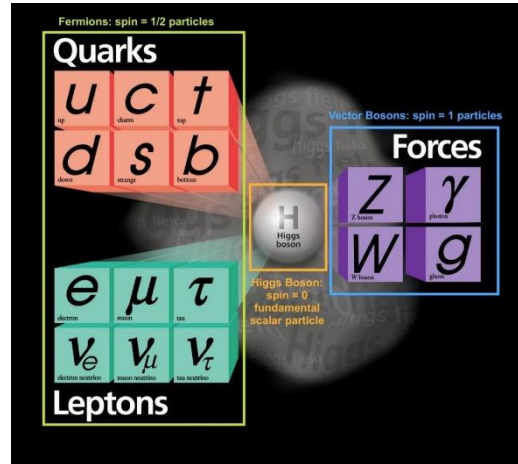
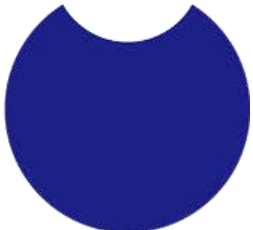
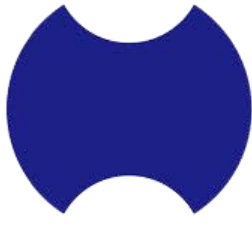


素粒子構造研究部門



TCHoU 宇宙史研究センター2022年度活動報告
2023年3月1日

武内 勇司 (TCHoU 素粒子構造研究部門)

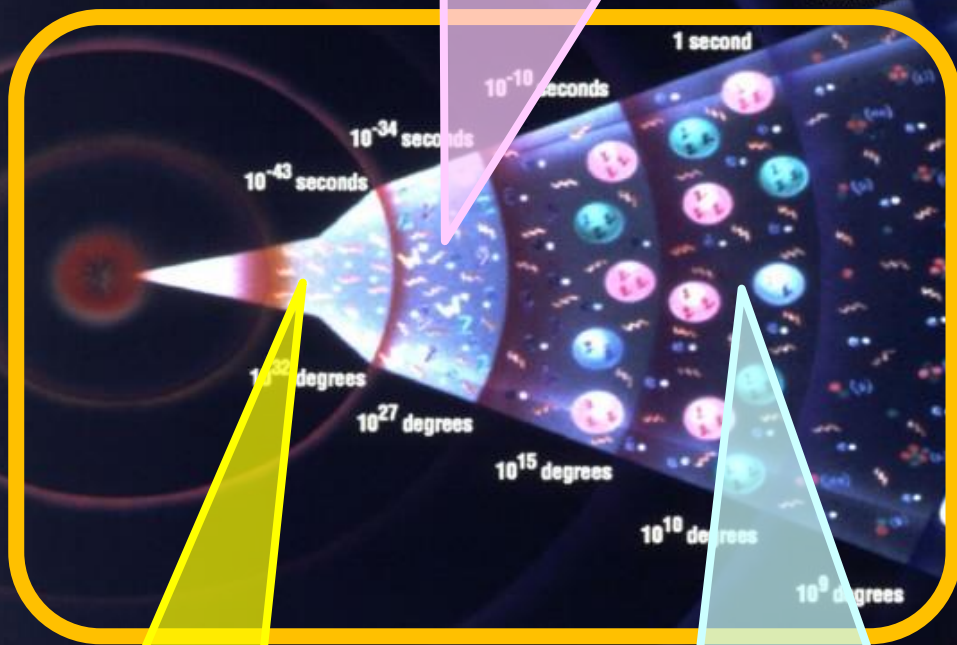


宇宙史研究における素粒子構造研究部門のプロジェクト

Big Bang

ヒッグス精密研究
素粒子の質量の起源,
真空の安定性など

宇宙マイクロ波背景放射



超弦理論
時空の起源,
力の起源

宇宙背景ニュートリノ探索
ビッグバン1秒後の姿に迫る

3 degrees K

宇宙史研究における素粒子構造部門のプロジェクト

• 陽子陽子衝突型加速器実験：ATLAS

- CERN LHC加速器を用いた大規模国際共同実験
- ヒッグス粒子の精密測定，標準模型を超える物理の探索など
- マスタープラン2020「高輝度大型ハドロン衝突型加速器(HL-LHC)による素粒子実験」
- 査読有論文数：43件，国際会議講演：1件，科研費：1件

受川史彦，原和彦，佐藤構二，廣瀬茂輝，金信弘（筑波大），池上陽一（CA→客員）

• 宇宙背景ニュートリノ崩壊探索: COBAND

- 宇宙背景ニュートリノの崩壊光の検出，ニュートリノ寿命，ニュートリノの質量の決定
- 筑波大TCHoUを中核とする国際共同研究
- マスタープラン2020「宇宙背景ニュートリノ崩壊探査」
- 会議紀要(査読無)：1件，国際会議講演：1件，科研費：1件

金信弘，武内勇司，飯田崇史（筑波大），松浦周二（関西学院大 客員教員），吉田拓生（福井大連携教員），(S.B. Kim)*

*海外unit PI 任用手続き保留中（ソウル大→成均館大→中山大 移動のため）

• 超弦理論

- 量子重力の理論
- 時空の構造，基本相互作用および基本粒子すべてを記述する統一理論の有力候補
- 論文：3件，国際会議講演：1件，科研費：2件

石橋延幸，伊敷吾郎，浅野侑磨（筑波大），佐藤勇二（福井大連携教員）

2023年3月16日 TCHoU素粒子構造部門ワークショップを開催予定

LHC-ATLAS実験

世界最高エネルギーでの加速器実験

$E_{CM} \leq 14$ TeVでの陽子・陽子衝突

2010年 LHC加速器稼動開始。

2011-12年 物理Run開始。Ecm=7-8 TeVでデータ取得。

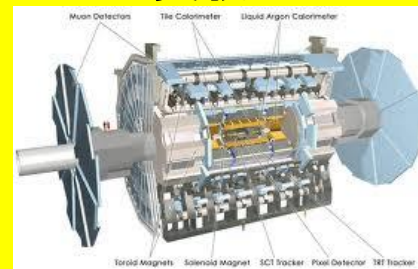
2012年 LHC加速器のATLAS/CMSがヒッグス粒子を発見。

2015-18年 Run 2実験。Ecm=13 TeV。

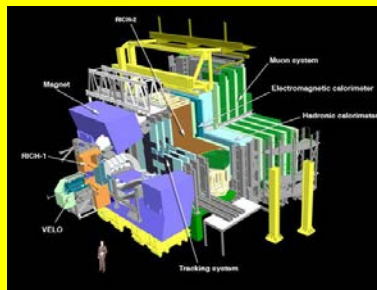
2022-2025年 Run 3。Ecm=13.6 TeV。

2029年- HL-LHC実験。~3000 fb⁻¹の大データセット。

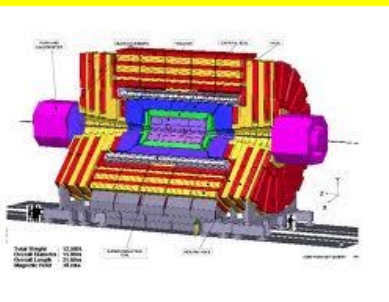
ATLAS実験



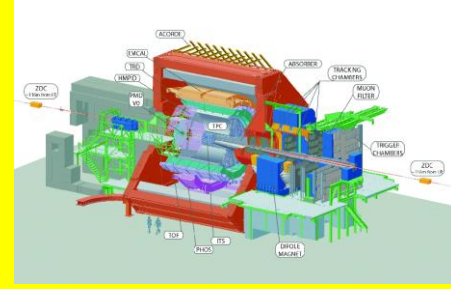
LHCb実験



CMS実験



ALICE実験



円周27km

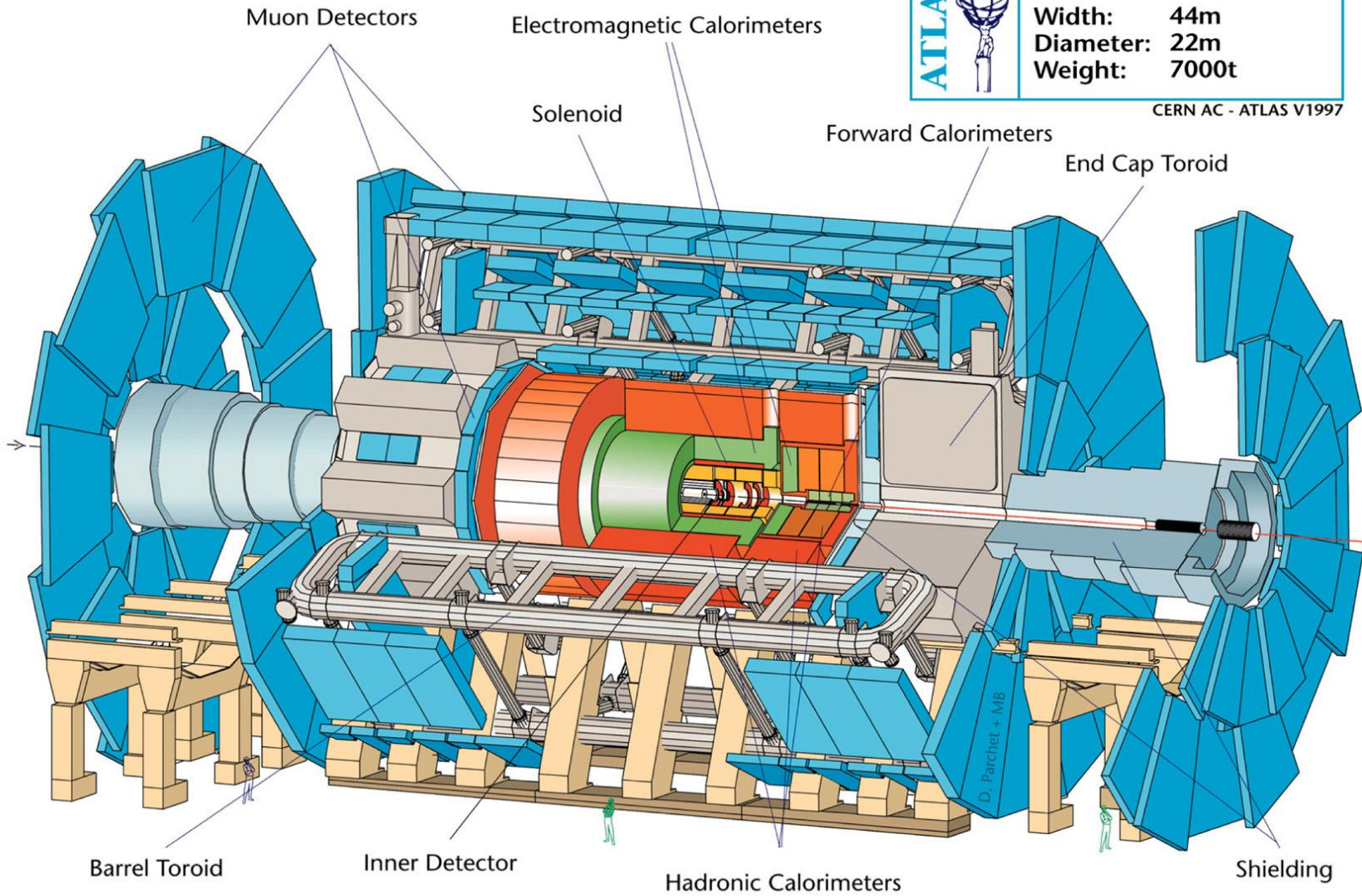
陽子を最大7 TeVまで加速して正面衝突

ATLAS検出器

総重量 7,000 t

ATLAS		Detector characteristics	
		Width:	44m
		Diameter:	22m
		Weight:	7000t

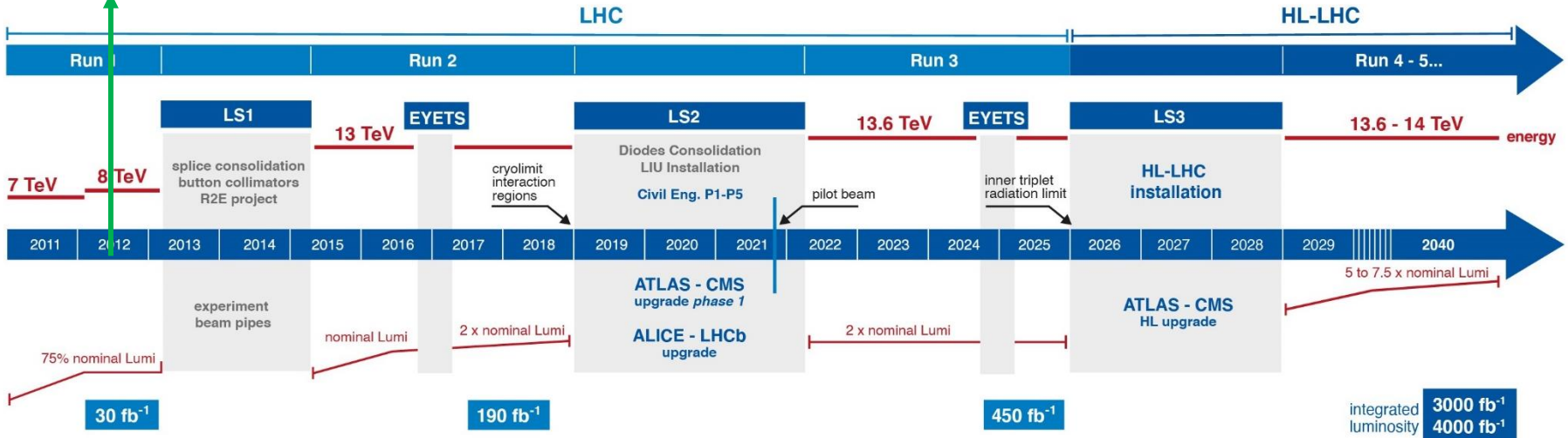
CERN AC - ATLAS V1997



- 最高エネルギーでのさまざまな素粒子反応の研究
 - ヒッグス粒子、標準理論、トップクォーク、Bメソン、超対称性、新物理探索、重イオン衝突...

LHC長期スケジュール

ATLAS/CMSがヒッグス粒子を発見。



HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:



HL-LHC CIVIL ENGINEERING:



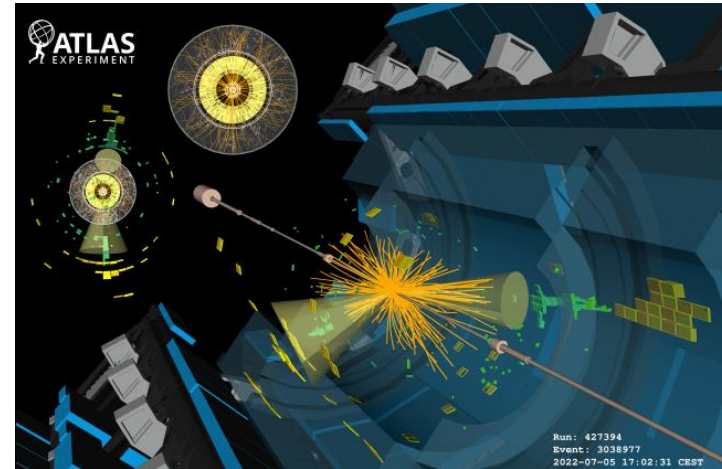
	year	$E_{CM}(\text{TeV})$	integ lumi [fb^{-1}]
Run 1	2011	7	5
	2012	8	21
Run 2	2015-2018	13	139
Run 3 (予)	2022-2025	13.6	250
HL-LHC (予)	2029-	14	3000

Run 3の開始

- 2019-2021 の長期シャットダウン(加速器と検出器の増強)から復帰
- 2022/7/5にRun 3運転が開始

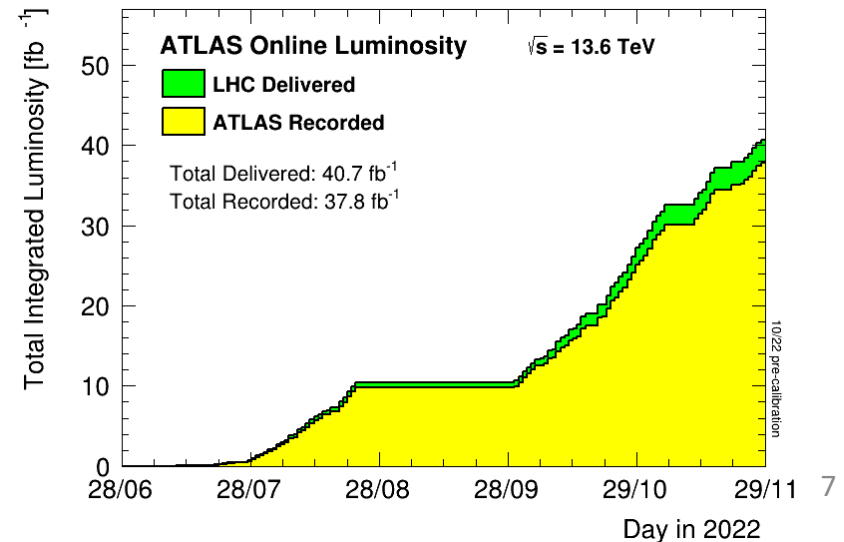


Run3のはじめてのビーム衝突の際のATLASコントロールルーム



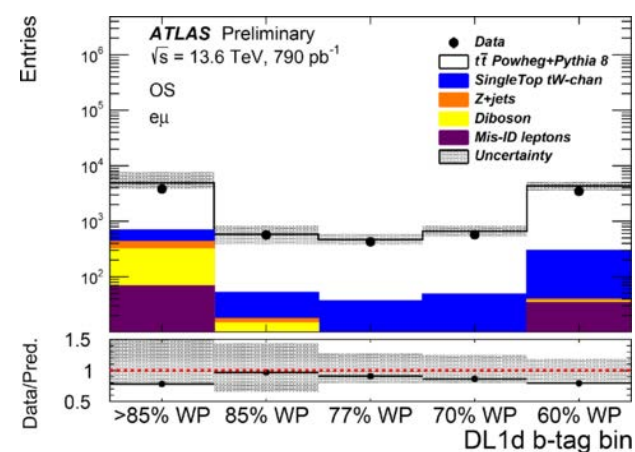
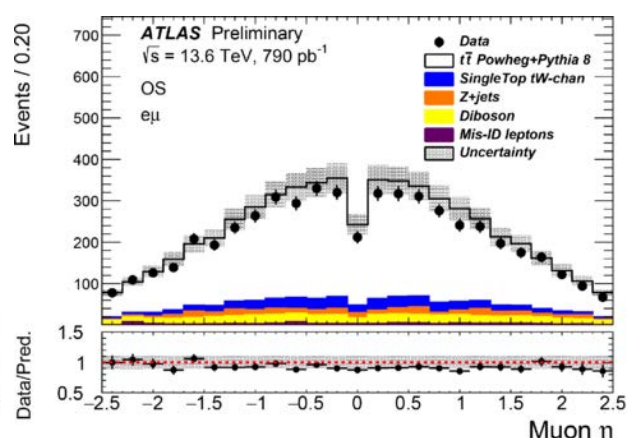
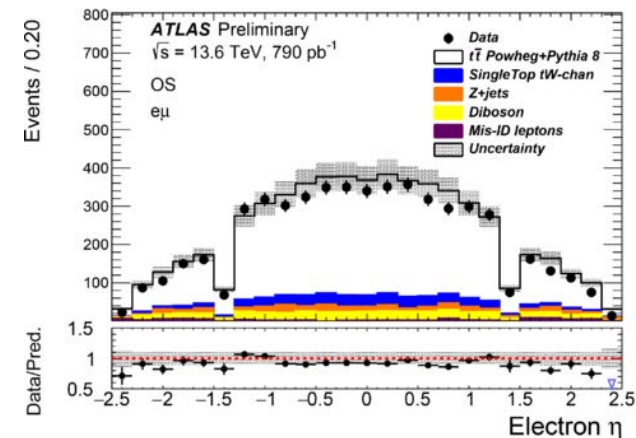
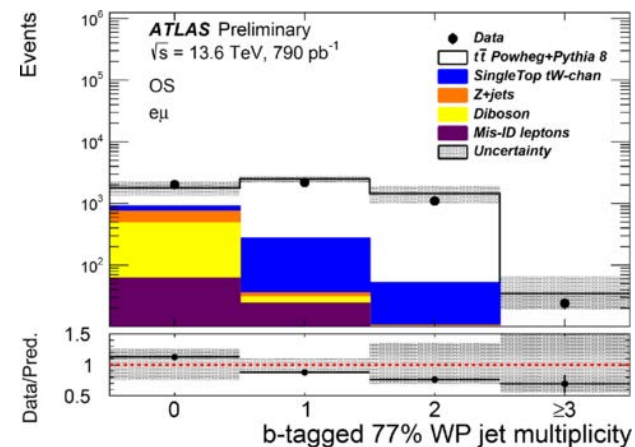
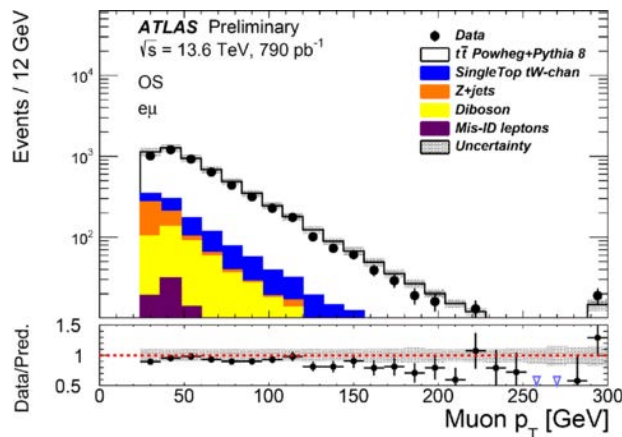
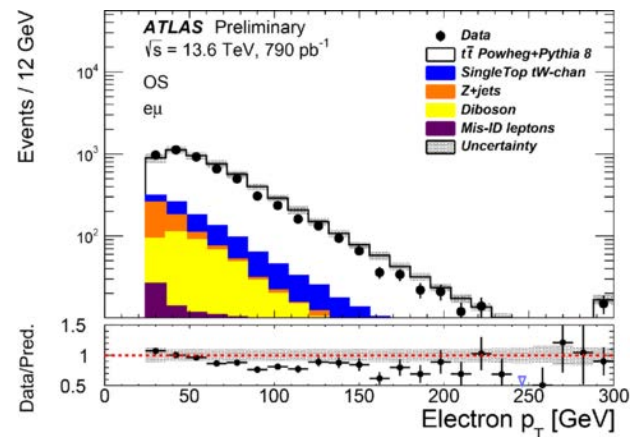
同じ日に観測されたZ → ee事象

- 2022-2025に250 fb⁻¹を蓄積予定
- 2022年には37.8 fb⁻¹を取得した



Run 3データのMCシミュレーションとの比較

• $e^\pm\mu^\mp$ 事象



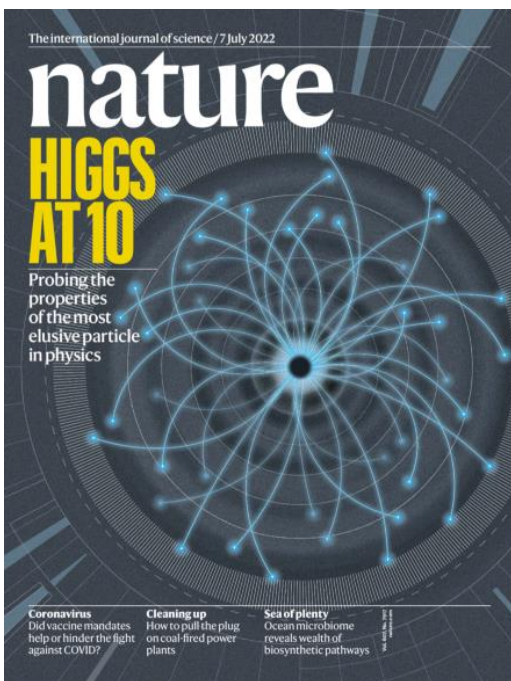
Run3の物理結果は、今後にご期待!!

ヒッグス粒子発見10周年

- 2022年 ヒッグス粒子発見
- 2024年はヒッグス粒子発見から10周年
 - 7月4日にCERNでシンポジウム
 - ATLAS: Nature volume 607, pages 52–59 (2022)
 - CMS: Nature volume 607, pages 60–68 (2022)



CERNでのセミナーの様子



ATLAS日本グループでも8月末にイベントを行いました。

ヒッグス粒子発見10周年

イベント

発見10周年

2022 8/29 月 つくば国際会議場

14:30 (14:00 開場) ~ 16:30

対象 ▶ 中高生・大学生 (+保護者の方)

参加申し込み
事前登録 8月22日まで
定員 150名
<https://atlas.kek.jp/main/events/higgs10>

お問い合わせ higgs10@mi.post.kek.jp

講演
ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学

■ 2012年発見から10年経ち、確立している研究の方向性や、今後の研究の方向性についてお話しします。

主催 KEK 東京国立加速器科学研究所
共催 高エネルギー加速器研究機構・量子科学技術研究センター

協賛 CERN

Article
A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04893-w> The ATLAS Collaboration¹

Received: 21 March 2022
Accepted: 23 May 2022
Published online: 4 July 2022
Open access

Check for updates

The standard model of particle physics¹ describes the known fundamental particles and forces that make up our Universe, with the exception of gravity. One of the central features of the standard model is a field that permeates all of space and interacts with fundamental particles^{2–4}. The quantum excitation of this field, known as the Higgs field, manifests itself as the Higgs boson, the only fundamental particle with no spin. In 2012, a particle with properties consistent with the Higgs boson of the standard model was observed by the ATLAS and CMS experiments at the Large Hadron Collider

Article
A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04892-x> The CMS Collaboration¹

Received: 21 March 2022
Accepted: 23 May 2022
Published online: 4 July 2022
Open access

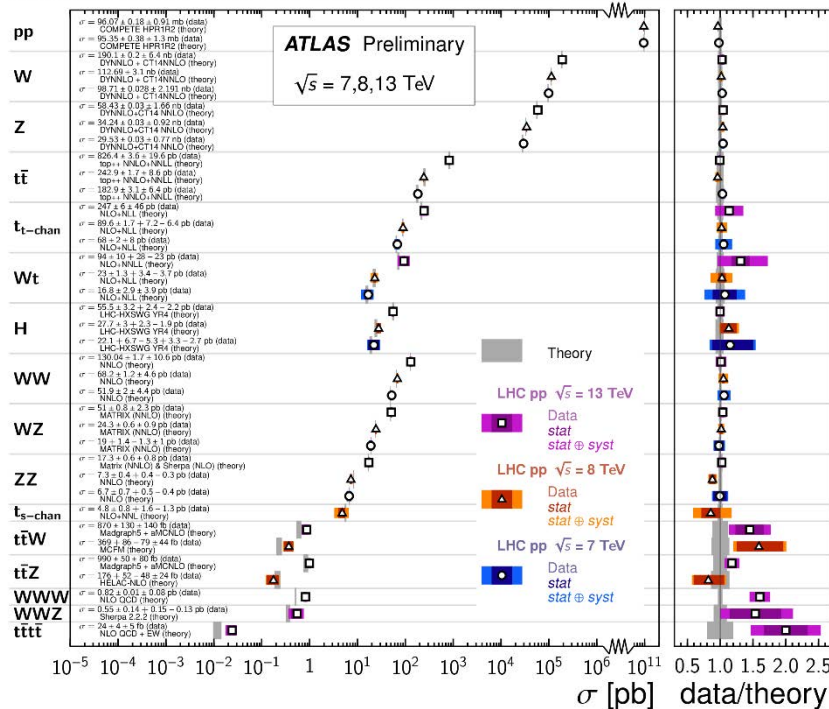
Check for updates

In July 2012, the ATLAS and CMS collaborations at the CERN Large Hadron Collider announced the observation of a Higgs boson at a mass of around 125 gigaelectronvolts. Ten years later, and with the data corresponding to the production of a 30 times larger number of Higgs bosons, we have learnt much more about the properties of the Higgs boson. The CMS experiment has observed the Higgs boson in numerous fermionic and bosonic decay channels, established its spin-parity quantum numbers, determined its mass and measured its production cross-sections in various modes. Here the CMS Collaboration reports the most up-to-date combination of results on the properties of

標準理論の精密検証

- 現在までのところ、標準理論はATLAS実験の物理結果をよく再現している。
- ATLAS実験では、さまざまな物理プロセスを測定し、標準理論を詳細に精密検証している。
- Run 2データの解析により、ヒッグス粒子の測定精度が飛躍的に高まった。
- 新粒子探索など、標準理論を超える物理現象の探索も盛んにおこなわれている。

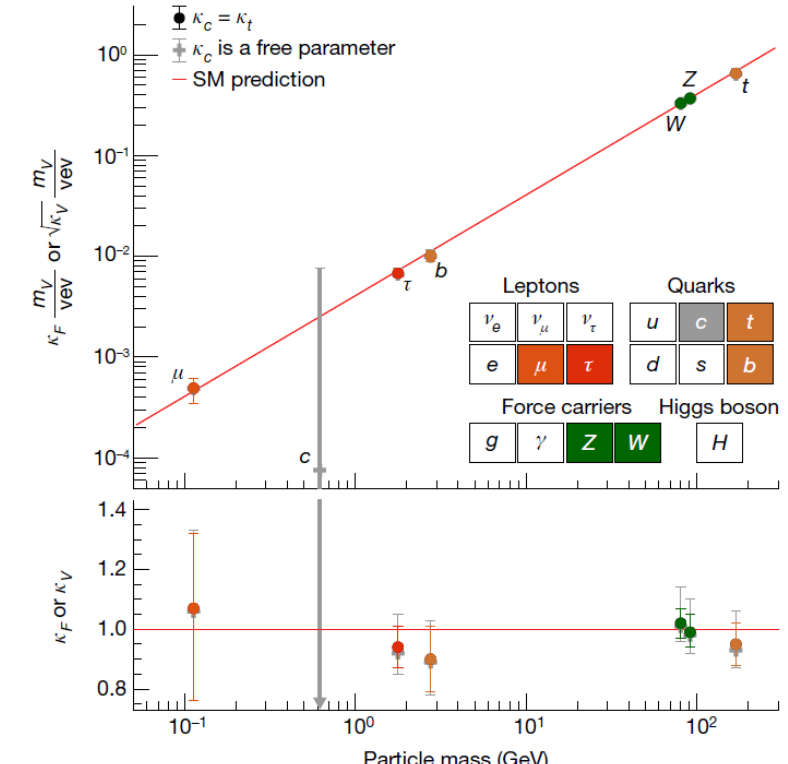
Standard Model Total Production Cross Section Measurements



$\int \mathcal{L} dt$ [fb⁻¹]

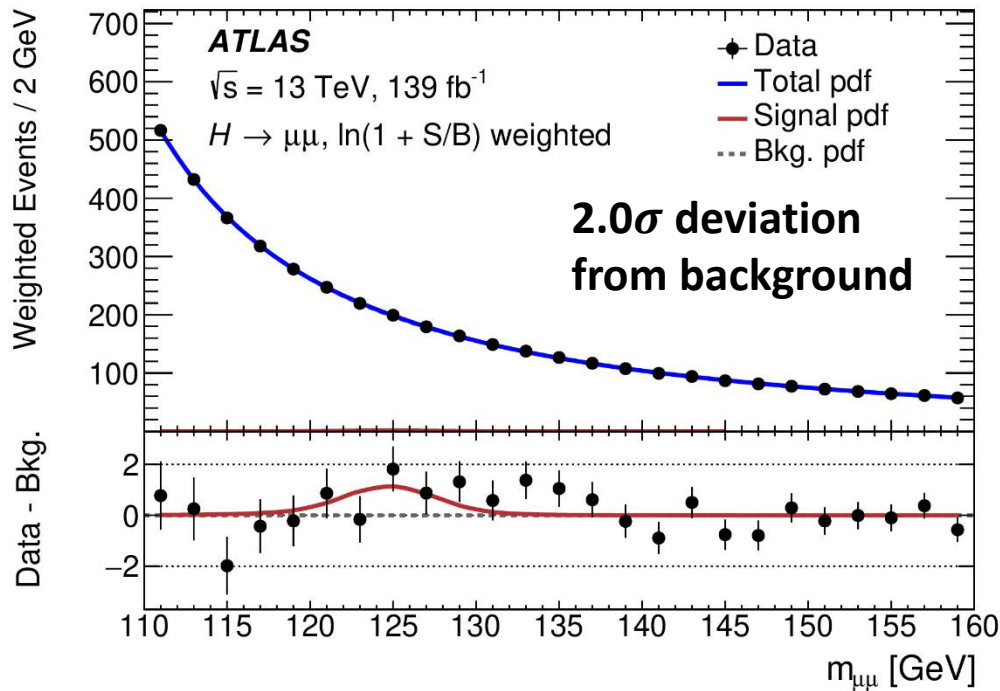
Reference	$\int \mathcal{L} dt$ [fb ⁻¹]
PLB 761 (2016) 168	50x10 ³
Nucl. Phys. B, 486-548 (2014)	8x10 ³
PLB 759 (2016) 601	0.081
EPJ C 79 (2019) 760	20.2
EPJ C 77 (2017) 367	4.6
JHEP 02 (2017) 117	3.2
JHEP 02 (2017) 117	20.2
JHEP 02 (2017) 117	4.6
EPJ C 80 (2020) 528	36.1
EPJ C 74 (2014) 3109	20.2
EPJ C 74 (2014) 3109	4.6
JHEP 04 (2017) 086	3.2
EPJ C 77 (2017) 531	20.3
PRD 90, 112006 (2014)	4.6
JHEP 01 (2018) 63	3.2
EPJ C 79 (2018) 63	20.3
EPJ C 01, 054 (2016)	2.0
PLB 716, 142-159 (2012)	2.0
ATLAS-COMF-2002-002	139
EPJ C 76 (2016) 6	20.3
EPJ C 76 (2016) 6	4.5
EPJ C 79 (2019) 884	36.1
PLB 763, 114 (2016)	20.3
Phys. Rev. D 87 (2013) 112001	4.6
EPJ C 79 (2018) 535	36.1
PRD 90, 092004 (2016)	36.1
EPJ C 72 (2012) 2173	4.6
PRD 97 (2018) 032005	36.1
JHEP 01, 099 (2017)	20.3
JHEP 02, 128 (2013)	4.6
PLB 759 (2014) 311	20.3
PLB 758, 228-246 (2016)	36.1
PRD 95, 072009 (2019)	36.1
JHEP 11, 172 (2015)	20.3
Eur. Phys. J. C 81 (2021) 737	139
JHEP 11, 172 (2015)	20.3
arXiv:2001.13045	139
PLB 796 (2019) 1348113	79.8
JHEP 11 (2021) 118	139

Status: February 2022

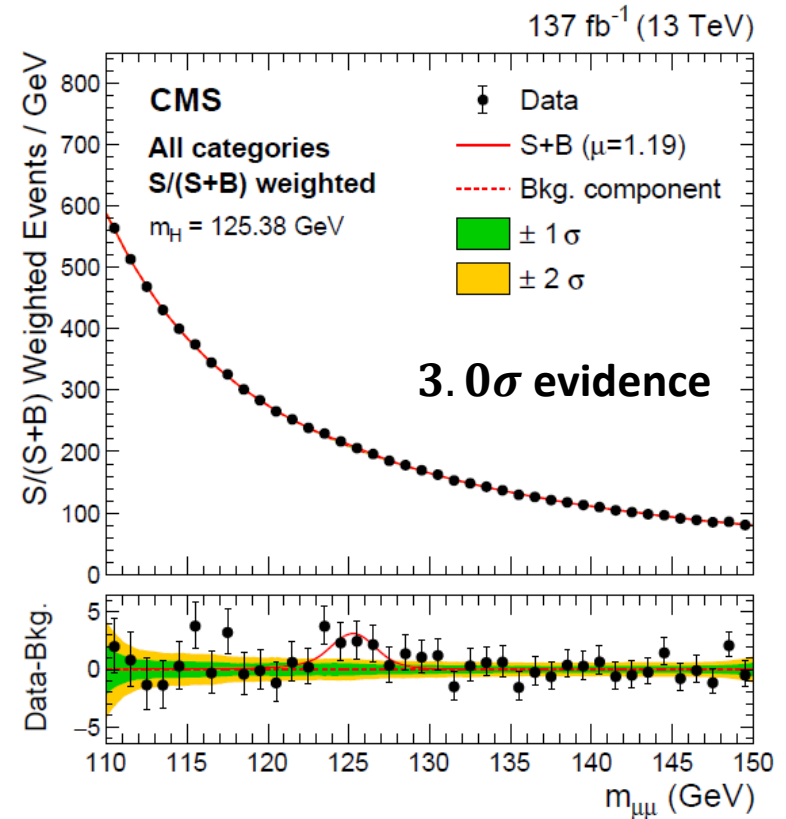


Run 3で期待される物理

- ATLAS、CMS実験では、ヒッグス粒子と b, c, τ, W, Z との結合を確認してきた。
- $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊を観測できれば、ヒッグス粒子が第2世代のフェルミ粒子にも質量を与えることをはじめて確認できる。



Phys. Lett. B 812 (2021) 135980



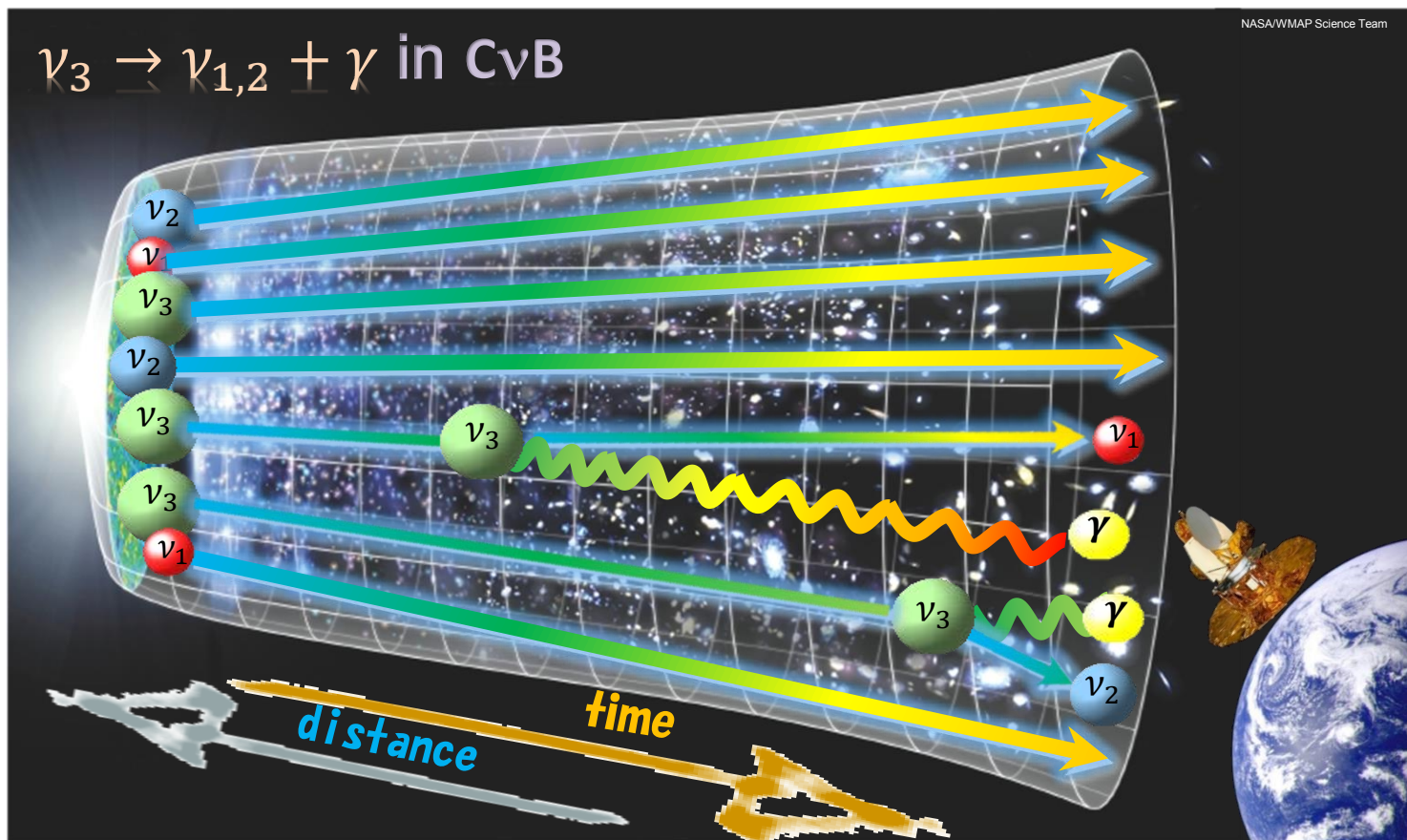
JHEP 01 (2021) 148

COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)

宇宙背景ニュートリノのニュートリノ崩壊探索

波長約 $50\mu\text{m}$ (遠赤外線)の光として観測 (ν_3 の静止系で)

現在の ν_3 寿命の下限値: $3\sim 5 \times 10^{12}$ 年



COBAND (COsmic Background Neutrino Decay)

ニュートリノ崩壊は標準模型では、非常に厳しく抑制: ν_3 寿命 $\sim 10^{43}$ 年

→ 新物理に極めて敏感 (例えば LRSMでは 10^{17} 年まで短くなり得る)

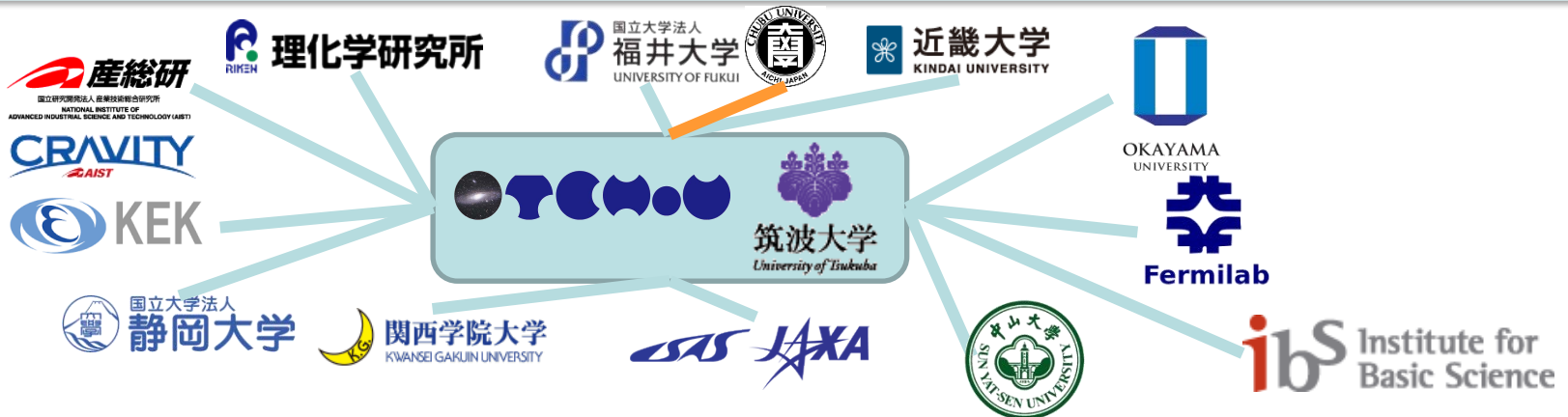
- 宇宙背景ニュートリノ崩壊光の探索は、
- ニュートリノ崩壊への新物理の寄与を検証
- であり、仮に信号が検出された場合、
- 宇宙背景ニュートリノの証拠
 - ニュートリノ質量の絶対値の決定
 - マヨラナニュートリノモデルへの制限
 - ダークエネルギー時間依存性の検証

ロケット実験, およびその後に衛星実験を計画

→ ν_3 寿命として $10^{13} \sim 10^{17}$ 年の領域を探索

→ 超伝導トンネル接合素子を用いた波長 $50\mu\text{m}$ 域の一光子分光

– 光量子部門との連携. 超伝導素子, 光学系関連では南極天文部門との連携も可能



COBAND遠赤外一光子検出のための超伝導体検出器の開発

光量子部門との連携：光量子部門のプロジェクトの1つ

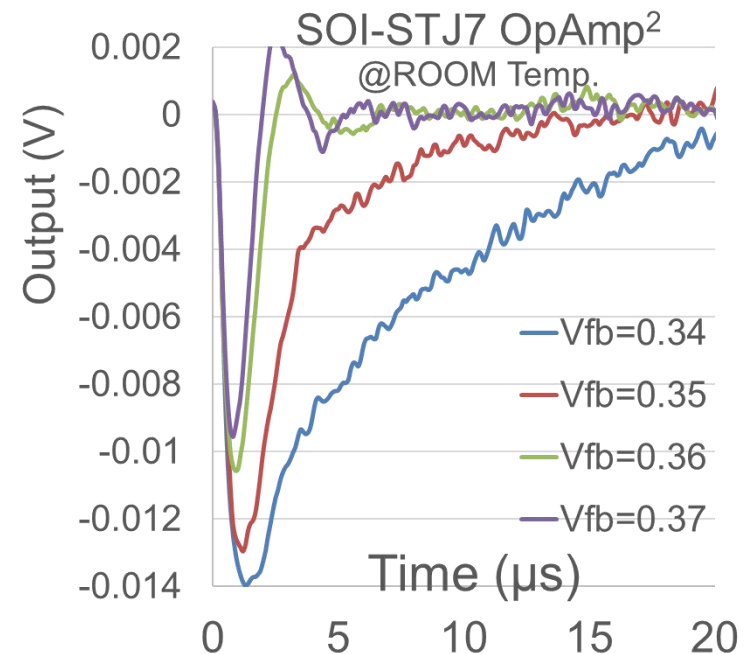
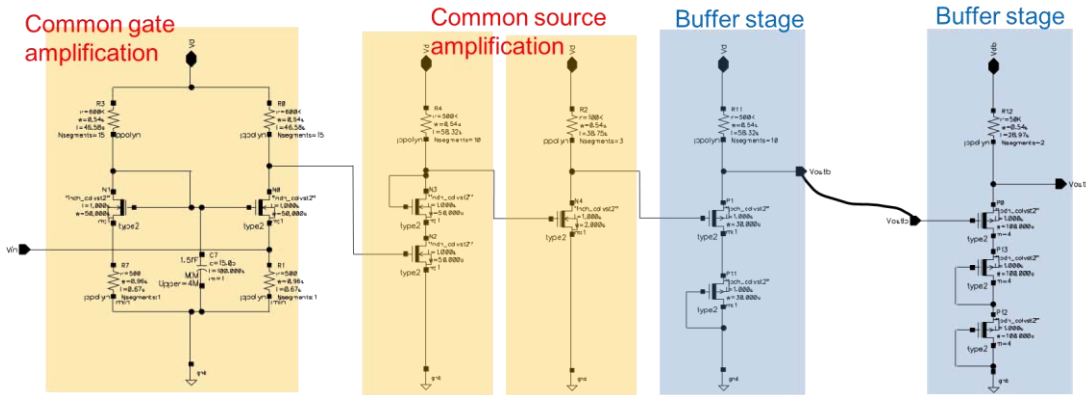
Nb/Al-STJ のSOI極低温増幅回路読出

SOI技術を用いたMOS-FET回路の極低温(3K)での動作の理解が進み、動作実績も蓄積。

- 昨年度のSOI wafer MPWランで新しい設計の極低温アンプ2種を製作・評価。
- 差動増幅回路のカスケード接続による高周波数帯域(100kHz→1MHz) まで高利得のオペアンプを用いた電荷積分型回路 →室温での動作を確認。極低温での評価中。
 - ESD保護回路搭載 →室温・極低温での動作を確認。
- 新規に500Ωシャント抵抗入力の3段増幅回路を追加
 - 室温・極低温で動作したが、3段目のgainが設計の1/10

→ 次回MPWランへのFeedback

500Ωシャント抵抗入力の3段増幅回路



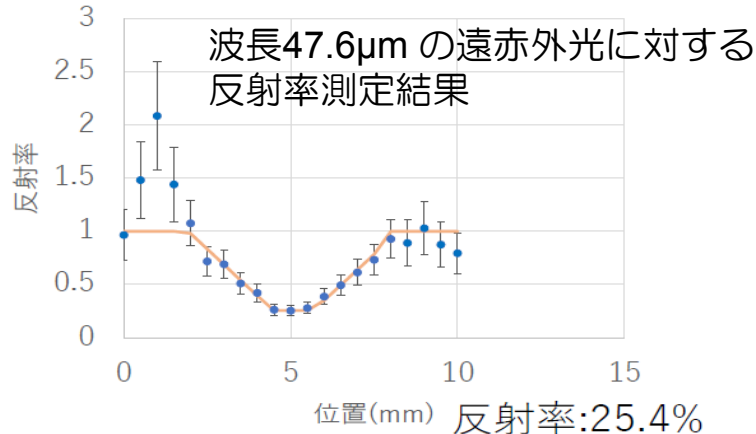
ロケット実験光学系（関西学院大，福井大，中部大との連携）

- 回折格子を試作．福井大の遠赤外センターでの遠赤外光で設計通りの回折効率を確認
- ロケット実験に向けた回折格子を含めた光学系の設計・一部のミラーの試作・テスト
- 焦点位置で分光後の光をSTJ検出器へ集める集光用ホーン的设计・試作・テスト
- Nb/Al-STJ検出器表面の反射防止膜(シリコン薄膜5~10 μ 厚)の試作・テスト
- 反射防止膜設計のための Nb の極低温・遠赤外域での光学定数測定(n, k) の予備測定
 → 本年度は，室温・遠赤外域での測定に成功

10 μ m厚Si薄膜をNb表面に貼付



47.6 μ 反射率



福井大遠赤センターの遠赤外分子レーザー装置（波長47.6 μ m, 118.8 μ m）を用いた反射防止膜・ニオブ光学定数測定（2022.7）



COBAND実験

- ロケット実験に向けたNb/Al-STJセンサー開発, 及び光応答の極低温SOI増幅器読出



超伝導体(STJ)と
半導体(SOI)の融合

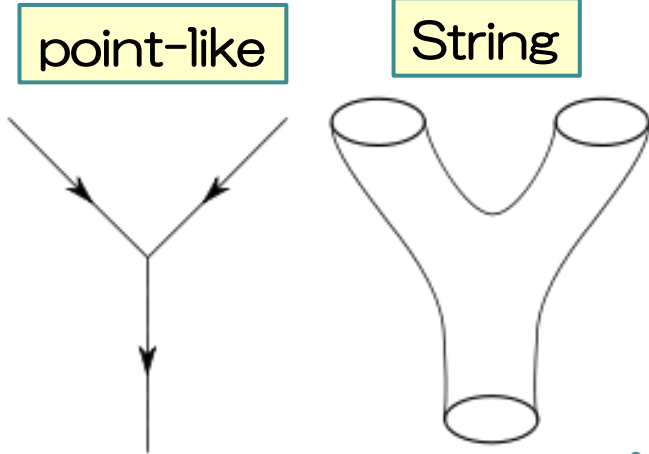
- ロケット実験に向けた望遠鏡・分光光学系



- ロケット搭載冷凍機： TCHoUと企業による試作機製作
- STJ反射防止膜： TCHoUと企業による試作機製作
- STJ検出器・光学系校正用遠赤外線源： 福井大遠赤センター
- ロケット実験のその他の開発要素：
長波長フィルター, フロントエンドエレクトロニクス, DAQ, 無線データ転送など
- ✓ ロケット実験提案書を JAXAに提出
 - 2019, 2020, 2021年度
 - サイエンスの重要性は評価されたが, 実現性の指摘あり。検討後の再提案を推奨。
2022年度も提案書を準備中

超弦理論 —より完全な定式化に向けて—

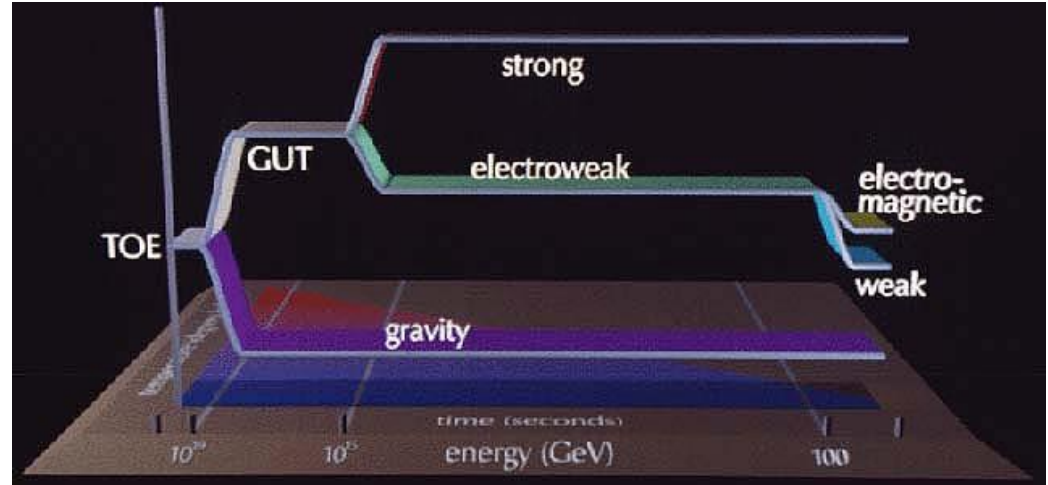
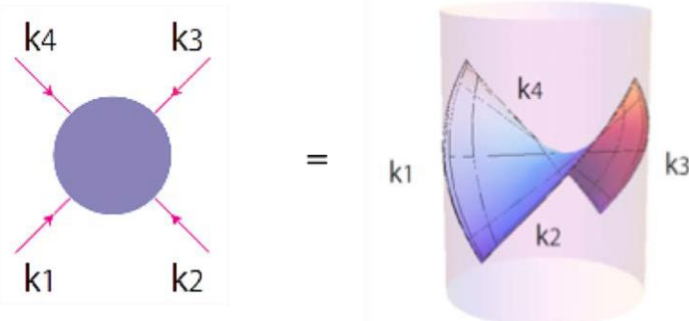
◆ 弦の場の理論



◆ 行列模型

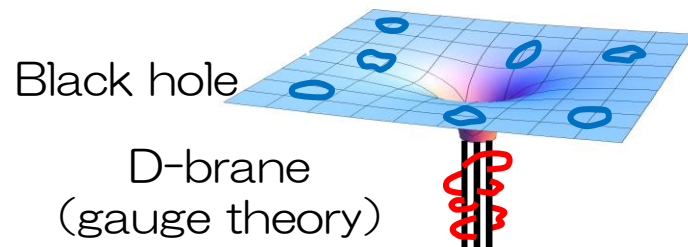
超弦理論の非摂動的定式化を与えていると予想

◆ ゲージ/重力対応



- 重力の量子論
- 全ての基本的相互作用と素粒子を統一的に記述する究極理論の有望な候補
- ➔ 宇宙の始まりを記述できると期待される
- ➔ 関連する分野に新鮮なアイデアを提供（余剰次元, ブレーン宇宙論, ...）

➔ 超弦理論におけるブラックホールの性質が対応するゲージ理論によって計算できる。



超弦理論

活動報告

(1)弦の場の理論, (2)行列模型, (3)ゲージ/重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めた。

2022年度の成果

- 論文：3件, 国際会議講演：1件, 国内学会：3件
 - Lorentz型行列模型の相構造について数値的および解析的に理解が進んだ
 - 行列模型におけるテンソル場やゲージ場の記述法を与えた
 - Fokker-Planck形式を用いたboson弦の場の理論を構築した
 - Kaku模型と呼ばれる弦の場の理論の古典解を与えた

活動計画：引き続き,超弦理論の非摂動的側面の理解に向けて上記テーマの研究を進めていく

具体的な研究課題

- 行列模型と非可換幾何学
- Fokker-Planck形式を用いた超弦の場の理論
- 行列模型の散乱振幅と摂動論、時空の創発
- 行列模型のbootstrap法を用いた解析
- 複素ランジュバン法、thimble法による数値計算