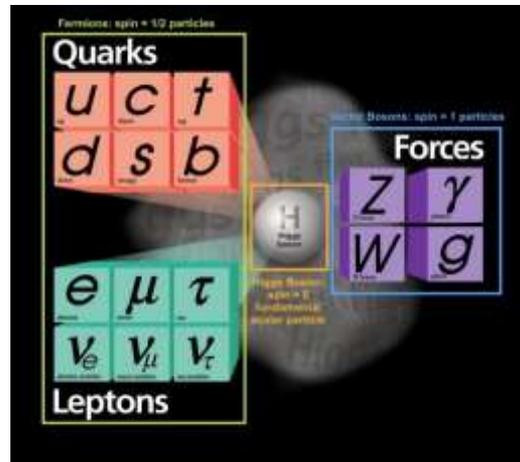
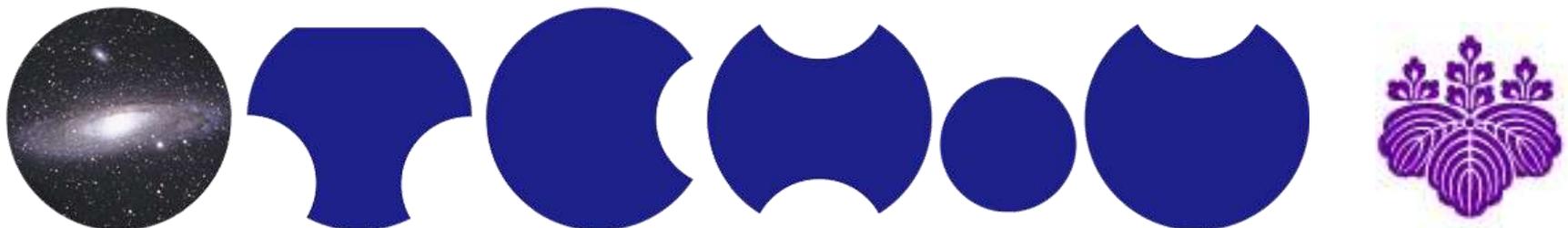


素粒子構造研究部門



TCHoU 宇宙史研究センター2023年度活動報告
2024年2月26日

武内 勇司 (TCHoU 素粒子構造研究部門)

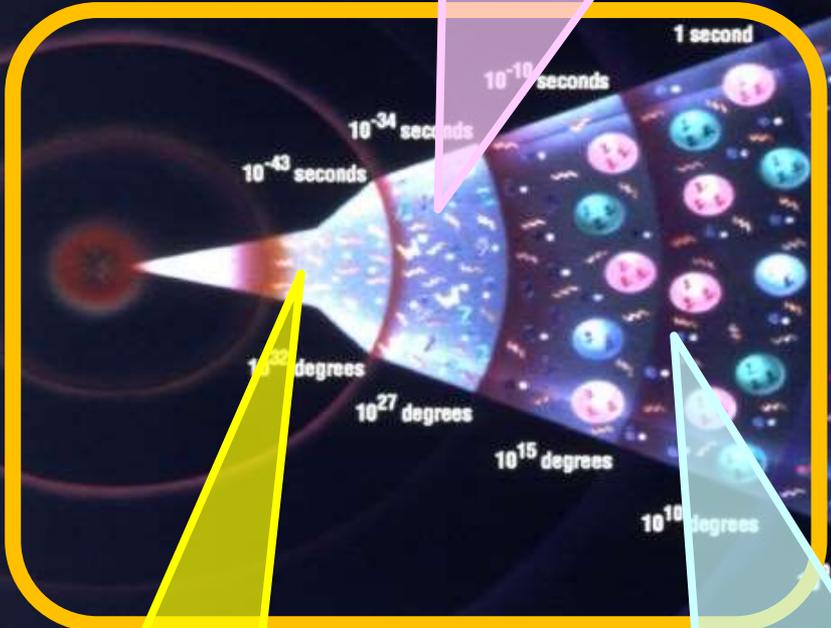


宇宙史研究における素粒子構造研究部門のプロジェクト

Big Bang

宇宙マイクロ波背景放射

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



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

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：132件，科研費：1件

受川史彦，佐藤構二，廣瀬茂輝，原和彦(筑波大)，池上陽一(客員)，中村浩二(KEK 連携教員)

• 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)：2件，国際会議講演：1件，科研費(分担)：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)

• 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：3件，科研費：1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)

2024年3月15日 TCHoU素粒子構造部門ワークショップを開催予定

Large Hadron Collider (LHC)

スイス、ジュネーブ郊外のCERNにある大型加速器
世界最高エネルギーでの素粒子実験

$E_{CM} \leq 14$ TeVでの陽子・陽子衝突

これまでの経緯：

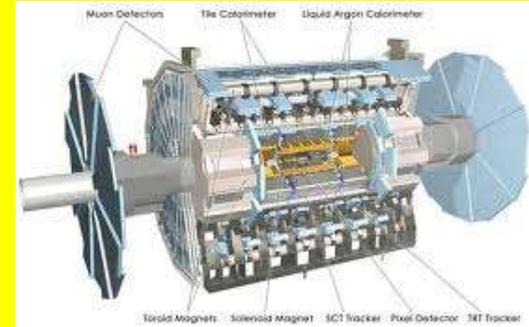
2011 物理Run開始

2012 ヒッグス粒子発見

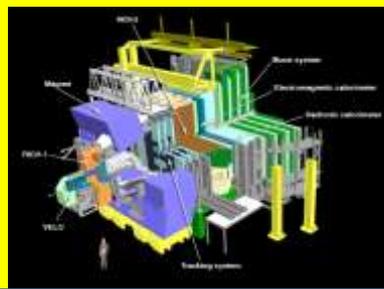
2022~2025 Run 3

2029~ 高輝度化したHL-LHC実験

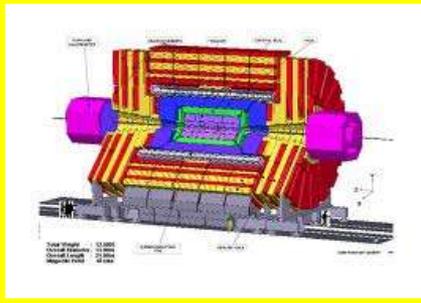
ATLAS実験



LHCb実験 B物理



CMS実験



ALICE実験 QGP



円周27km

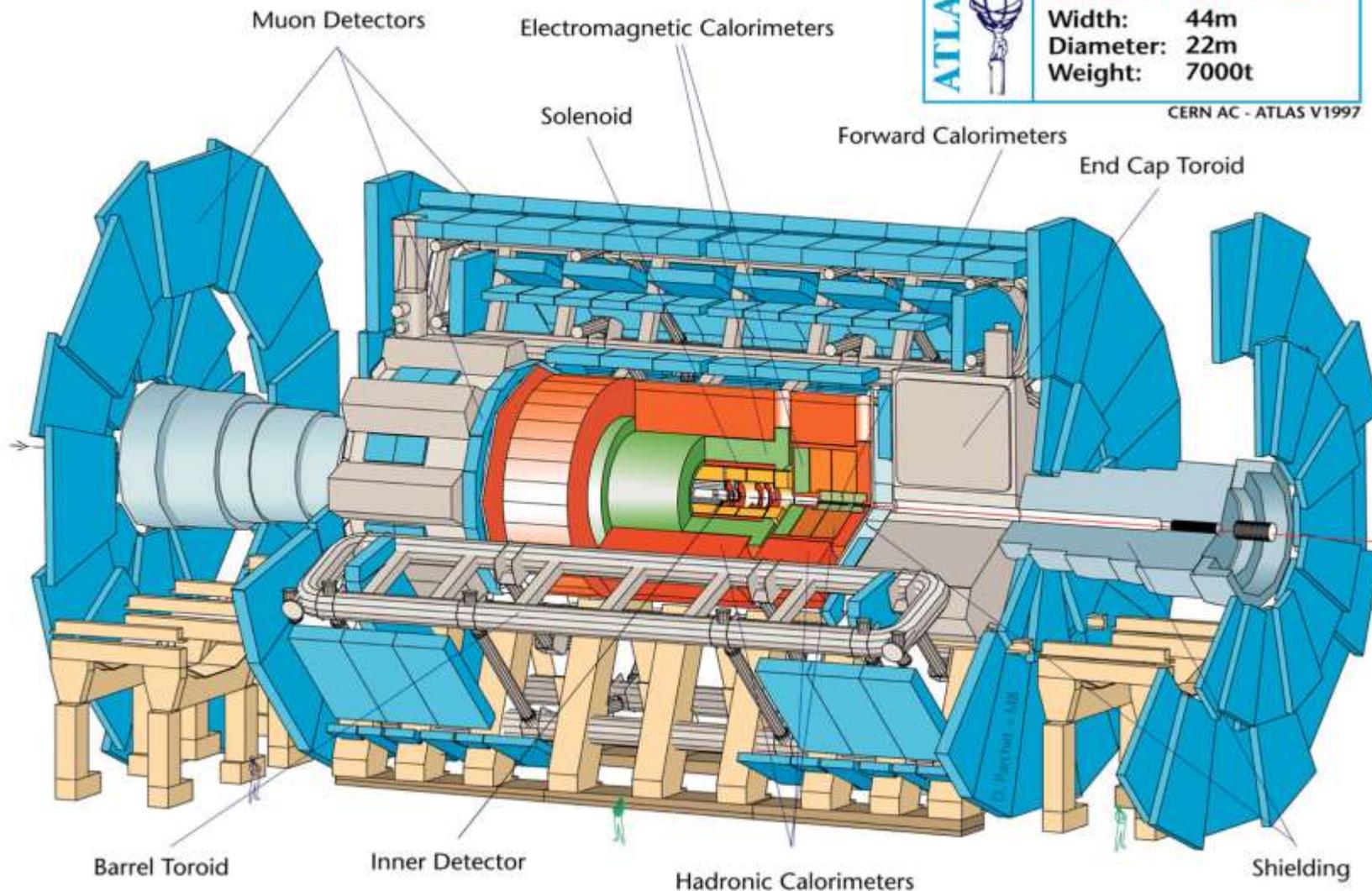
陽子を最大7 TeVまで加速して正面衝突

ATLAS検出器

総重量 7,000 t

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

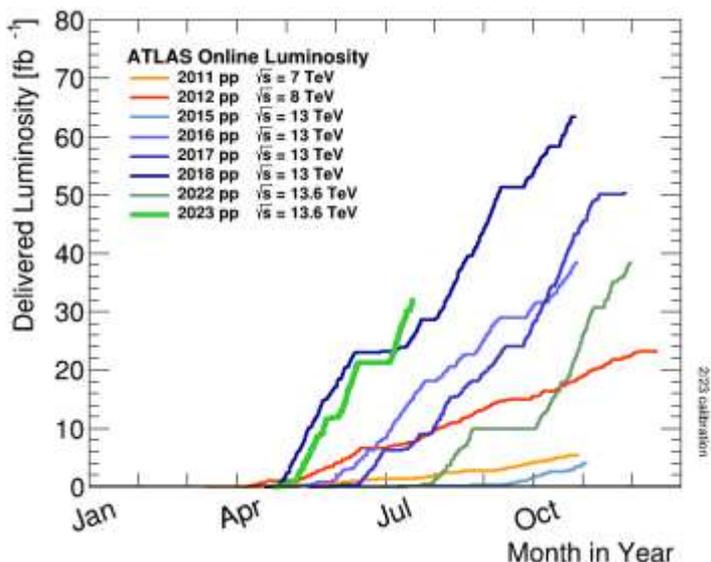
CERN AC - ATLAS V1997



- 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/ATLAS実験の現状

- 世界最高エネルギーでの素粒子実験 陽子・陽子衝突型加速器
- 2022-2025 Run 3運転 (250 fb⁻¹ を蓄積予定, Run2の~2倍)
 - $E_{CM} = 13.6 \text{ TeV}$ (Run1: 7-8TeV, Run 2: 13TeV, LHC設計: 14TeV)
 - 2023年は、クエンチした際に超電導磁石が故障したため、陽子・陽子衝突は7月まで。
- ATLAS日本グループでは、2023年には130台のシリコン・ピクセル・モジュールの試験量産を行い、筑波大グループも貢献した。
 - 2024年からは、本実験にインストールするモジュール2800台の量産を行う。



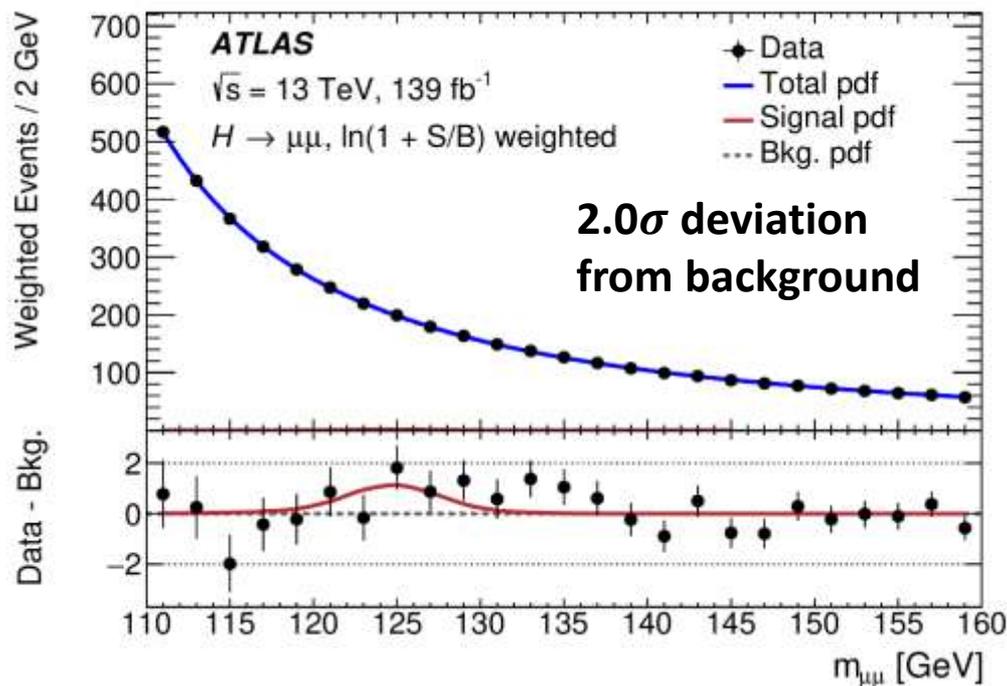
年ごとにATLAS実験が取得したデータ量。



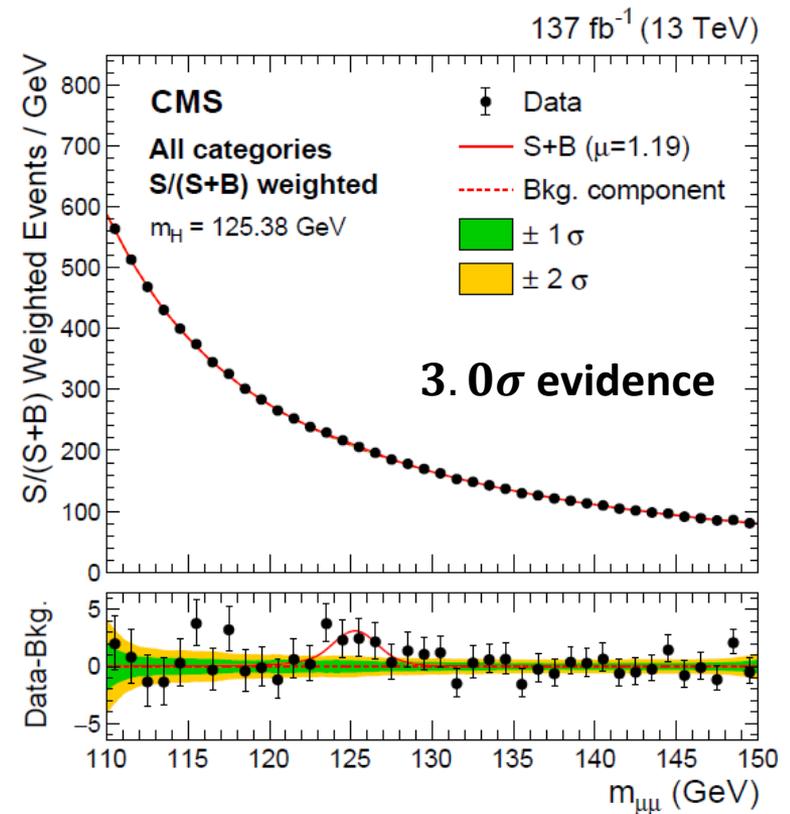
千葉県館山市のクリーンルームでの品質管理の様子と、試験量産されたピクセルモジュール

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



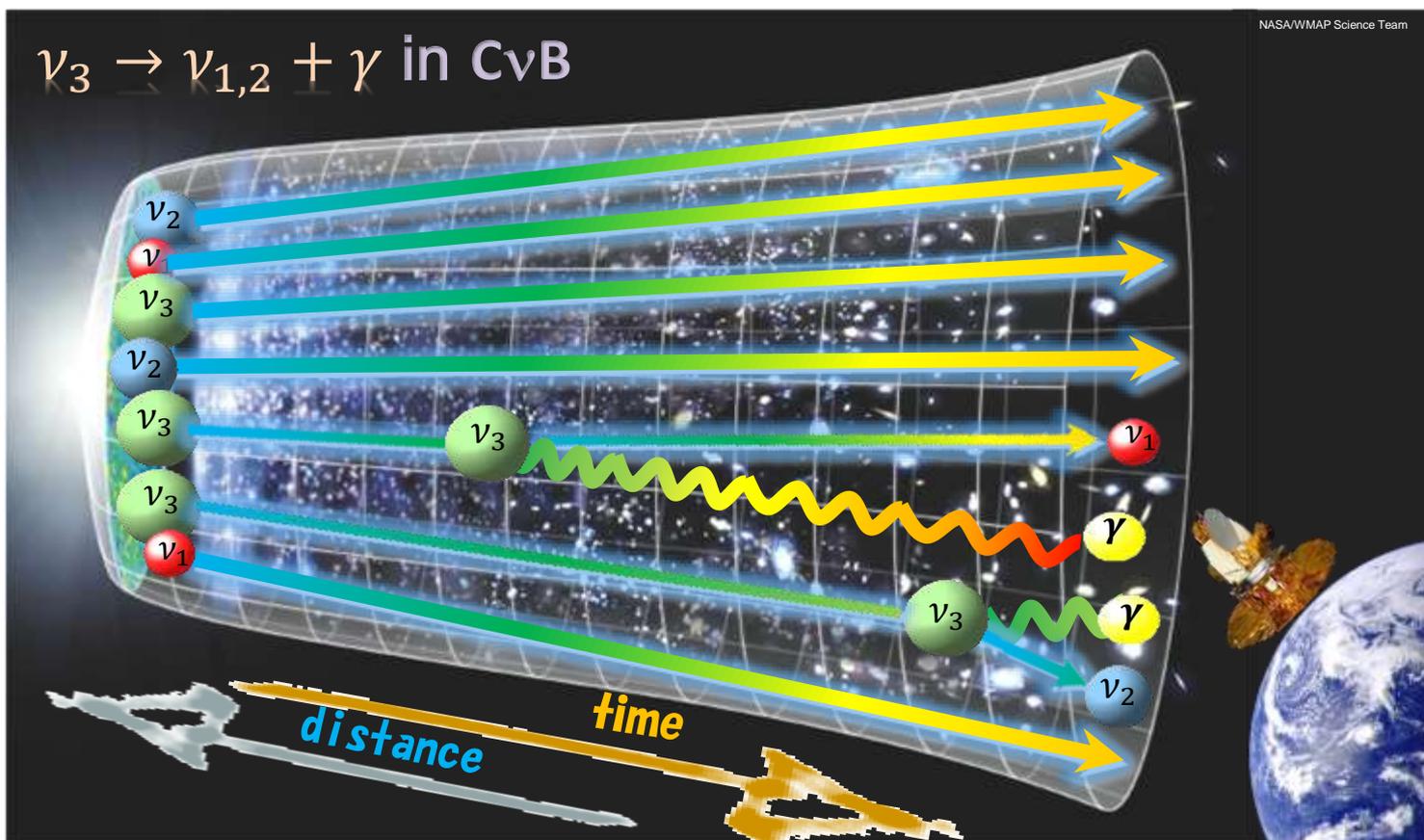
JHEP 01 (2021) 148

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, およびその後には衛星実験を計画

→ 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 $50\mu\text{m}$ 域の単一光子分光

– 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

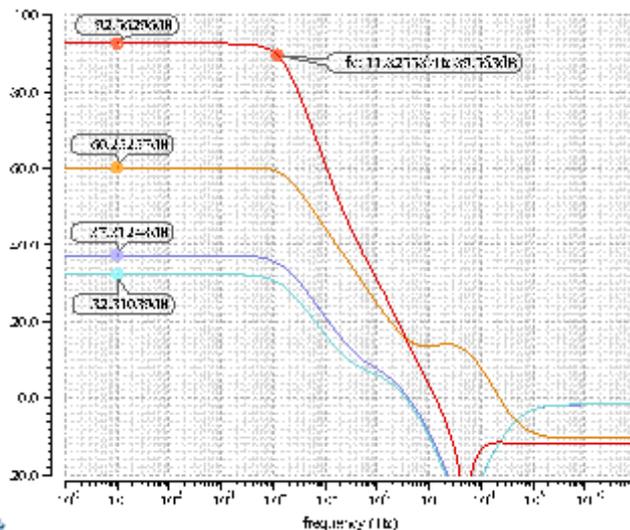
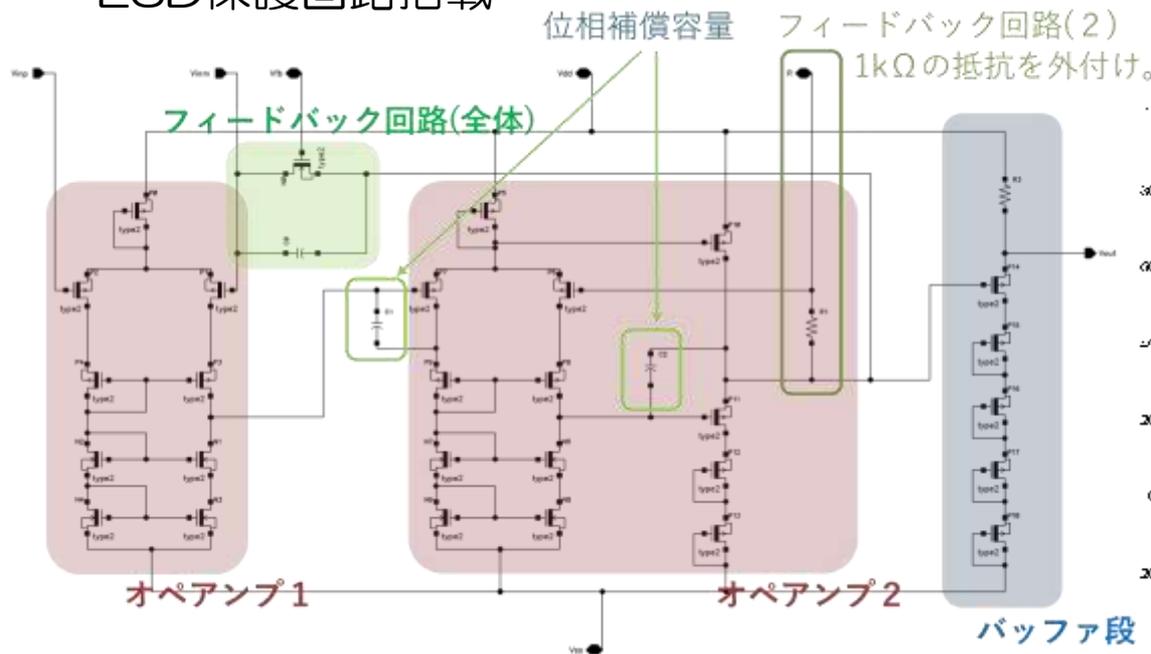
光量子部門との連携：光量子部門のプロジェクトの1つ

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。

- 2022年に設計・製作した増幅器の極低温試験からの Feedback
- ➔ 本年度 SOI wafer MPWランで新しい設計の極低温アンプを製作，納品待ち
 - 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
 - 500Ωシャント抵抗入力の3段増幅回路
 - ESD保護回路搭載

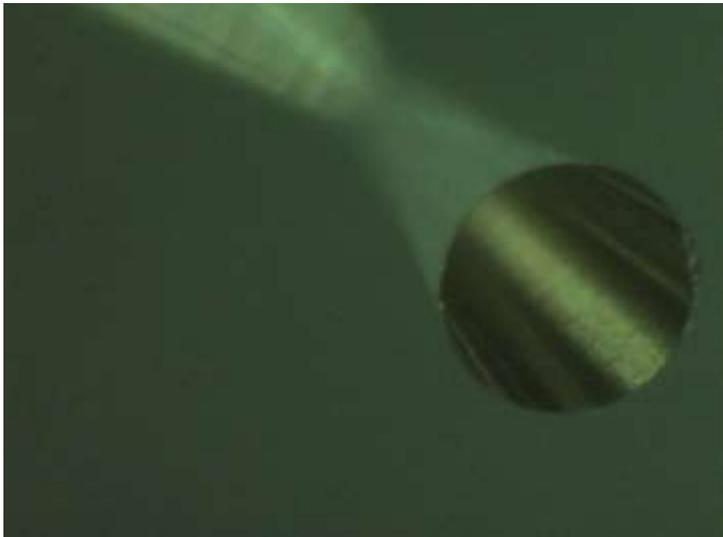
開ループゲイン 93db
GB積 >10MHz
(回路シミュレーション)



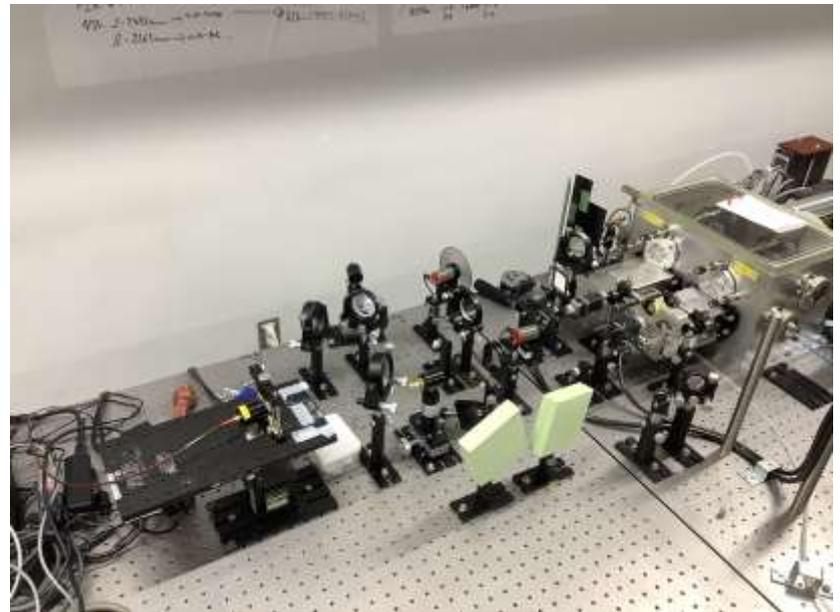
ロケット実験光学系（関西学院大，福井大，中部大との連携）

- 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
- 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
- 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の設計・試作・テスト

石英製サブミリサイズ集光器
入射口400 μ m Φ
射出口60 μ m Φ



福井大遠赤センター/中部大の遠赤外分子レーザー装置（波長47.6 μ m, 118.8 μ m など）を用いた評価



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(TCHoU, 関学, 福井大, 中部大)



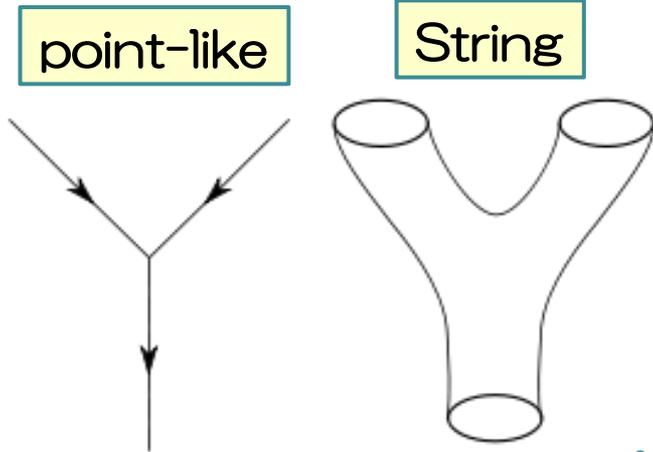
- ロケット搭載冷凍機： TCHoUと企業による試作機製作
- STJ反射防止膜： TCHoUと企業による試作機製作
- STJ検出器・光学系校正用遠赤外線源： 福井大遠赤センター
- ロケット実験のその他の開発要素：
長波長フィルター, フロントエンドエレクトロニクス, DAQ, 無線データ転送など
- ✓ ロケット実験提案書を JAXAに2019年度以降, 毎年提出
 - サイエンスの重要性は評価されるも, 検討後の再提案推奨という回答。
2023年度も提案書を提出。JAXAロケットシンポジウムにて提案の報告

遠赤外域天文観測衛星計画(2030年代) : PRIMA, FIRSST, SALTUS

- PRIMA の General Observer Science Book ^ CνB崩壊光探索の proposal を投稿

超弦理論 —より完全な定式化に向けて—

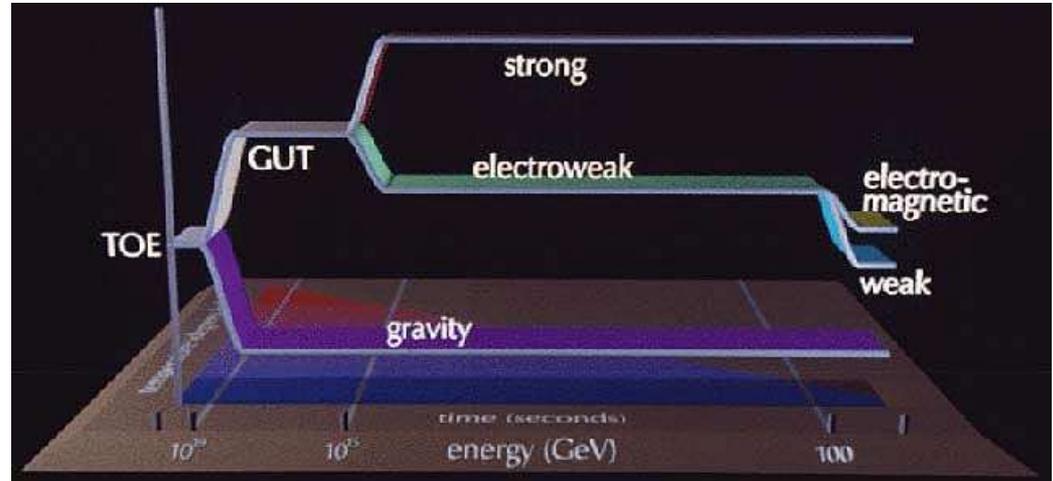
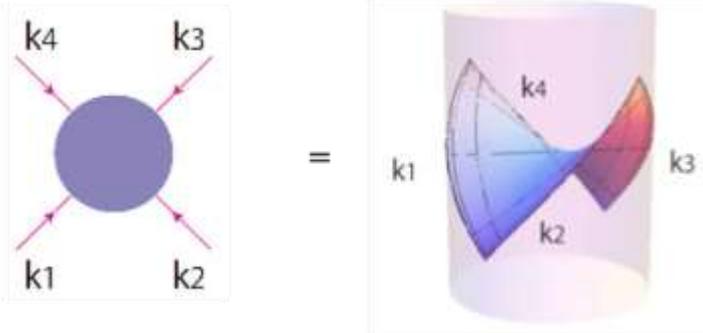
◆ 弦の場の理論



◆ 行列模型

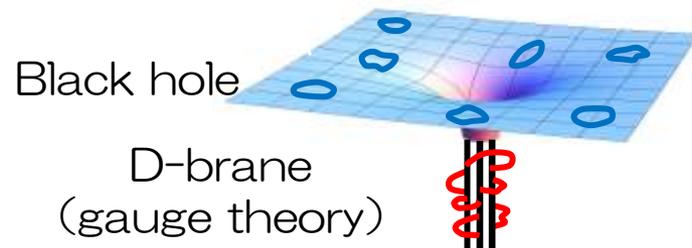
超弦理論の非摂動的定式化を与えていると予想

◆ 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) 行列模型
- (2) ゲージ/重力対応
- (3) 弦の場の理論

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。

2023年度の成果

- 論文：3件，国際会議講演：3件，国内学会：14件
 - LorIIIB超弦理論と行列模型の演算子間の関係を与えた
 - M5ブレーンのDentz型行列模型の経路積分の構造を明らかにした
 - BPS解を見つけた
 - タキオン真空解周りの弦の振幅を計算した

行列模型

ゲージ/
重力対応

弦の場の理論

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
- Strebel differentialを用いた弦の場の理論
- 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