

筑波大素粒子実験グループ 研究内容の概観

廣瀬茂輝

2025/10/09

ILC Japan大学訪問(筑波大学)

■ 研究室の構成

※休学中の学生はメンバーリストには入れていない。

ATLAS / 半導体検出器開発 (エネルギーフロンティア)

物理解析

- 受川(教授)
- 佐藤(講師)
- 廣瀬(助教)
- 北(D3)

LGAD

- 佐藤(講師)
- 堀越(M2)
- 村山(M2)
- 小林(M1)

ITk

- 佐藤(講師)
- 廣瀬(助教)
- 菅原(M2)

GaN

- 廣瀬(助教)
- 飯田哲(M2)



COBAND

- 金(特命教授)
- 武内(准教授)
- 飯田崇(助教)
- 柏木(D3)
- 小川(B4)

PIKACHU

- 飯田崇(助教)
- 大森(D2)
- 石舘(M2)
- 石上(M1)

2025年度 6 1 0 5 2 14 1

年度	D3	D2	D1	M2	M1	大学院生合計	学群4年次生
2024年度	4	2	1	5	5	17	1
2023年度	3	2	2	5	5	17	4
2022年度	3	0	2	7	5	17	1
2021年度	4	0	0	5	7	16	4

■ 物理研究 @ ATLAS

• ここ数年の主な研究トピック

– ヒッグス粒子の物理

- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ の測定
- ヒッグス対生成探索
- $H^+ \rightarrow t\bar{b}$ の探索
- VBF生成における非共鳴LFV過程の探索

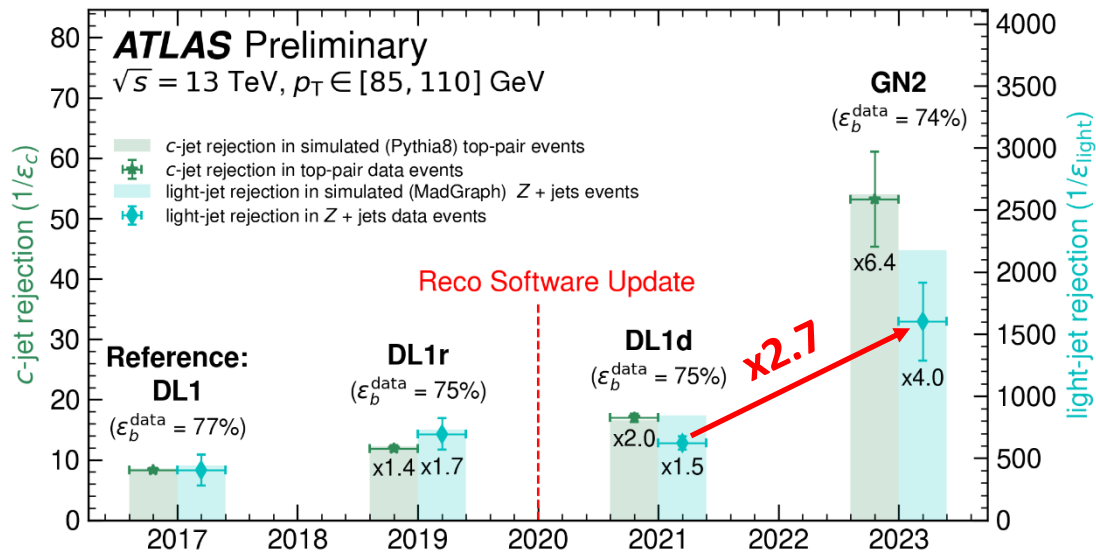
– 標準模型の精密測定

- セミレプトニックチャンネルを使ったVBS測定

• 最近の研究成果

- $b\bar{b}\gamma\gamma$ 終状態によるヒッグス対生成探索 (北、廣瀬) [ATLAS, arxiv. 2507.03495 \(submitted to Phys. Lett. B\)](#)
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ の微分断面積測定 (廣瀬) [ATLAS, JHEP 03 \(2025\) 010](#)
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ のCP位相の測定 (廣瀬) [ATLAS, Eur. Phys. J. C 83 \(2023\) 563](#)
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ の生成断面積測定 (廣瀬) [ATLAS, JHEP 08 \(2022\) 175](#)
- $H^+ \rightarrow t\bar{b}$ の探索 (山内、佐藤、廣瀬) [山内, 日本物理学会第77回年次大会](#)
- VBF生成における非共鳴LFV探索 (和田、廣瀬) [和田, 日本物理学会2021年秋季大会](#)
- セミレプトニックチャンネルを使ったVBS測定 (若狭) [若狭, 日本物理学会2020年秋季大会](#)

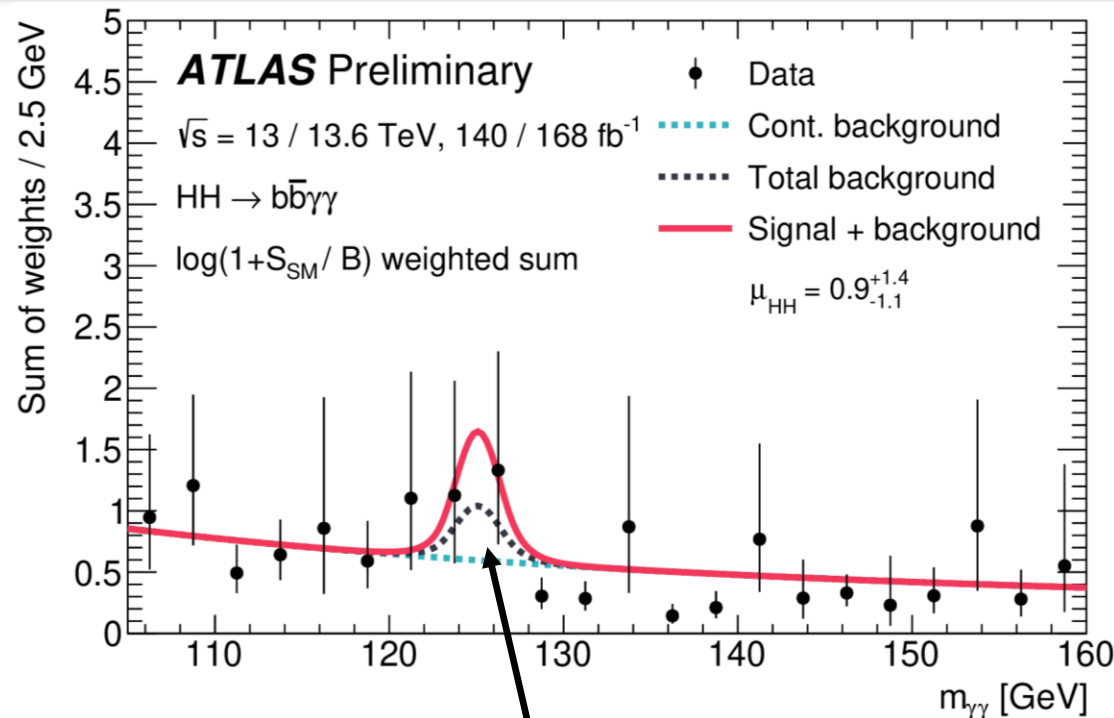
■ $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ 探索



FTAG-2023-07 Year of tagger deployment

• 前回解析から様々な改善

- 統計量: $140 \text{ fb}^{-1} \rightarrow 308 \text{ fb}^{-1}$ ($\times 2.2$) ~ **50% improvement**
- bタグの向上: background rejection $\times 2.7$
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ を利用したkinematic fit
- BDTによる領域分けの最適化 ← 北さんの主要な貢献



125 GeVピークの約半分がHH信号

~ 35% improvement

• 結果: 単独の解析で、Run-2 HH combinationに匹敵する結果に

$$\mu = 0.9^{+1.3}_{-1.0}(\text{stat})^{+0.6}_{-0.5}(\text{syst}) [0.8\sigma] (-1.7 < \kappa_\lambda < 6.6)$$

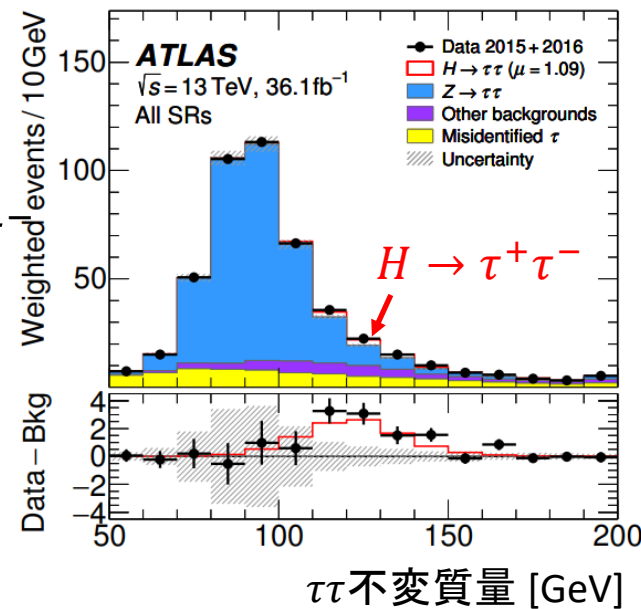
■ $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 崩壊の測定

- よく似た性質を持つ $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 崩壊との分類が重要
- 機械学習で分類器をつくる
 - Boosted Decision Treeで、分類器に $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ と $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ の特徴を学習させる
 - $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ の純度が高い領域で統計解析
- 明瞭な $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 信号が見えた！

$$\sigma = 2.94 \pm 0.21 \text{ (統計)}^{+0.37}_{-0.32} \text{ (系統)} \text{ fb}$$

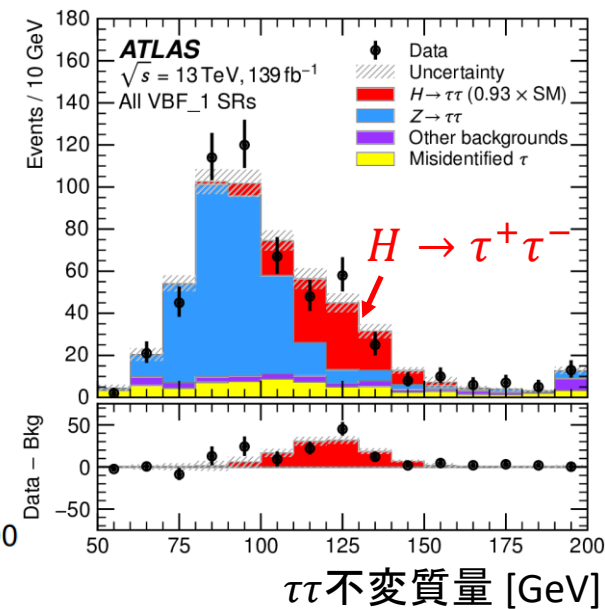
- 生成断面積の測定精度**13%** ← 前回解析の23%から大幅な向上
- 標準模型とよく一致する結果
- この解析を発展させ、高運動量領域 ($p_T > 300 \text{ GeV}$) に特化した新しい解析を開始
 - 標準模型の振幅に対して新物理の振幅が顕著になり得る [M. Grazzini et al., JHEP 03 \(2017\) 115](#)
 - Boosted $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 再構成手法を利用した解析
 - 日本からは廣瀬のみ、海外からワシントン大、南京大、フライブルク大などが参加

Run 2途中の解析結果



[ATLAS, PRD 99, 072001 \(2019\)](#)

Run 2全データの解析結果

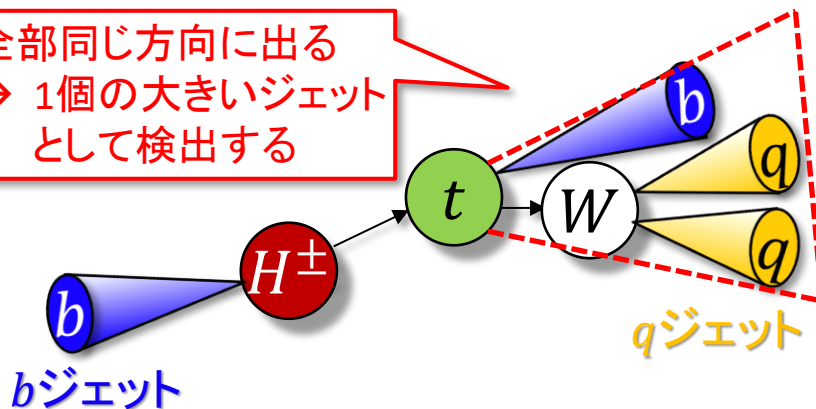


[ATLAS, JHEP 08 \(2022\) 175](#)

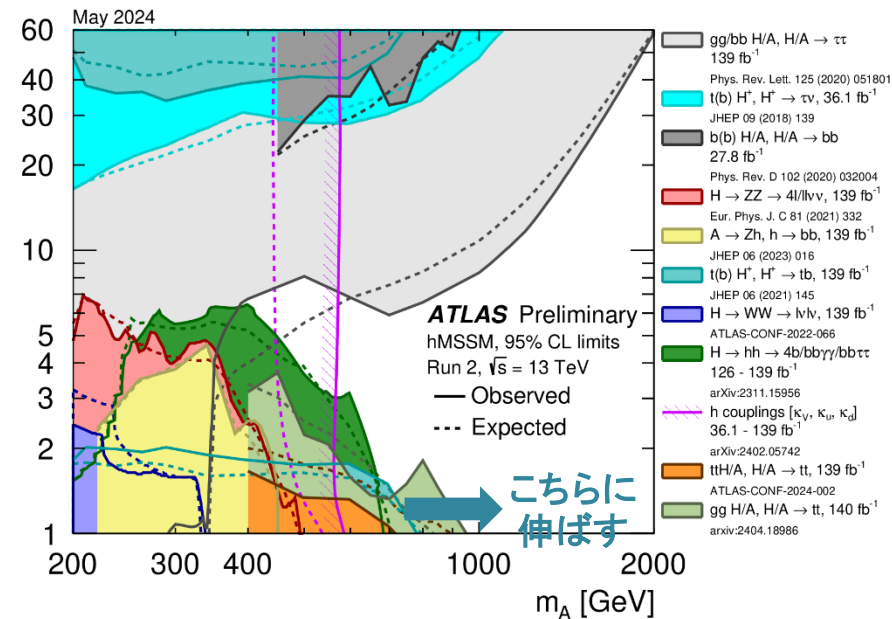
■ $H^+ \rightarrow t\bar{b}$ 探索

- $H^+ \rightarrow t\bar{b}$ は低 $\tan\beta$ に感度があるチャンネル
- Boosted top再構成でより重い領域に感度を伸ばす

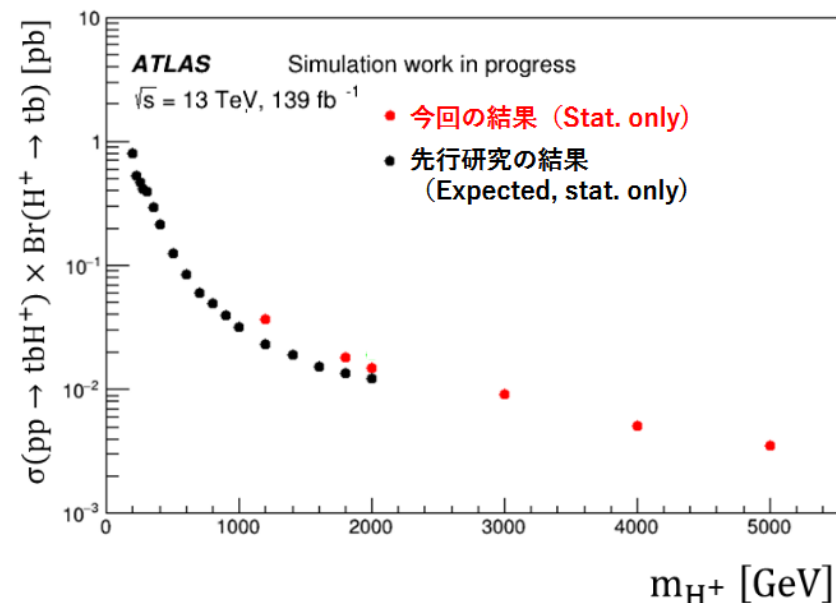
全部同じ方向に出る
→ 1個の大きいジェット
として検出する



- H^+ に限定せず、 $t\bar{b}$ に崩壊するスカラー・ベクターボソン探索を狙った
- 2 TeV以上の領域で、通常手法よりもよい結果が出せるとの見積もり
 - 残念ながら、Run 2データでの解析はここでストップ（主解析者の離籍、high mass領域での背景事象コントロールの困難等）



期待される生成断面積の上限値

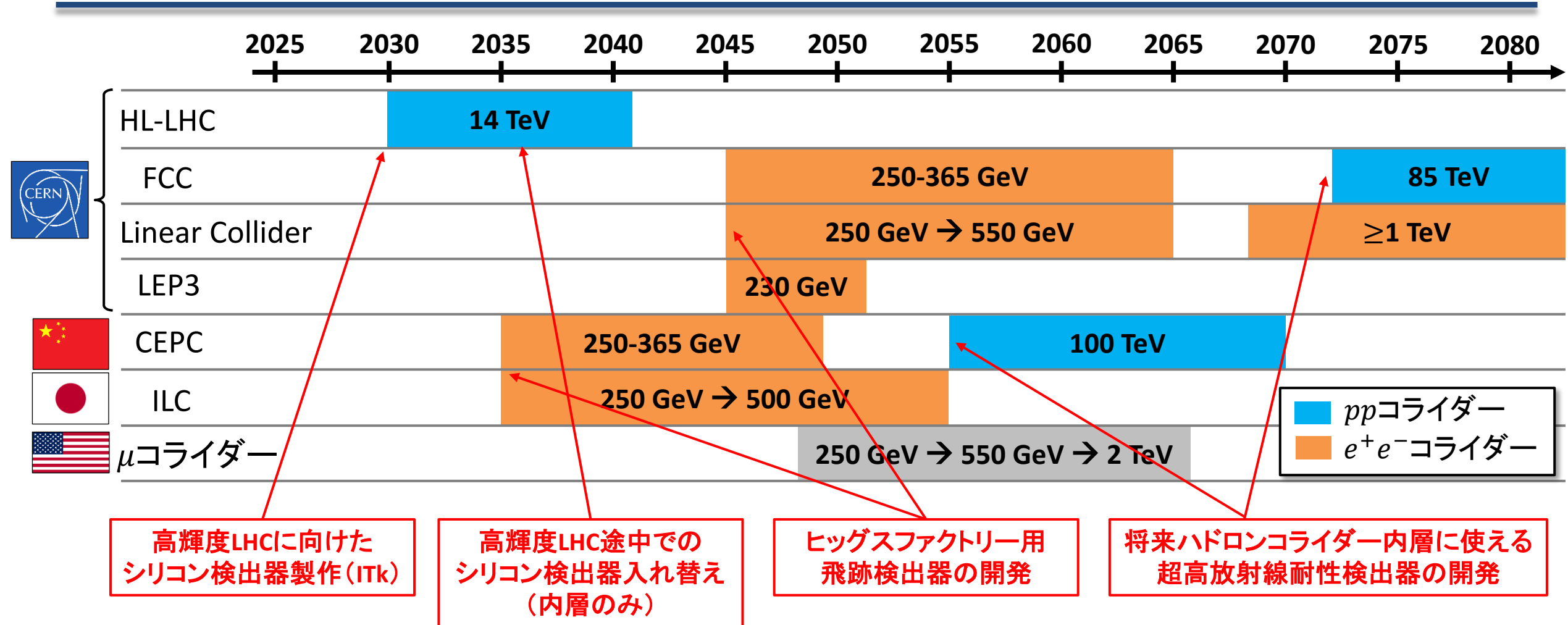


■ 物理研究のexpertise

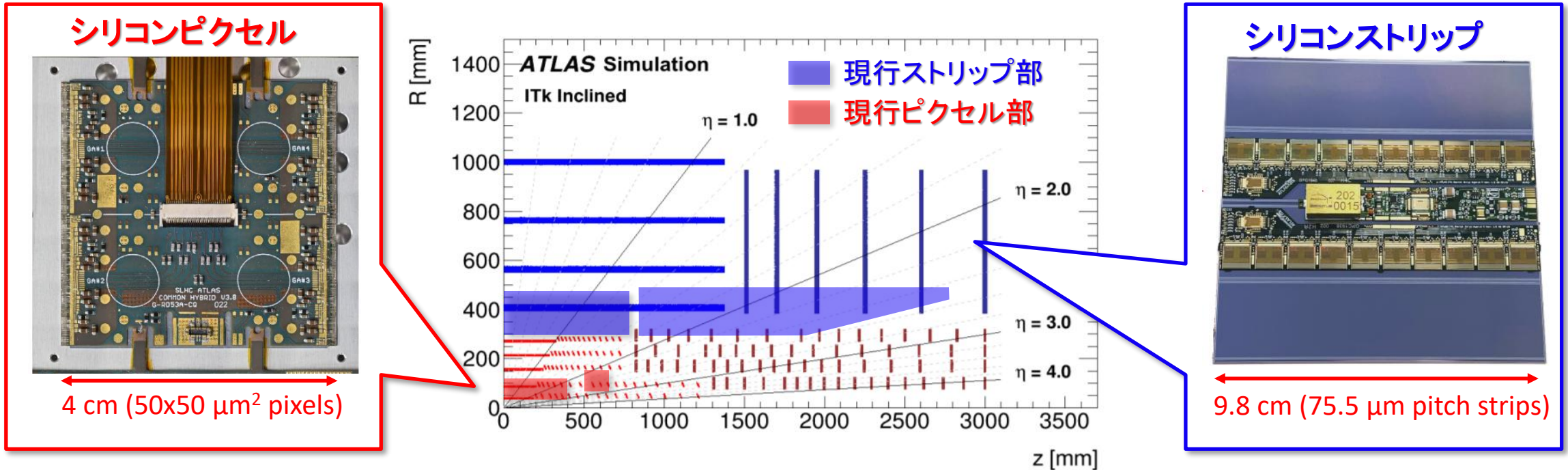
- ヒッグス粒子に関する研究
 - Run 1のころからの筑波大の貢献
- 機械学習
 - Transformerにも挑戦(北、フライブルク大との共同研究)
- boosted object
 - boosted $H \rightarrow \tau^+\tau^-$: 日本でやっているのは廣瀬のみ(もっと流行らせたい)
 - 高運動量ヒッグスの測定
 - ヒッグスに崩壊する重い粒子探索
 - $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ 終状態でのヒッグス対生成探索
 - boosted top
 - トップクォークに崩壊する重い共鳴状態探索で面白い

} boosted $H \rightarrow b\bar{b}$ と比べてバックグラウンド的に有利

■ 将来に向けた検出器開発



■ 検出器開発:ITk

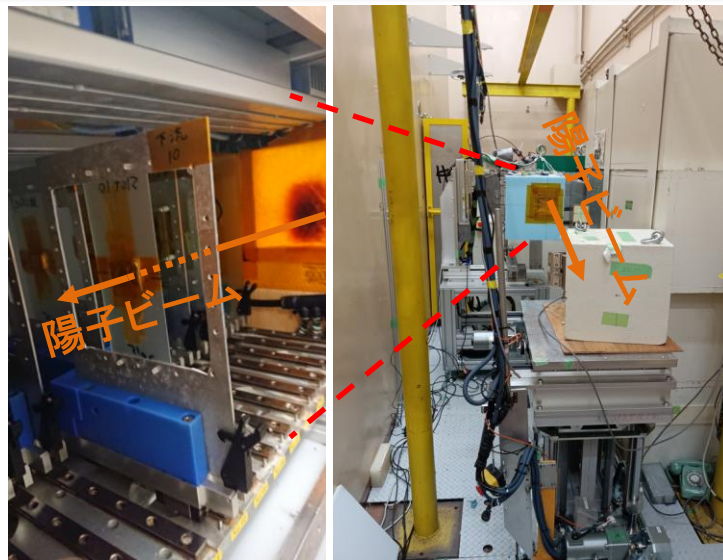
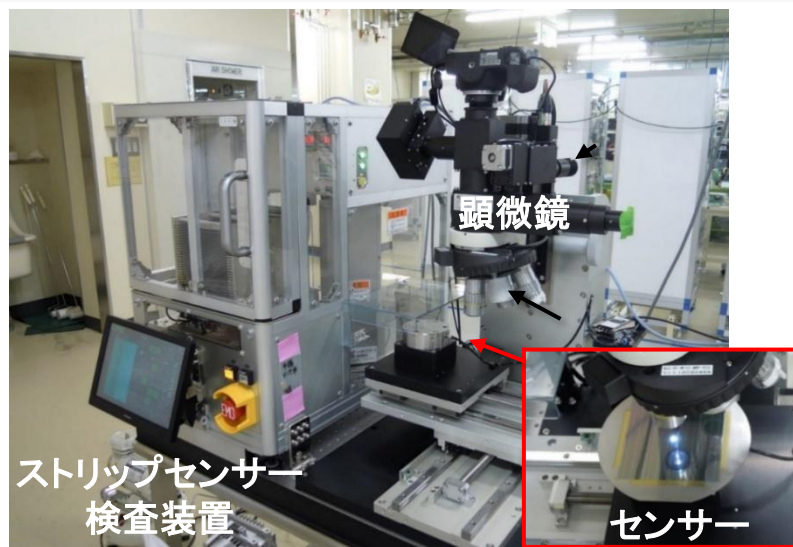


- 超大型のシリコン検出器
 - 表面積約 180 m^2 (現在は約 60 m^2)
 - 読み出しチャンネル数約50億 (現在は約9,000万)
- 日本グループが重要な役割を担う
 - 2,800ピクセルモジュール (out of 8,372) の製作、6,350ストリップセンサー (out of 22,080) の検査

KEK・筑波大・早稲田大・科学大・
お茶大・大阪大・九州大

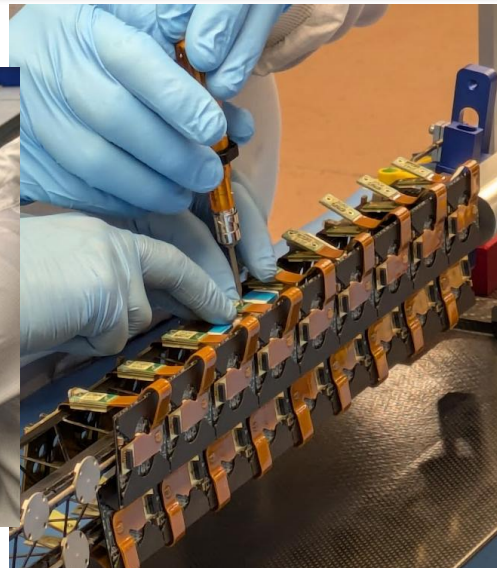
KEK・筑波大

■ 検出器開発:ITk

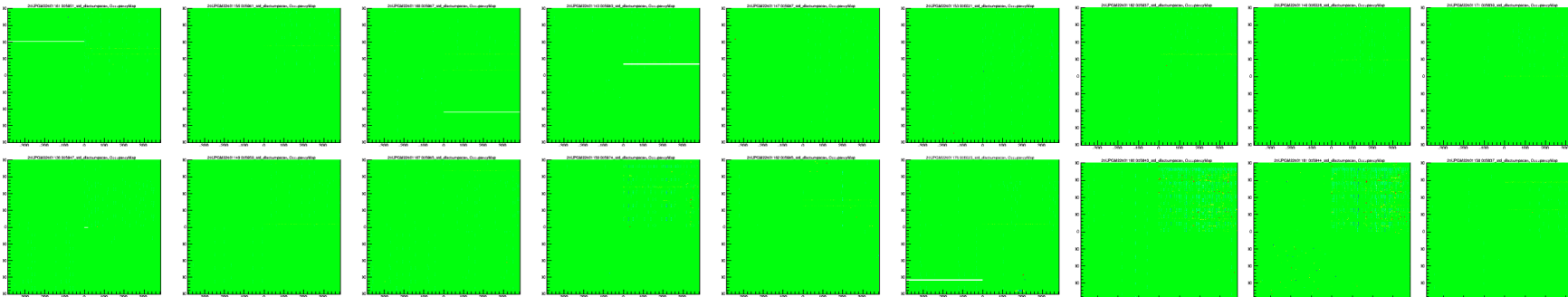


- 筑波大は、ITk用センサー開発から強く貢献
 - 日本グループでは唯一、ITkピクセル・ストリップ両方のプロジェクトに参加
- ITkストリップ: センサーの量産時検査を主導 → 2024/06で完遂！
 - 設備は浜松ホトニクスに設置 → 普段はリモートで検査を遂行
 - 人員を割けない(学生1・スタッフ1で3年間) ← 徹底した自動化で0.05 FTEぐらいの effort に
- ITkピクセル: KEKでの部品受入検査とハヤシレピックでの量産時検査双方に貢献
 - ストリップセンサー量産での知見を活かした効率化・作業環境向上を提案、実施
 - 量産モジュールのデータ解析を進めている

■ 検出器開発:ITk



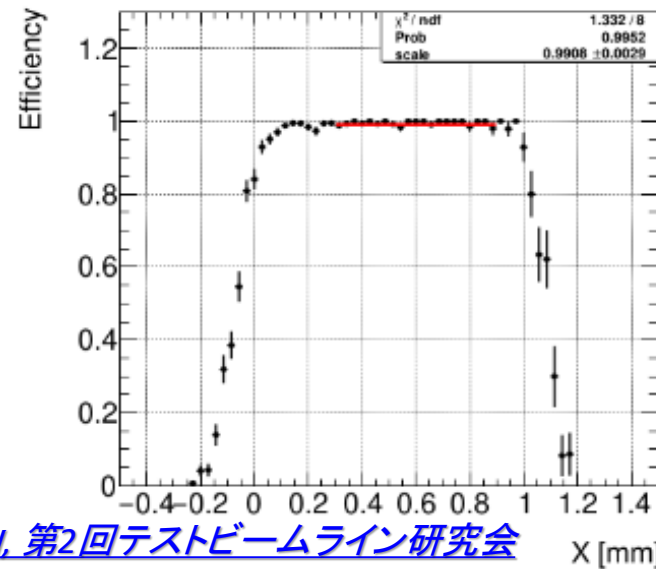
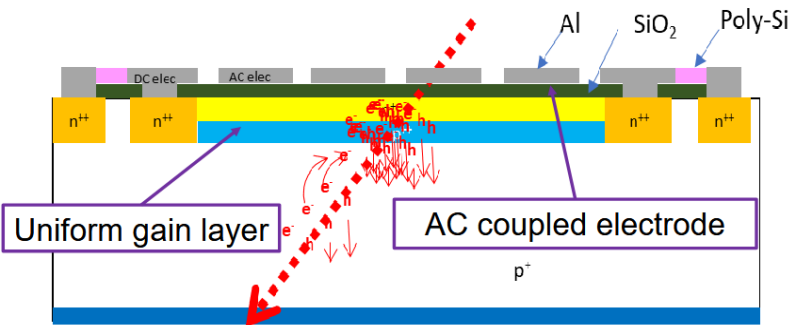
- モジュールをつくったら、次はそれを検出器として作り上げていく
 - モジュールをCERNに送る → 構造体に載せる @ CERN
- モジュールから「検出器」に作り上げていく大事な工程



緑 = 正常

測定結果の例: パンプ剥がれテスト

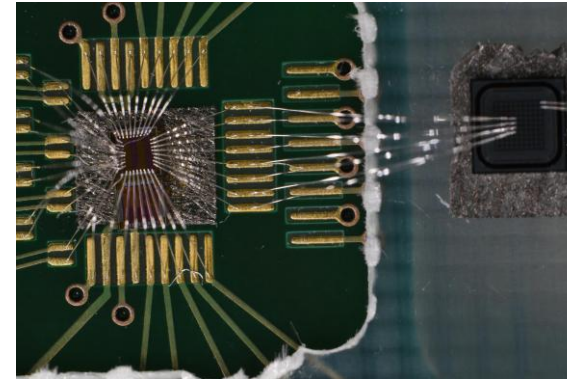
検出器開発: Low Gain Avalanche Diode (LGAD)



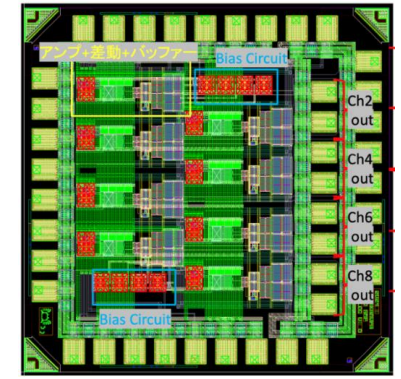
村山, 第2回テストビームライン研究会

- 増幅層を設けることで時間分解能を劇的に向上: $O(10 \text{ ps})$
 - 「AC-LGAD」のアイデアで $O(10 \mu\text{m})$ の位置分解能を実現
 - KEK-PF AR-TBでの3 GeV e-ビームテスト: よい検出効率を確認
 - 位置分解能は厳しい...Fermilabでの140 GeV陽子ビームが必要?
 - ASICで読み出す
 - Si-Ge ASIC
 - カスタムASIC (designed by KEK・中村さん)
- 性能評価を進行中
- 50 MeV陽子線照射サンプルの評価も進行中

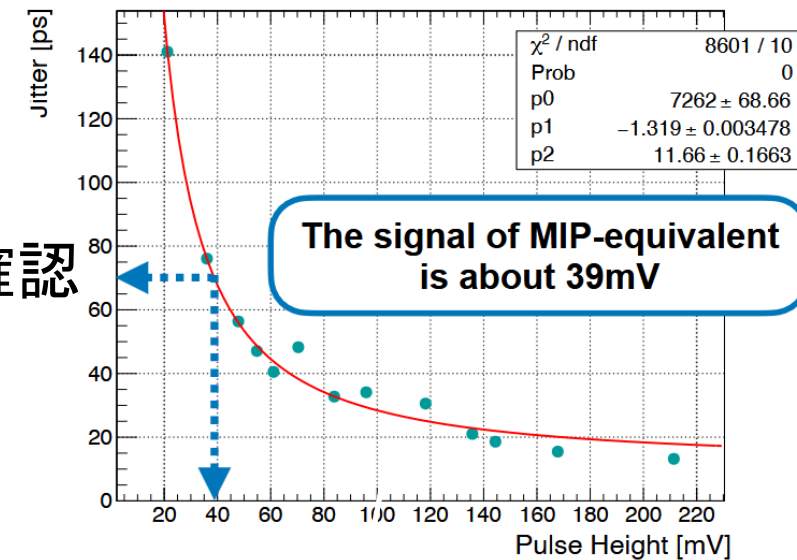
Si-Ge ASIC



独自ASIC

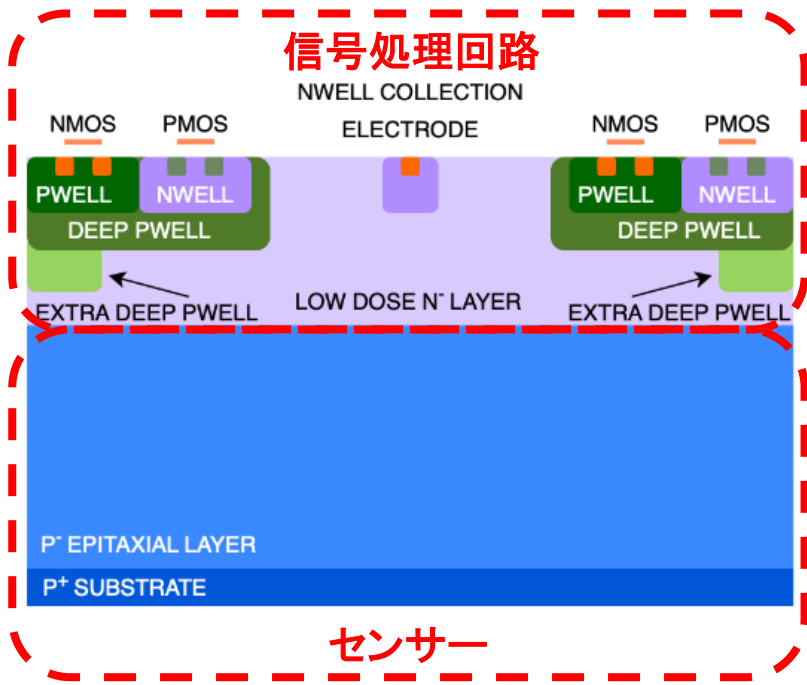


独自ASICのジッター評価結果

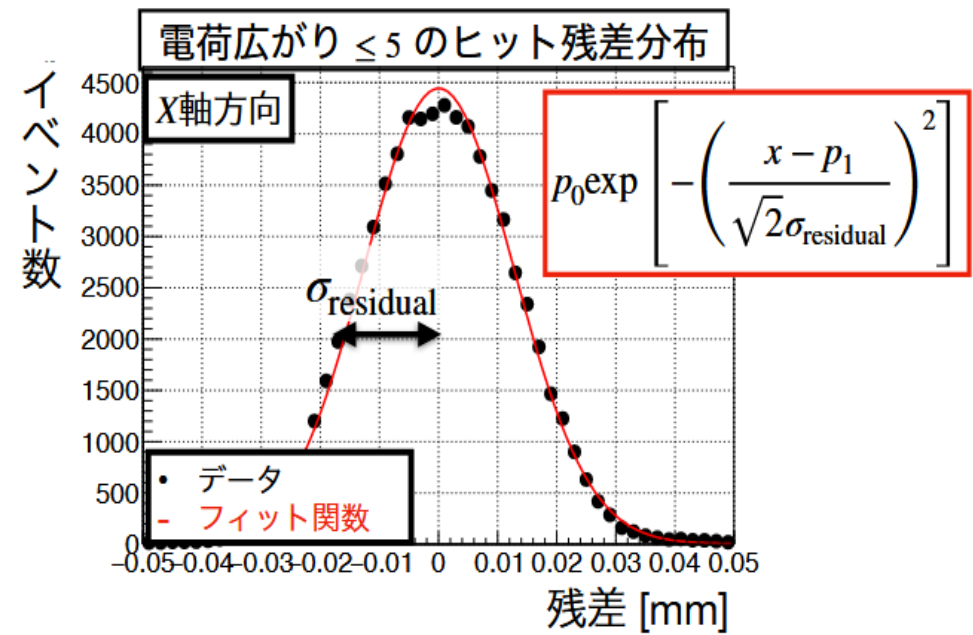


I. Horikoshi, KEK ITDC Platform-B meeting

■ 検出器開発: Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS)

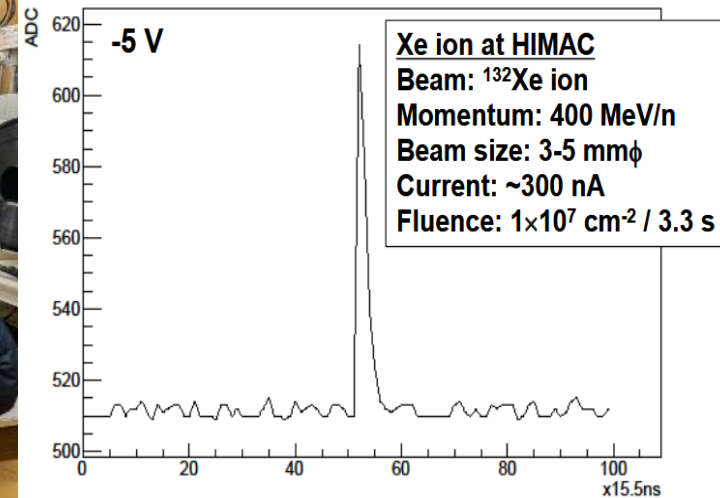
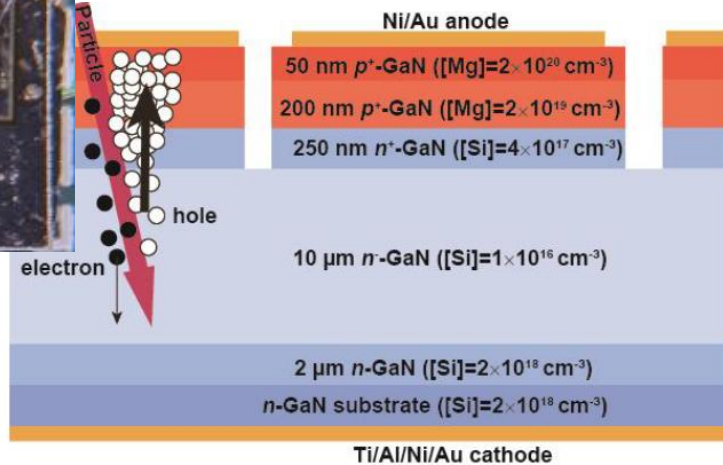


120 GeV陽子によるMALTA2の評価結果 @ FTBL



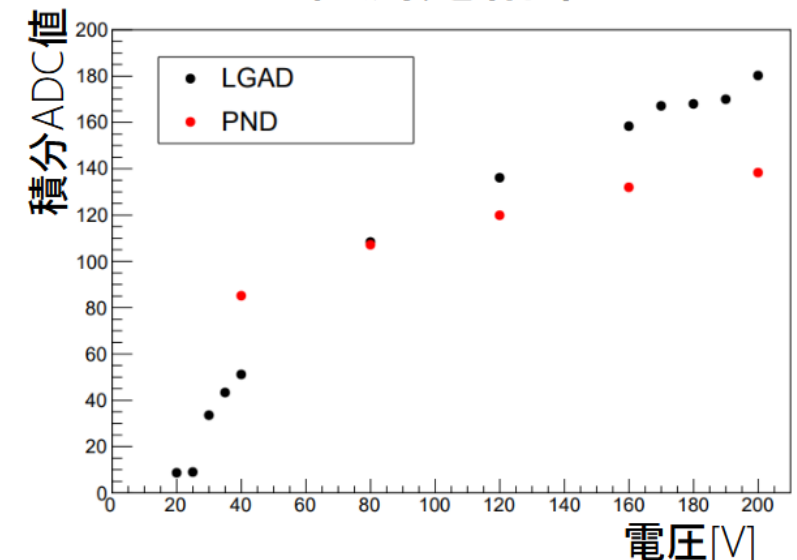
- センサーと回路を一体成型するモノリシック検出器
 - センサー層の上に回路を構成 ← バンプ接合不要のため薄型化が可能
- CERNやストラスブール、KEKとの共同開発(を計画中) 学生がいないのでまだ何もできてない...
 - MAPS AcademyでAllpix2やCadenceの使い方を学んだので、これらを駆使したデザイン(例: 物理性能の観点からのデザイン)をしてみたい
- 現世代センサー(MALTA2)に対するビームテストで9.8 μmの位置分解能を確認

■ 検出器開発：窒化ガリウム検出器



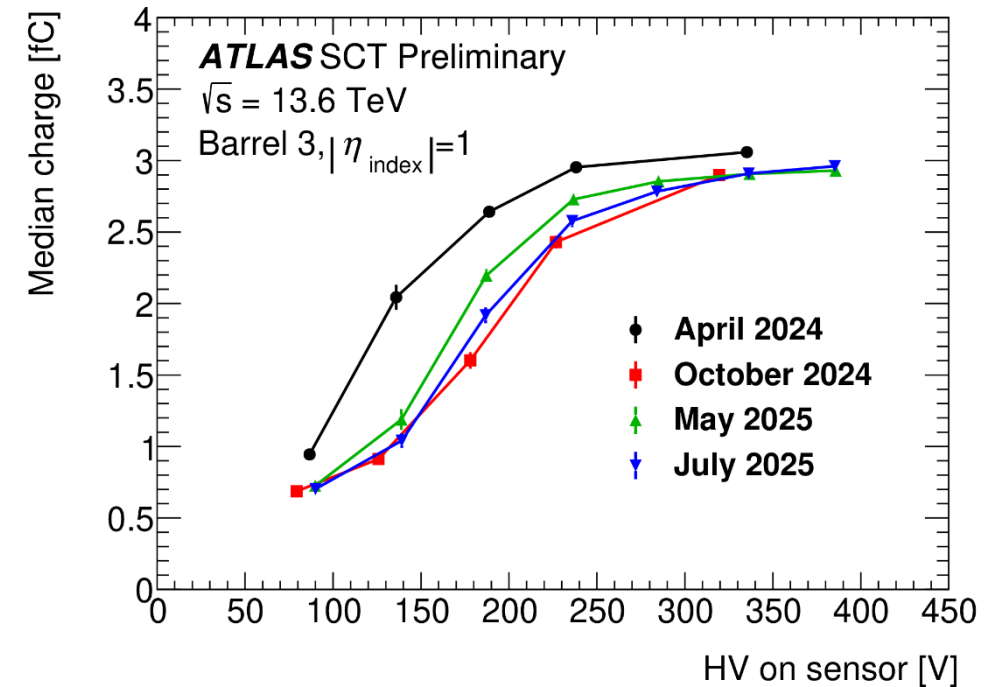
- 窒化ガリウム: $E_g = 3.4 \text{ eV} \leftarrow \sim 3x E_g(\text{Si})$
 - シリコンを超える放射線耐性(かも)
 - 筑波大物理工学域・奥村宏典氏との分野融合研究
- 信号電荷量が少ないのが課題 → LGAD構造を試作
 - 自己増幅で電荷量を稼ぐ
 - Xeでの信号は見えた
 - アバランシェが見えない → TCADでちゃんとLGAD構造を評価・最適化したい(が、GaNのTCAD自体が開発途上らしい)

QV測定結果



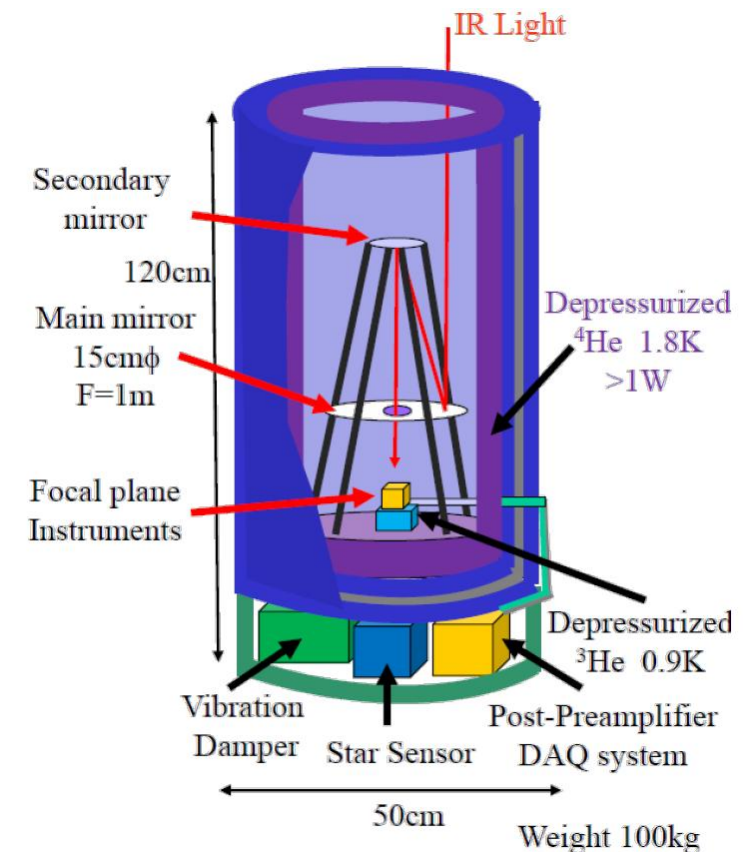
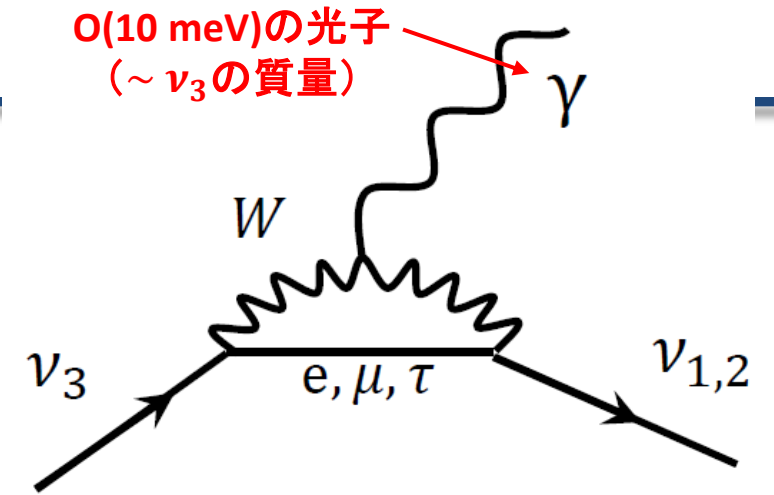
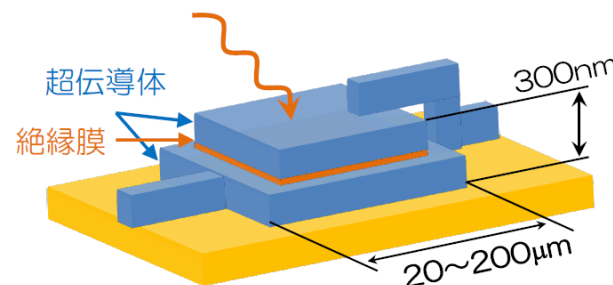
■ 検出器開発のexpertise

- シリコンストリップ検出器の運転 (ATLAS SCT)
 - 製作から筑波大が強く貢献 (原さんなど)
 - CERN現地での運転
 - 廣瀬: 運転責任者 (2019-2020) など
 - 多くの博士学生がCERNに滞在し、運転に貢献してきた
 - 性能評価研究も主導
- ITk検出器の製作
 - ピクセル・ストリップ全体をカバーしている強み
 - CERN現地での組み立て作業にも踏み込みつつある
- 検出器開発
 - LGAD: 10年近くR&Dを進めている (KEK中村さんとの共同研究)
 - 高輝度LHC途中の入れ替えを狙った開発を進めている
 - MAPS: ヒッグスファクトリーを意識しつつ本格的に始めていきたい
 - 個人的には、ちゃんと物理パフォーマンスの観点からの設計最適化にトライしたい
 - GaN: 将来ハドロンコライダーを意識しつつも、まずは萌芽的研究の段階



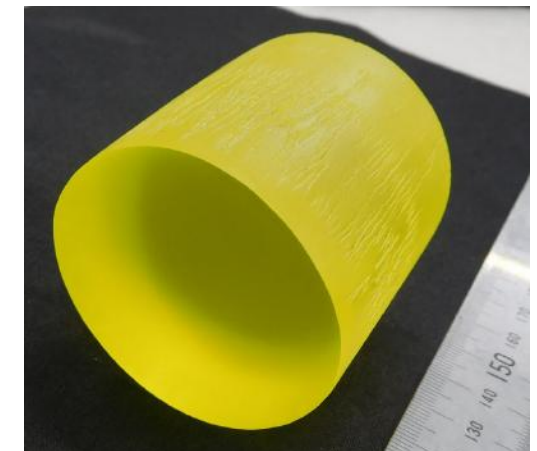
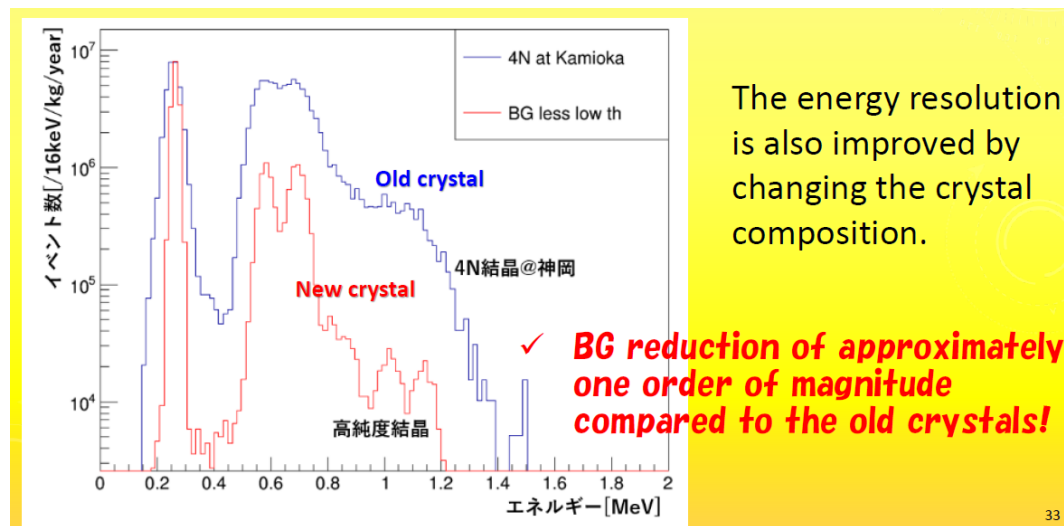
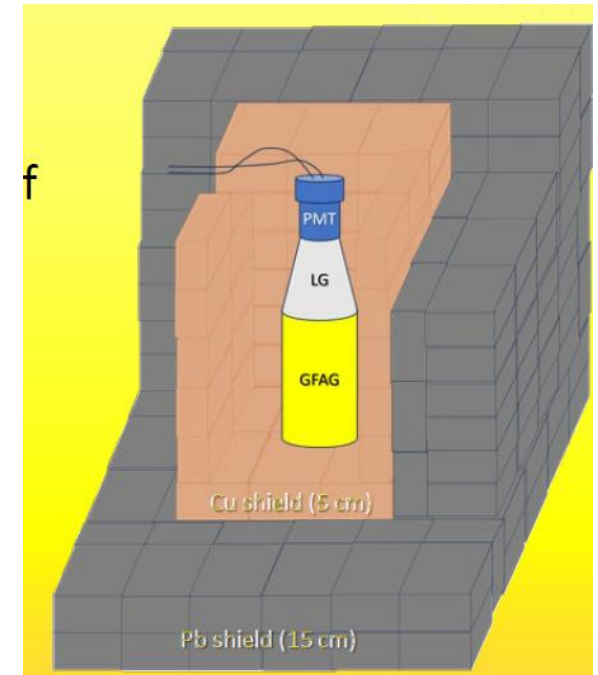
COBAND

- 宇宙背景ニュートリノを用いたニュートリノ崩壊の探索
 - 標準模型では 10^{43-44} 年 \gg 宇宙年齢
 - 右巻き W ボソンがあると 10^{17} 年程度にまで短くなり得る
- COBAND実験の戦略
 - CvBを豊富なニュートリノ源として利用
 - 高度200-300 kmで単一の赤外光子を捉える
 - 国内10大学+国外3大学のプロジェクト
- 進行中の開発
 - STJ: Superconducting Tunnel Junction
 - Nb製超伝導体センサー(AIでジョセフソン結合を形成)
 - クーパー対乖離によるトンネル電流で光子を検出
 - 極低温アンプ
 - FD-SOI-MOSFETで製作
 - 集光光学系



PIKACHU

- PIKACHU = Pure Inorganic scintillator experiment in KAmioka for CHallenging Underground sciences
 - ^{160}Gd での $2\nu 2\beta$ の観測を目指す
 - 寿命 $\sim 4.7 \times 10^{20}$ 年 ← ここを目指す
 - $0\nu 2\beta$ 探索にも重要なインプットに(原子核の行列要素の精密計算等)
 - 全15名程度のコラボレーション(筑波大のほか東北大など)
- 測定方法: GAGG($\text{Ce}:\text{Gd}_3\text{Ga}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$)結晶が鍵
 - ^{160}Gd を含んだ無機シンチレータ: 東北大学金属材料研究所で製作
 - 結晶の低バックグラウンド化、大型化が大事



■ まとめ

- 高エネルギー実験とそれに必要な半導体センサーR&Dが軸
 - ヒッグス研究+シリコン検出器
 - KEKに近い地の利を活かした半導体センサーR&Dは強みだと思います
 - KEKにある大型機器を利用できる
 - CDF時代からの伝統 ← この辺りは語れないので、受川さん・佐藤さんに語って頂けると...
- COBANDやPIKACHUのような小型研究も、各教員がフレキシブルに展開
 - 超電導センサー
 - 無機シンチレータ
- ヒッグスファクトリーへの参入も(個人的に?)模索し始めている
 - 来年度の不定性は色々ありますが...(締切伸びたらしいですよ) →
 - やっぱり高エネルギーを極める方向性は大事でしょう

募集中

勤務地: 関東 - 茨城県

公開開始日: 2025年06月09日

教授の公募 (素粒子物理学実験分野)

D125060350

国立大学

筑波大学

研究分野: 自然科学一般 - 素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理に関する実験

教授相当: 正職員・正社員 - 任期なし - テニユアトラック以外 - 試用期間なし



ILC Japan 大学訪問 (筑波大学)

● 本日の内容

14:00	→ 14:20	筑波大 研究紹介	🕒 20分
14:20	→ 15:10	イントロダクション・プロジェクト Overview 発表者: Masaya Ishino (University of Tokyo (JP)) 📎 20251009_筑波大...	🕒 50分
15:15	→ 15:30	break	🕒 15分
15:30	→ 16:00	ILC加速器 発表者: Hiroshi Sakai (KEK)	🕒 30分
16:05	→ 16:35	ILCの (Higgs Factoryの) 測定器 発表者: Prof. Wataru Ootani (ICEPP, Univ. of Tokyo), Wataru Otani (University of Tokyo (JP)) 📎 HFDetector_W0202...	🕒 30分
16:40	→ 17:10	ILC (Higgs Factoryの) 物理 発表者: Taikan Suehara (ICEPP, The University of Tokyo)	🕒 30分
17:15	→ 17:40	フリーディスカッション	🕒 25分

● 懇親会

- 19:00~ 茨城の旬 海鮮 地酒 むらさき (BiViつくば 3F)
- バスで行く方: 18:30@第一エリア前で向かいます

