HL-LHC実験に向けたITk module PreProductionにおける電気回路読み出し試験の結果解析

早稲田大学　寄田研究室　修士課程1年　小川貴弘

1. LHC-ATLAS実験

➢標準模型の検証、新物理探索を目的とした素粒子実験

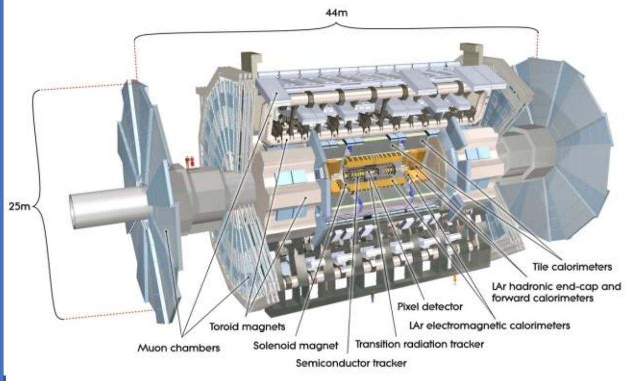
□LHC

➢陽子陽子衝突型円形加速器
➢地下約100mに敷設された全長約27kmの加速器

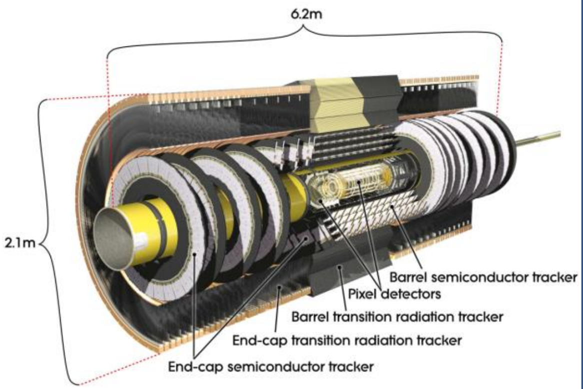
□ATLAS検出器

➢LHC-ATLAS実験で用いられる汎用検出器
➢陽子同士の衝突によって生成される粒子を測定
➢最内層に内部飛跡検出器が配置
　↳Pixel、SCT、TRT検出器で構成

ATLAS検出器概観図



内部飛跡検出器概観図

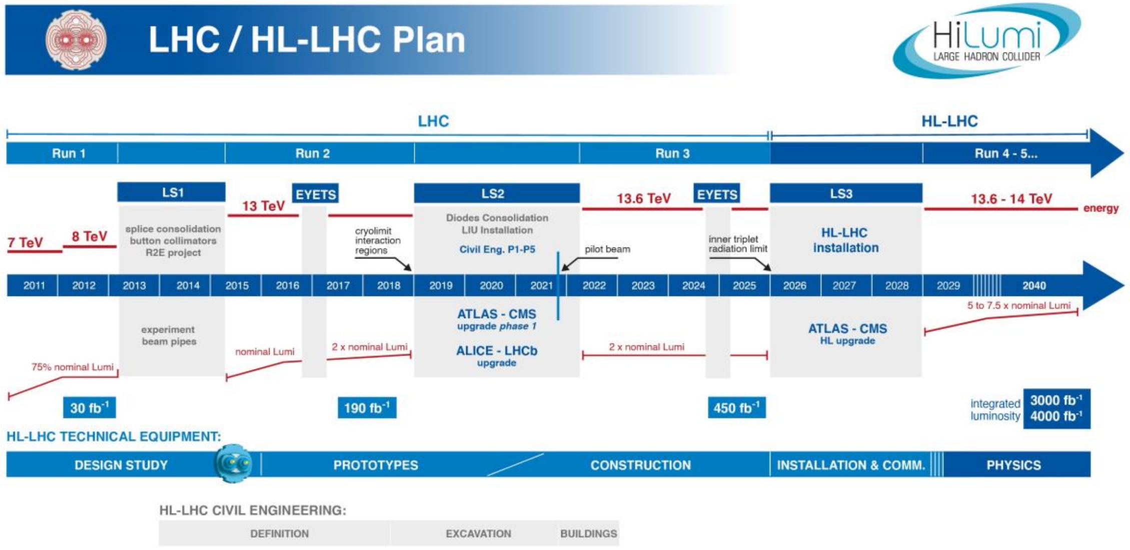


2.HL(High Luminosity)-LHC実験

➢LHC-ATLAS実験は、2020年代後半にHL-LHC実験へのアップグレードを計画
➢実験で得られるデータ量の増加が期待される
➢HL-LHCでは、陽子同士の衝突数が増加

現行の内部飛跡検出器をITkと交換する

HL-LHC実験計画



3. ITk(Inner Tracker)の量産

□ITk(Inner Tracker)

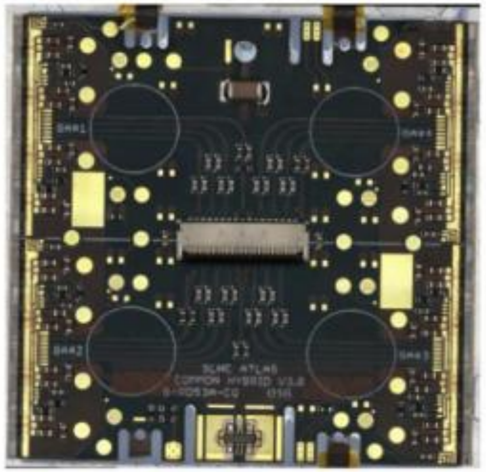
➢HL-LHC実験で内部飛跡検出器に置き換えられる検出器
➢シリコンをセンサーとした半導体検出器
➢現在、自分はITkピクセル検出器の
　Quadモジュール量産に参加

□ITkの量産

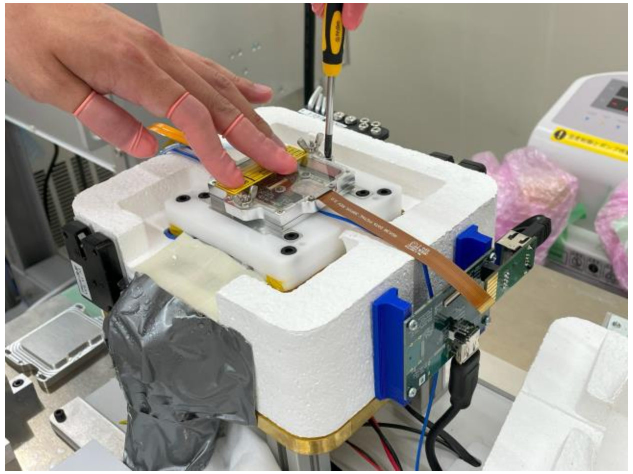
➢アップグレードに向けて、約10,000個のモジュールが
　量産予定
➢日本では、約2,000個のQuadモジュールの量産を計画
➢現在、130台を量産するPreProductionを実行中

モジュールの組み立てと品質管理試験(QC)を行う

Quadモジュール



電気回路読み出し試験の様子

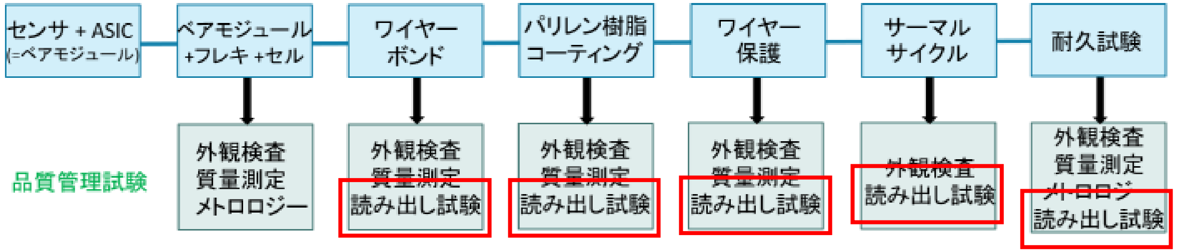


4. 電気回路読み出し試験解析

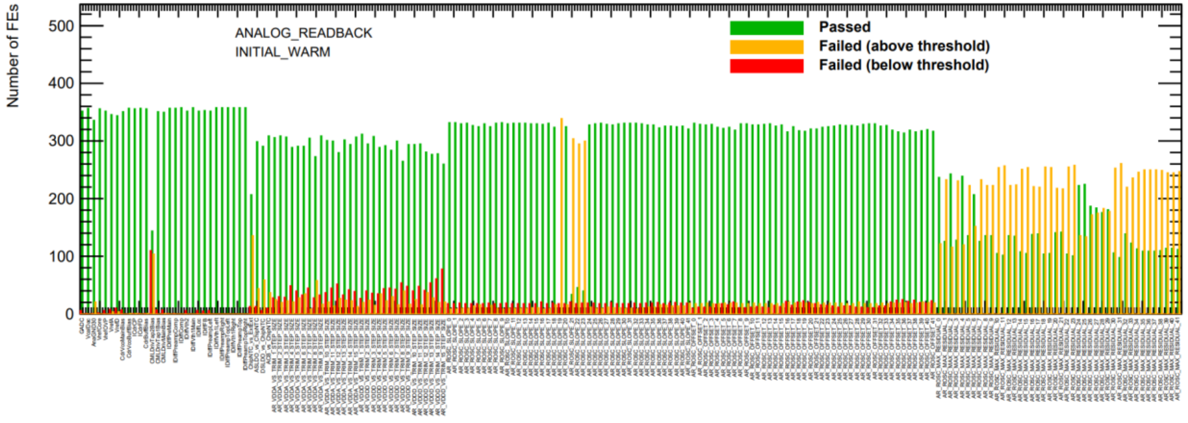
□電気回路読み出し試験

➢品質管理試験の一つ
➢モジュールの電気回路の状態を確認する試験
➢ADC-CALIBRATIONやANALOG-READBACK等の
　スキャンを実行
➢200種ほどのパラメータを解析
➢基準値から外れたチップ(Failedチップ)の数を
　各スキャンごとに調べている

品質管理試験の流れ



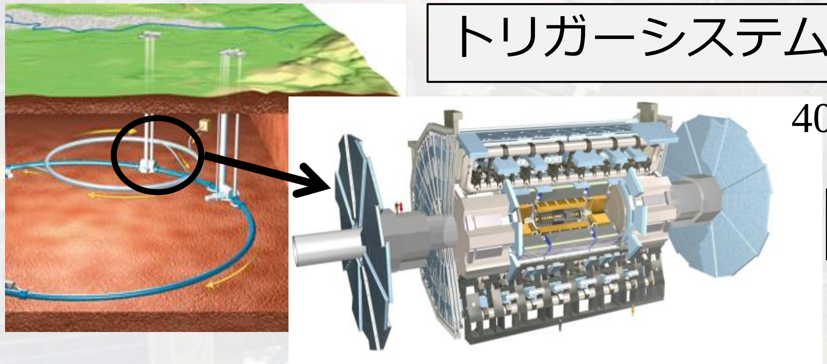
ANALOG_READBACKスキャンにおける各パラメータのFailedチップ数



FPGAアクセラレータを用いた新しいファームウェア論理回路検証手法の開発

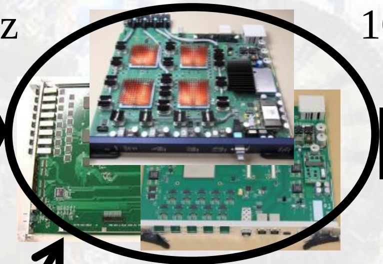
神戸大学 水引 龍吾

トリガーシステムでデータを取捨選択



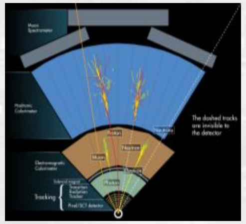
ATLAS検出器

40MHz



L1(電子回路)

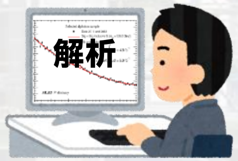
100kHz



HLT(ソフトウェア)

1kHZ

データ保存



- **不要なデータを破棄**して、2.5μs以内にデータを1/400にする。
- 高速処理するためにFPGAでファームウェアを実装
- 失われたデータは戻ってこないので**正確で速いファームウェアが必要**

・トリガーシステムの信頼性が実験成功の鍵
・ファームウェアは年々複雑化・大型化

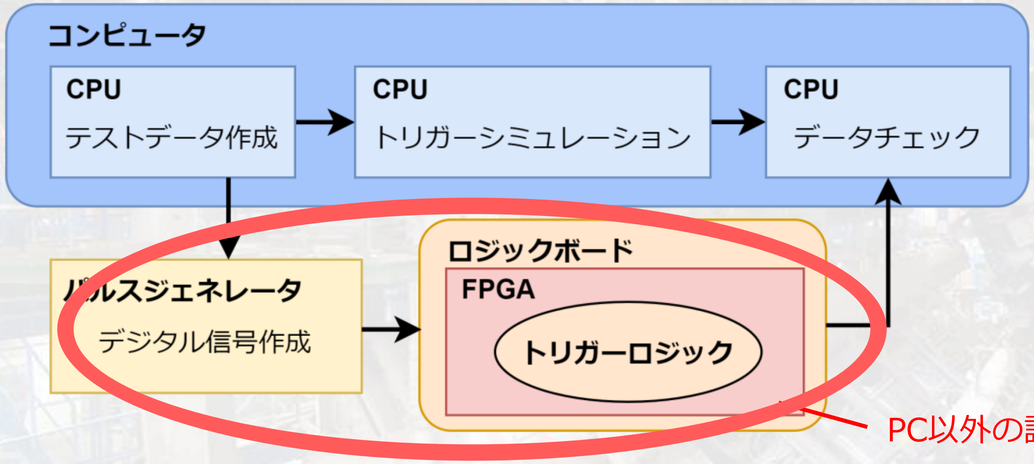
効率的なファームウェア検証システムが必要

安価なFPGAアクセラレータカードを用いて検証システムを構築

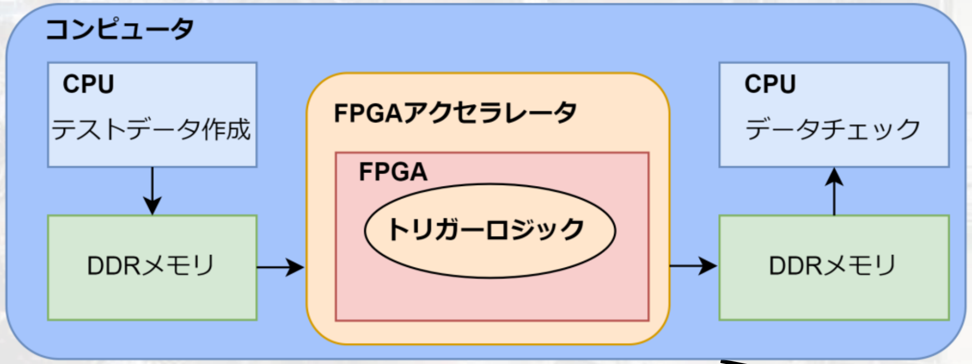
◦ <u>現行システムの問題点</u>
・ボードが高価で数が限られる
・マルチプラットフォーム

◦ <u>新システム</u>
・安価で入手しやすい
・PCで完結する

FPGAアクセラレータ



PC以外の設備を使用



PCのみ使用

・AXIインターフェースを使用してCPU↔FPGAの通信を行う
・<u>システムを工夫することでAXIインターフェースの制限を回避</u>
→大規模なファームウェアの検証も可能に

本研究：FPGAアクセラレータを用いて汎用性の高いファームウェア検証手法を開発

高輝度 LHC-ATLAS実験初段ミューオントリガー：シミュレーションデータを用いた性能の詳細な検証とさらなる性能向上可能性の検討

京都大M1 中川徹郎

特にATLASでない人に聞いてほしい！

ミューオントリガーロジックの説明にスペースを割いています

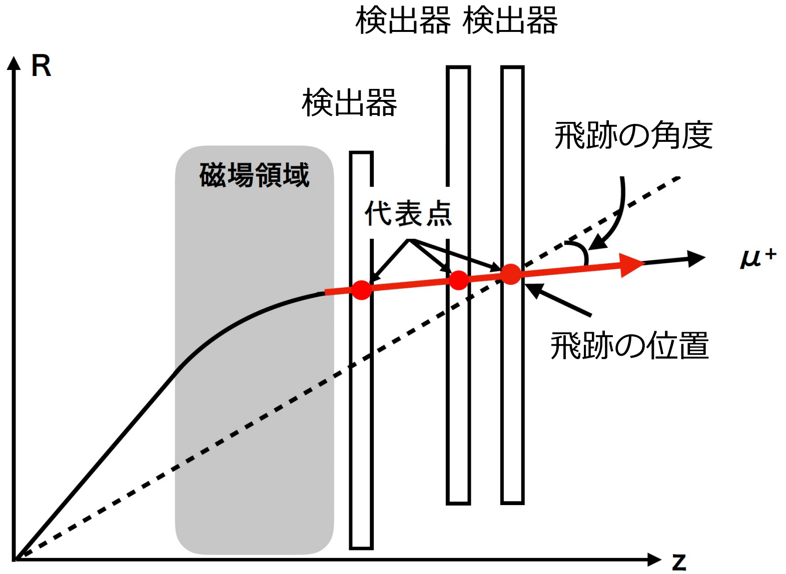
高輝度 LHC-ATLAS実験

	LHC	高輝度LHC
瞬間ルミノシティ [$cm^{-2}s^{-1}$]	2×10^{34}	$5\text{-}7.5\times10^{34}$
処理時間[μs]	2.5	10
Pile up[個]	50	140-200
トリガーレート [kHz]	100	1000

拡大する処理時間でレートを下げるトリガーロジックの導入

トリガーロジック

- 横運動量の閾値を超えたミューオンの取得が目的
- 検出器のヒット点の組み合わせからLook Up Table を用いて運動量を算出

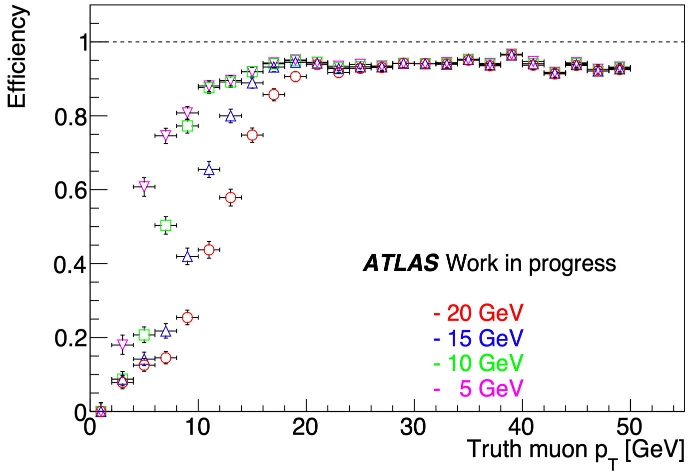


高輝度 LHC-ATLAS実験初段ミューオントリガー：シミュレーションデータを用いた性能の詳細な検証とさらなる性能向上可能性の検討

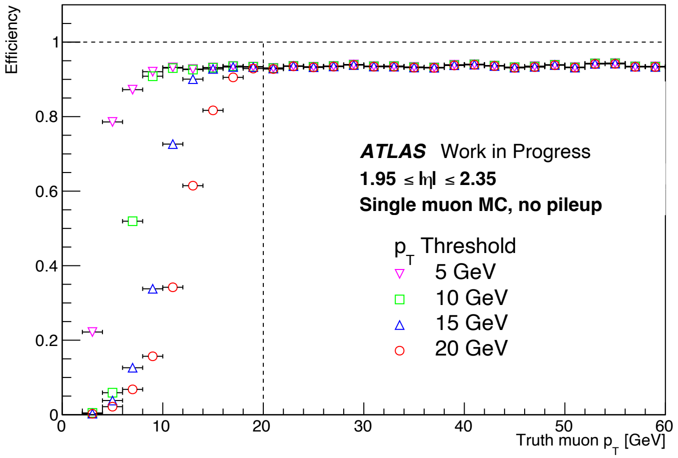
京都大M1 中川徹郎

シミュレーションによる検証

- 実機とソフトウェアの比較検証が行われている
- 図を比較することで論理回路を修正するための手がかりを得る



実機による
横運動量に対する検出効率

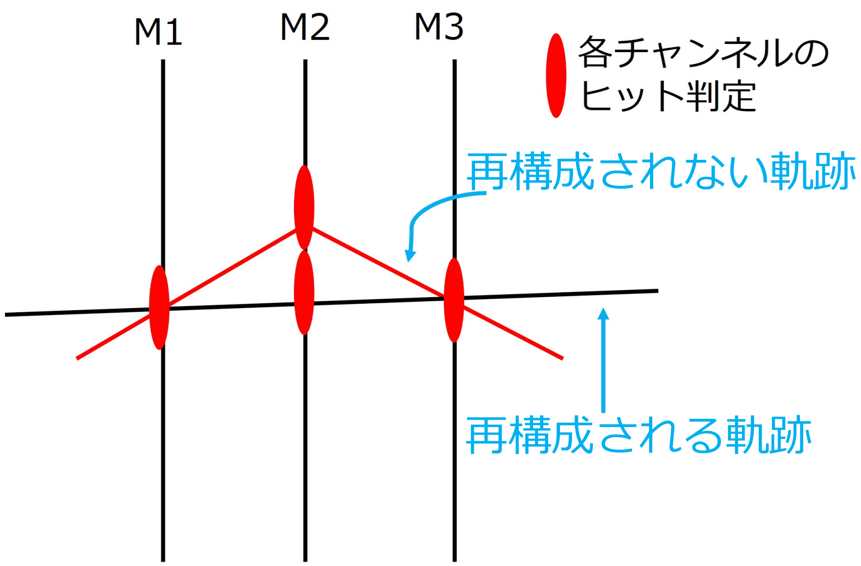


ソフトウェアシミュレータによる
横運動量に対する検出効率

検出効率の向上可能性

- トリガーロジックの非効率についての詳細な理解を進めている

例：散乱による非効率の改善可能性の検証

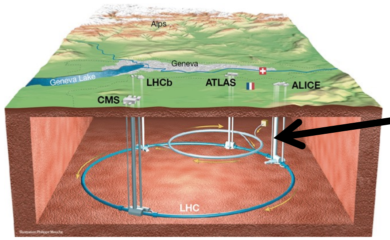


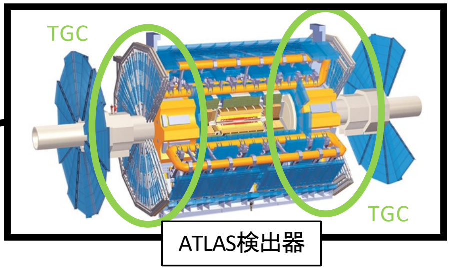
高輝度LHC-ATLAS実験に向けた初段ミューオントリガー回路に実装されるタイミングアライメントモジュールの量産のための品質試験

牧田藍瑠 (ICEPP, 東京大)
ICEPP シンポジウム 18–21 Feb. 2024

LHC-ATLAS実験

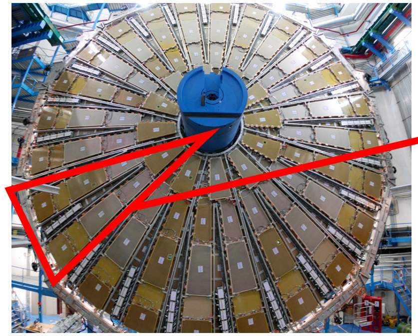
- $\sqrt{s}$=13.6 TeV, 40 MHzの陽子-陽子衝突でBSM探索やHiggs精密測定等の目的
- 初段ミューオントリガーのエンドキャップ部をTGCが担当





TGC (Thin Gap Chamber)

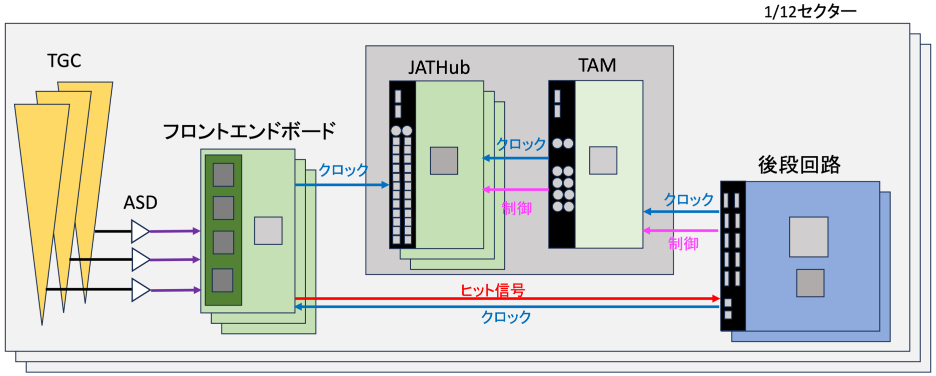
ヒットコインシデンスにより
エレクトロニクス上で
ミューオン運動量を概算



高輝度LHC

- 2029年から運転開始
- 陽子衝突レートの増加に対するTrigger DAQの仕様変更
  → TGCエレクトロニクスの刷新

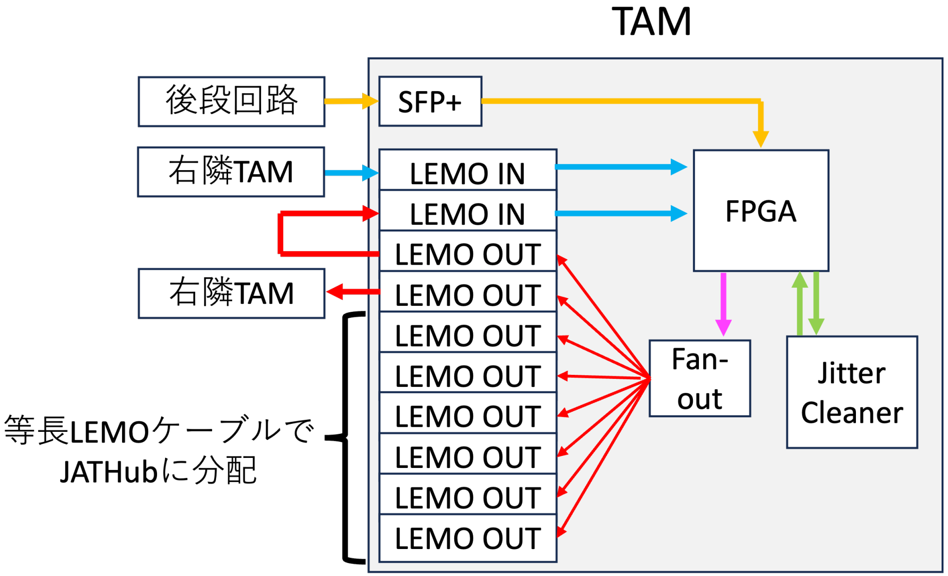
高輝度LHCにおけるTGCエレクトロニクス



牧田藍瑠 (ICEPP, 東京大)

TAMの機能・役割

- VMEマスターとして他のモジュールのコントロール
- 低スキューで同位相クロックの分配

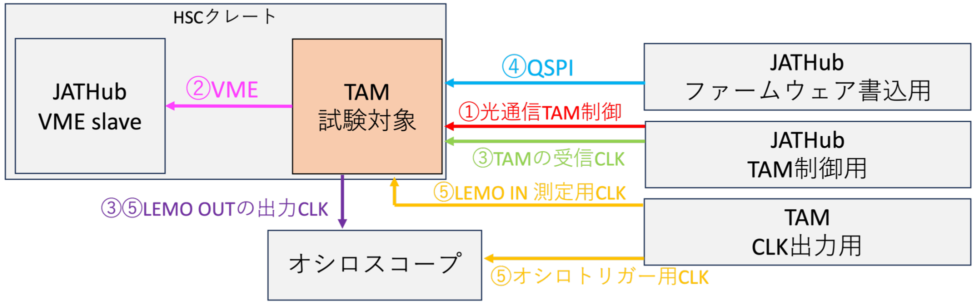


試験の目的

2024年度からの量産機30台のために

- 最終試作回路の機能検証
- 試験手順の効率化

試験の概要



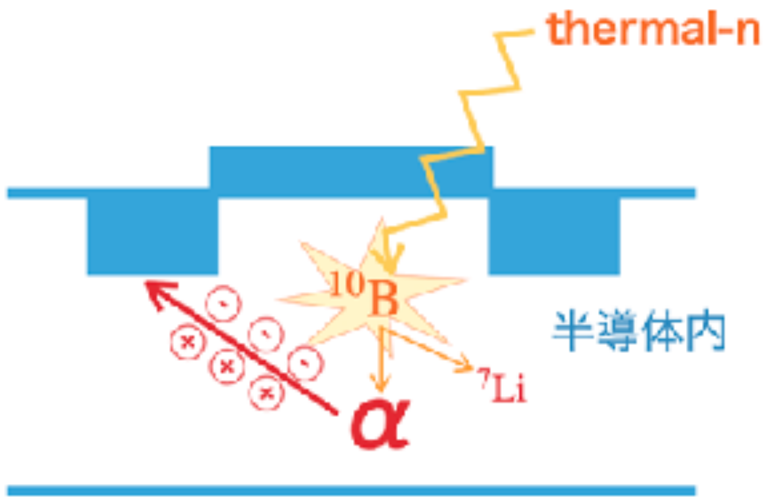
試験手順

- 最終試作回路の全ての機能が正常動作
- 開発した試験手順も正常動作

熱中性子によるFPGAのSingle Event Upset

大阪大学　山田千尋

Single Event Upset (SEU)とは？

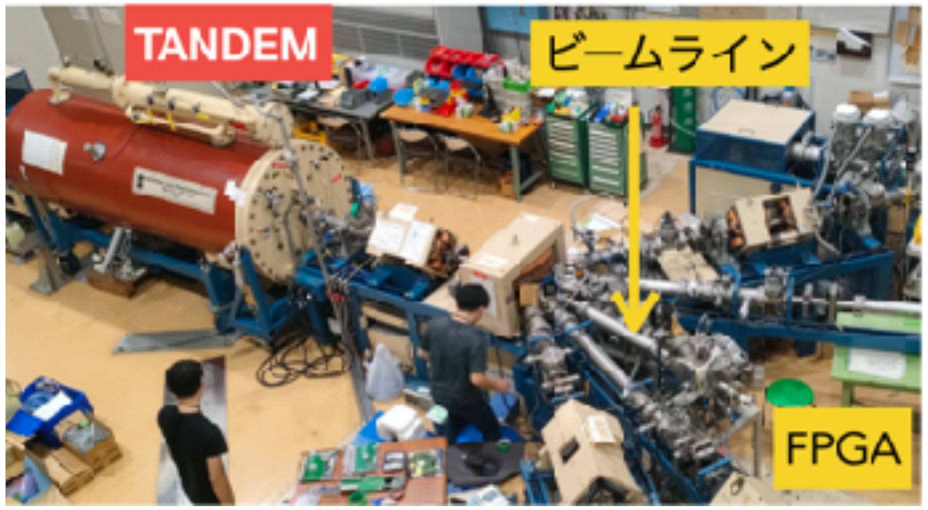


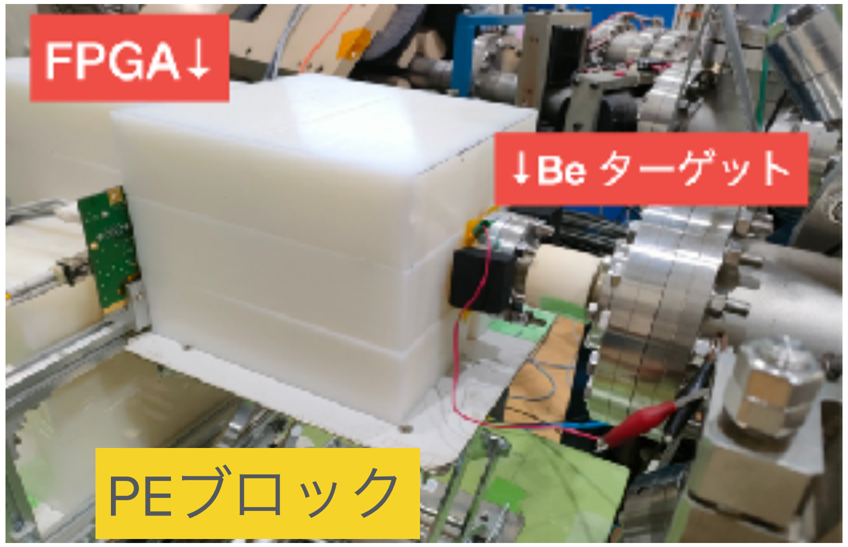
放射線がFPGAなどの半導体素子に入射して、
荷電粒子が生成されると**ビットが反転**する (=**SEU**)

大強度の粒子ビームを用いる高エネルギー実験では
二次粒子も多く生成されるので、放射線対策は重要
特に代表的なのは、高速中性子によるSEU

熱中性子はホウ素10の捕獲反応でα粒子を放出する
➙SEUの原因となる！？ ➙実際に実験で使うFPGAで調査

神戸大学TANDEM加速器を用いた中性子試験



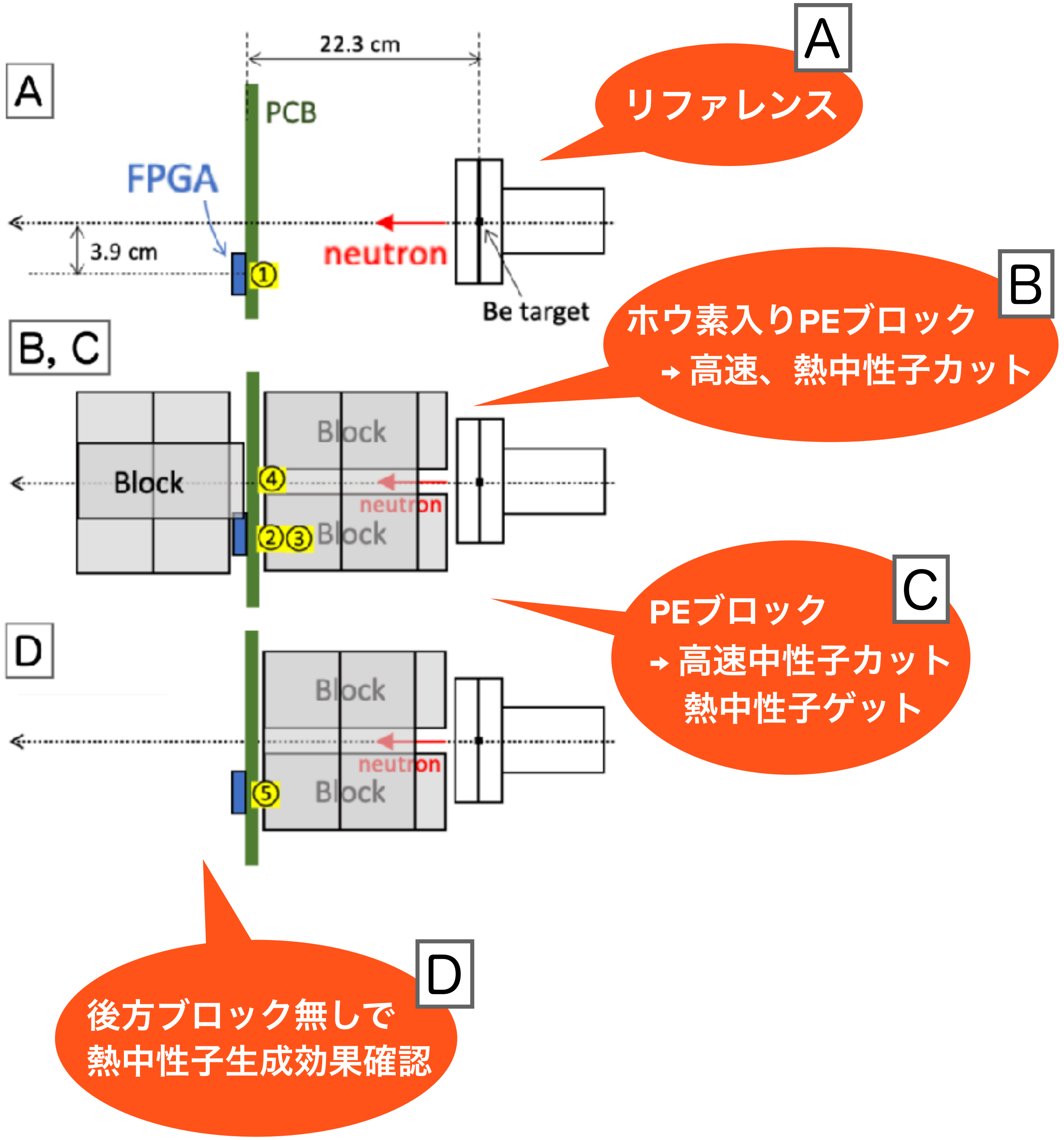


CR39(ルミネスバッチ)を用いて
高速中性子と熱中性子の量を測定

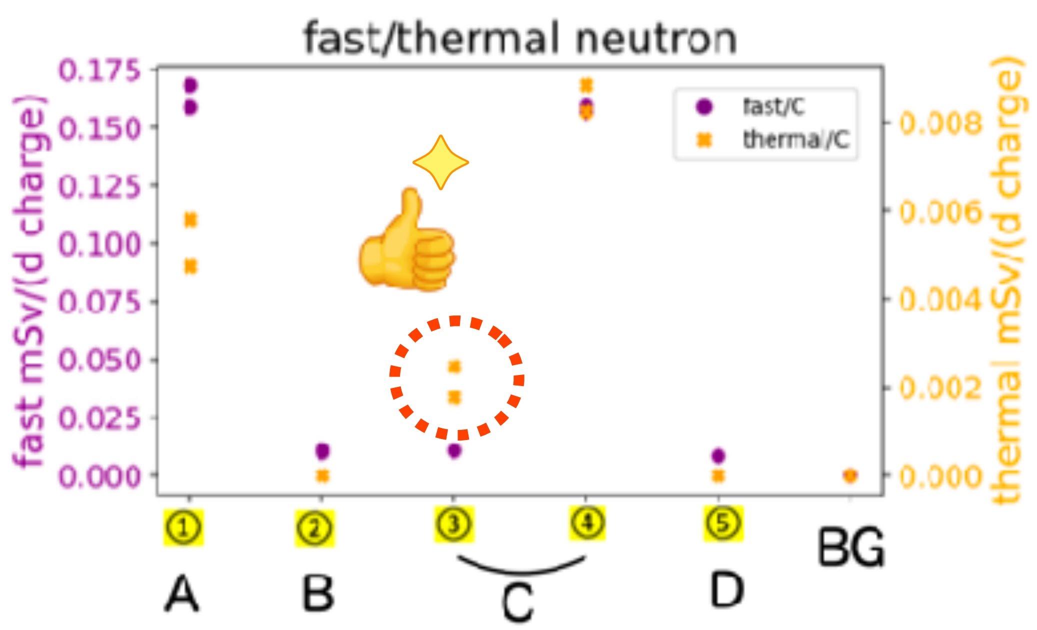
熱中性子によるFPGAのSingle Event Upset

大阪大学　山田千尋

セットアップ　（○はCR39の測定位置）

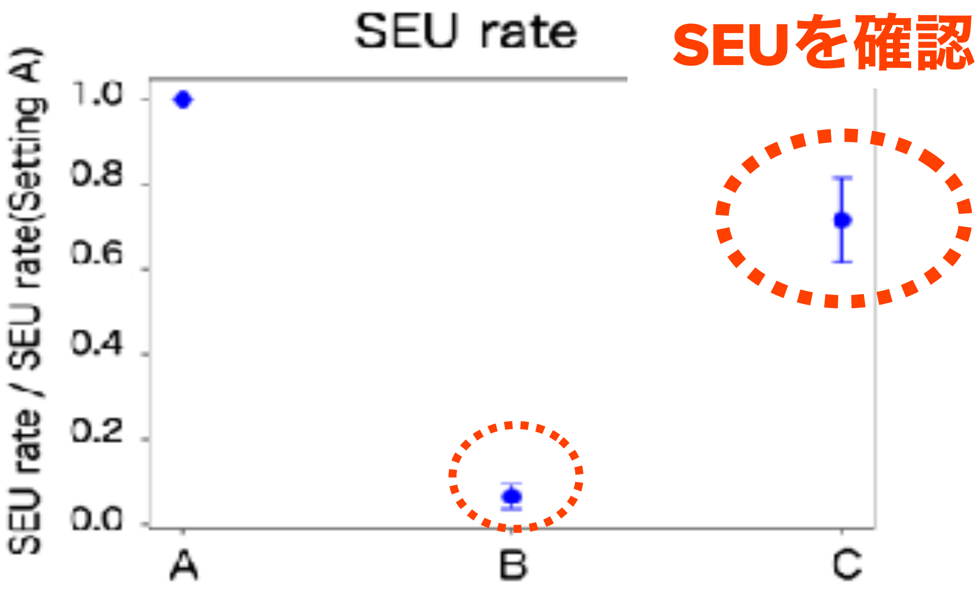


CR39の結果



SEUの結果

熱中性子による
SEUを確認！



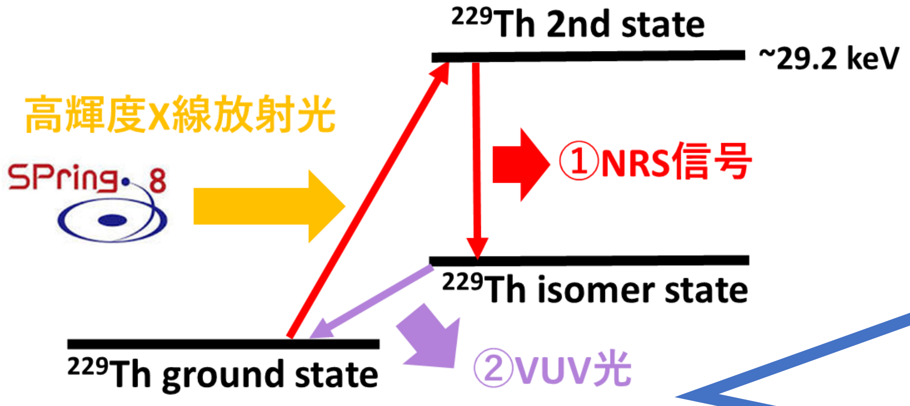
高輝度放射光を用いたTh-229アイソマーの脱励起光観測

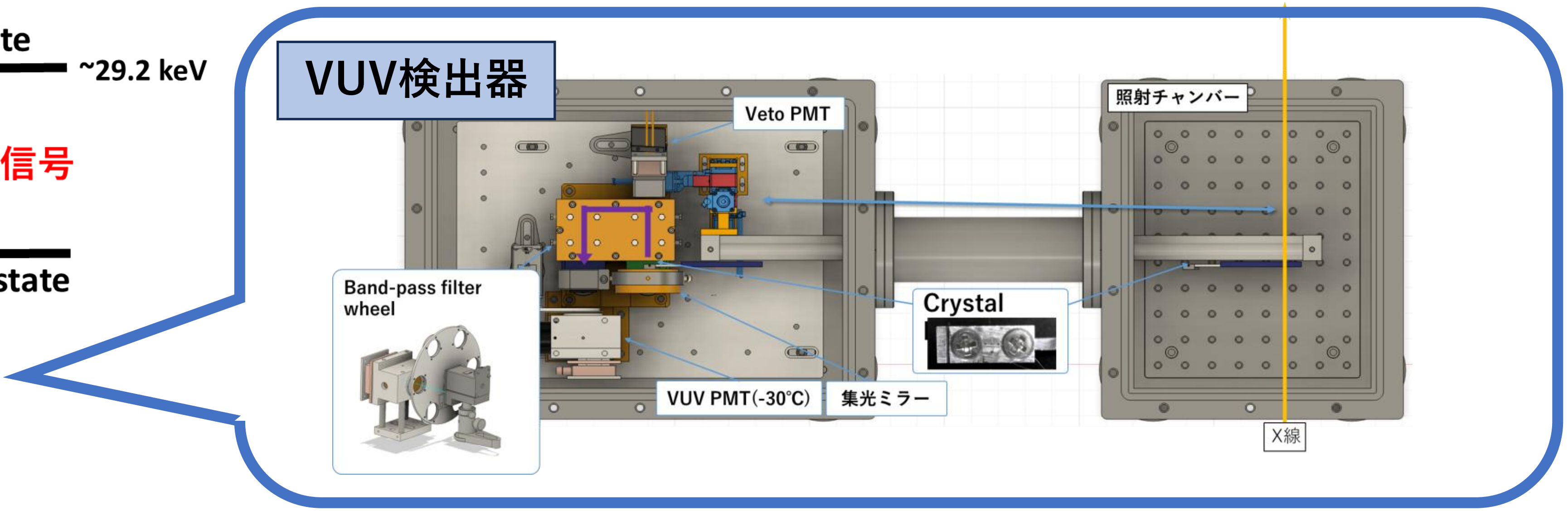
岡山大学　異分野基礎科学研究所　量子宇宙研究コア　M1　大懸遼一郎

背景
Th-229の第一励起状態（アイソマー状態）を応用した原子核時計は原子時計よりも高い精度が実現可能だとされ、標準モデルを超えた物理学の探索への利用が期待されている。

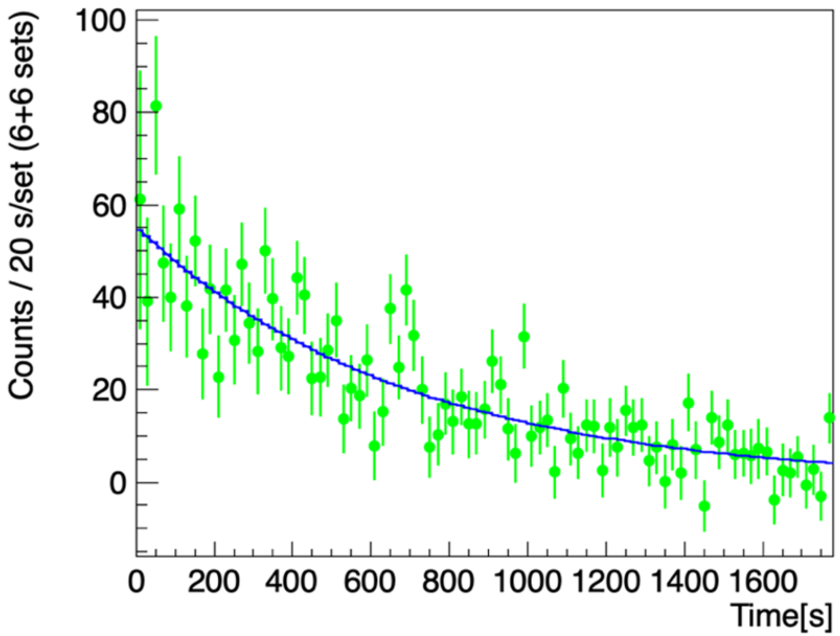
内容
Th-229 の第一励起状態（アイソマー状態）のエネルギー準位と寿命の値を得るためにアイソマーの脱励起光を観測した。

手法
- 高輝度X線放射光により第二励起準位を経由してアイソマー準位を生成
- アイソマーからの脱励起光（VUV光）を観測





結果：結晶環境中においてVUV光の放出を伴うアイソマー脱励起の観測に成功



^{229}Thアイソマーの寿命: 447±36 s

他に

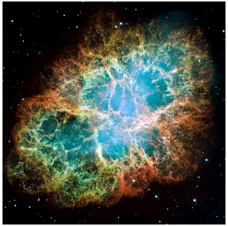
- ^{229}Thアイソマーの波長を決定
  →新たなる実験段階へ
- X線照射中のアイソマーの寿命を測定
  →別の脱励起メカニズムの存在を示唆

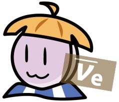
ポイント

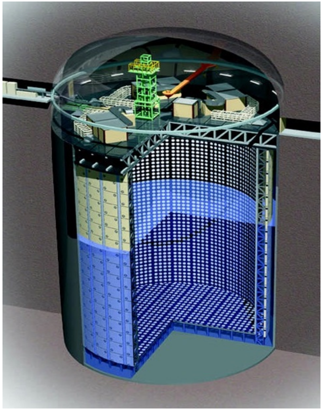
- 結晶と高輝度X線放射光を用いたユニークな実験
- VUV光を観測するための工夫
- 観測したVUV光の波長を決定する手法

ニュートリノ原子核反応予測の精度向上に向けた酸素ビーム実験の検出器シミュレーション

東京大学 横山-中島研究室 M1 水野裕介





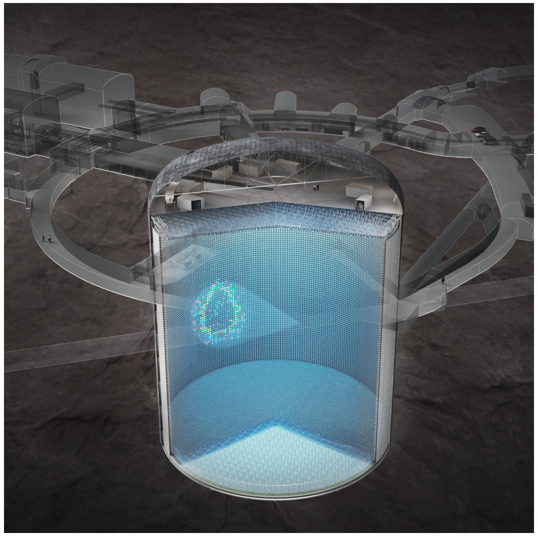


超新星背景ニュートリノ (DSNB)……超新星爆発の機構や、星形成の歴史を理解する手がかり。未発見

原子核反応を理解したい
→ 理化学研究所 RIBF にて酸素ビームを用いた原子核実験を計画中

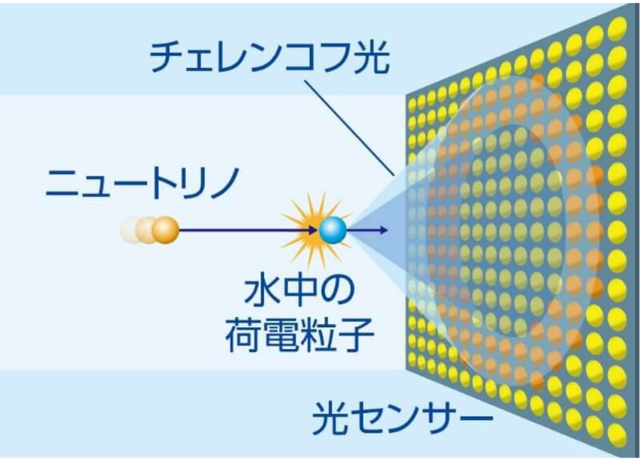
研究背景

ハイパーカミオカンデ



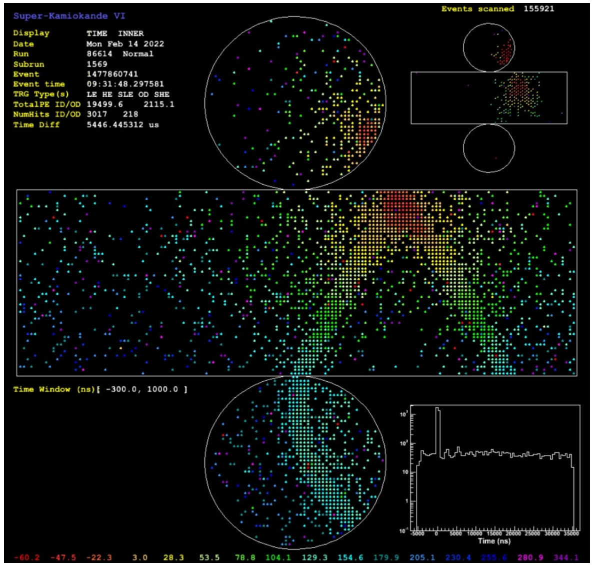
スーパーカミオカンデの
8.4倍の検出有効体積
陽子崩壊の探索
ニュートリノ研究

チェレンコフ光



水中で発生した
チェレンコフ光を
壁面に全部で2万本ある
光電子増倍管で検出

事象再構成



光電子増倍管の
"検出情報"から**事象再構成**

⇨高精度な事象再構成には正確な検出時間・光量が必要

ハイパーカミオカンデ 50 cm径光電子増倍管 性能の入射位置依存性調査
慶應大学 西村研究室 修士1年 堀内昇悟

対象

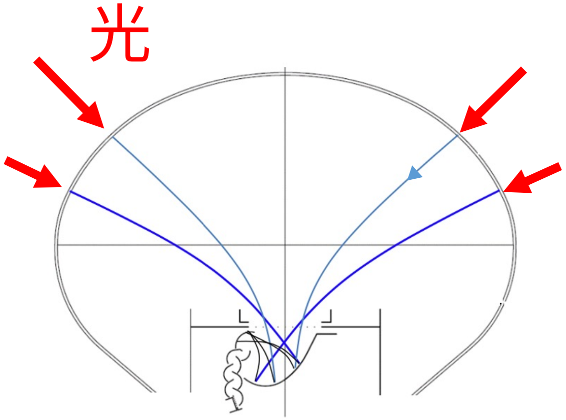
ハイパーカミオカンデ
50 cm 径光電子増倍管

提供：浜松ホトニクス株式会社

スーパーカミオカンデ比
約 **2** 倍の性能
・検出効率
・時間分解能
・電荷分解能

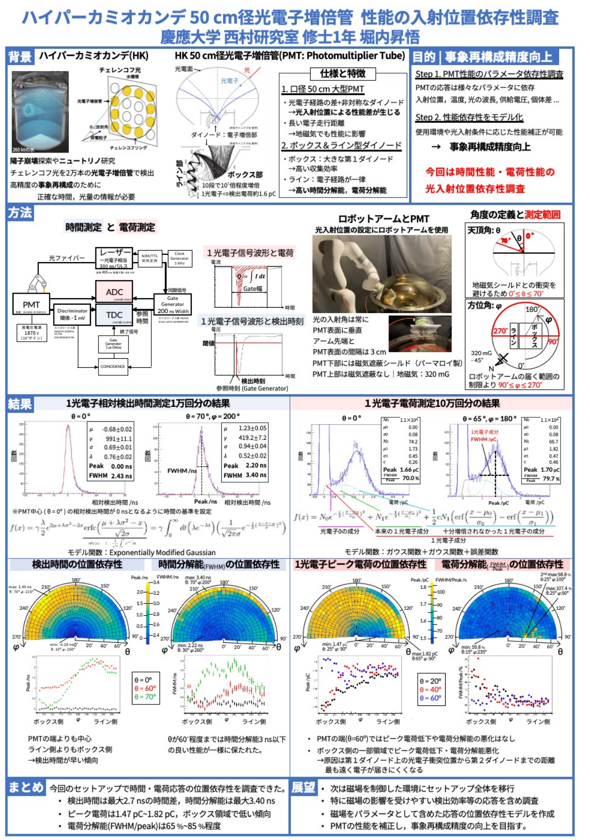
目的

性能の入射位置依存性調査



光入射位置を変えて性能を測定
その結果を用いて
事象再構成の高精度化へ！

結果

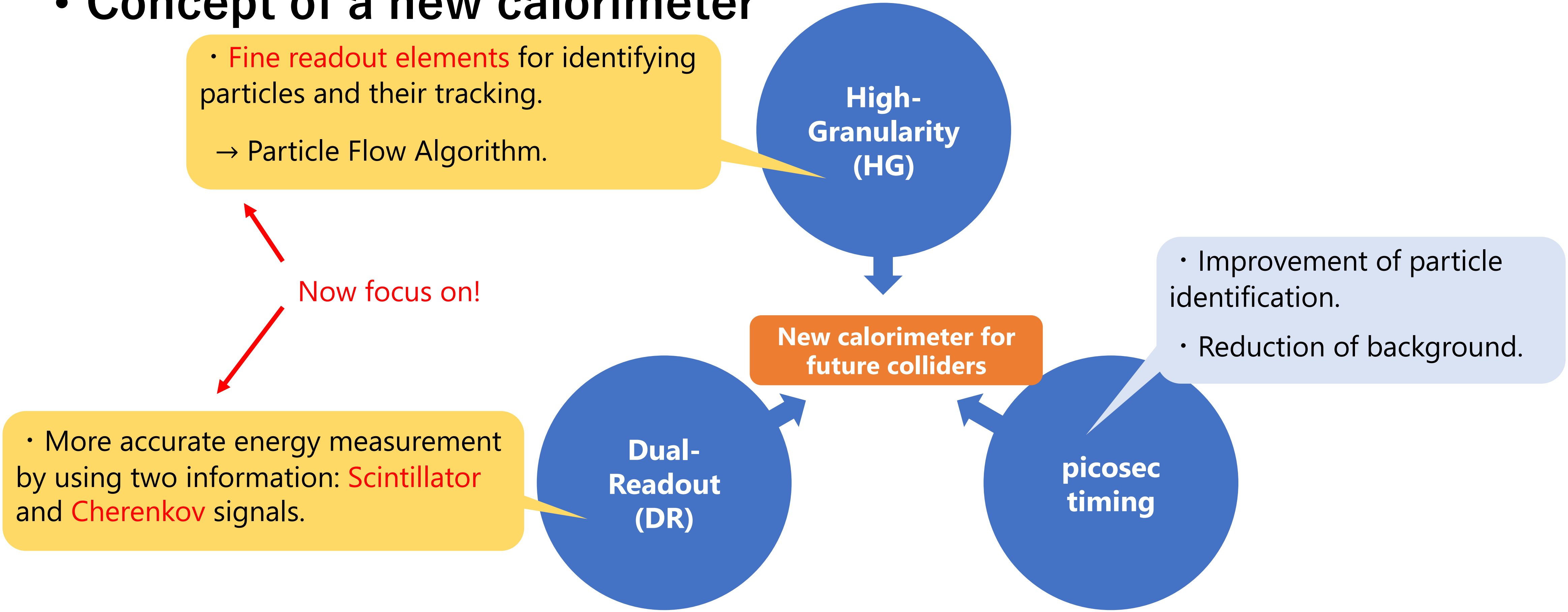


ポスター発表で！

Development of High-Granularity, Dual-Readout and picosec-timing Calorimetry
- Performance evaluation by simulation -

Taiki Kamiyama
The University of Tokyo

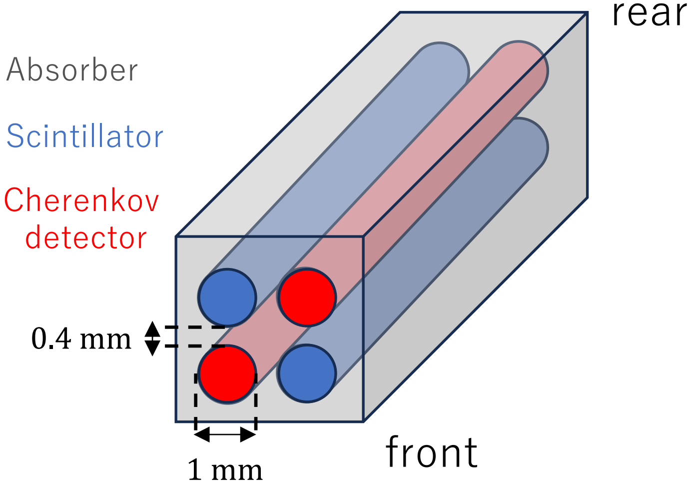
- **Concept of a new calorimeter**



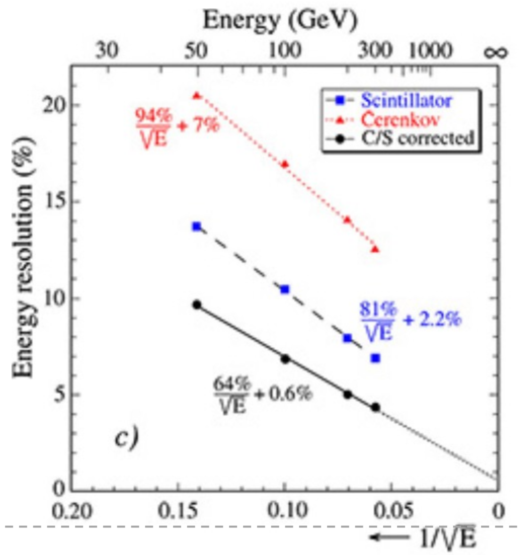
• DR + HG setup

・Previous study of DR
(Fiber-based calorimeter)

RD52 calorimeter



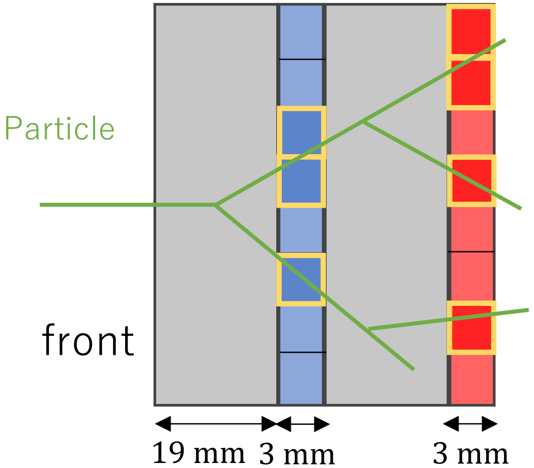
Resolution



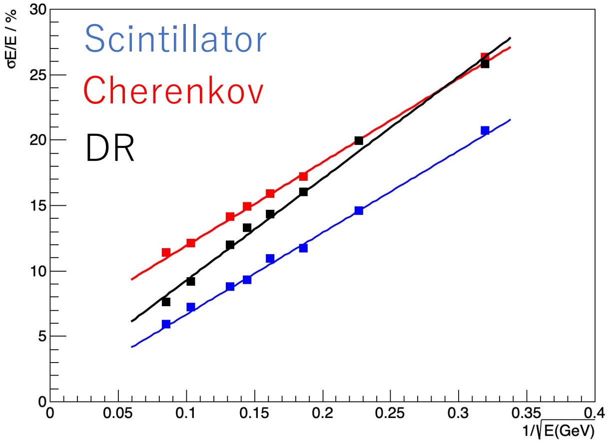
Limited longitudinal segmentation

・This study
(Tile-based segmented HG + DR)

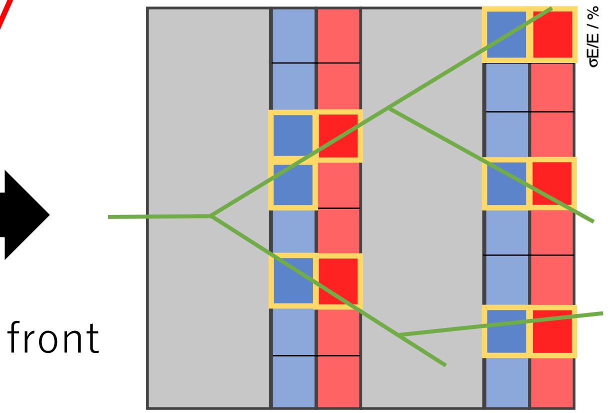
Absorber Scintillator Cherenkov detector



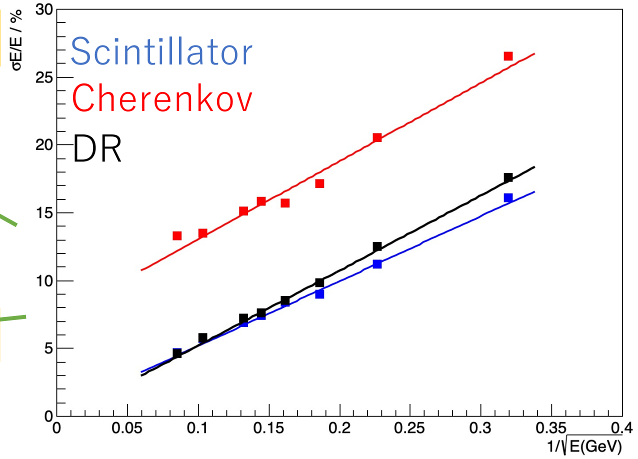
Resolution



"Homogeneous" reading for strong correlation of each signal as previous studies



Resolution

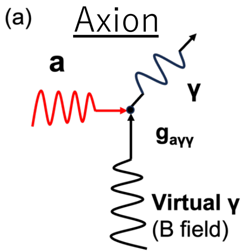


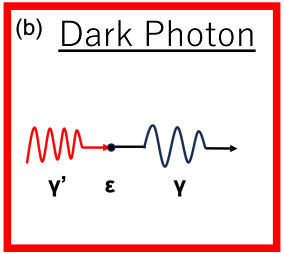
SQUID型超伝導量子ビットによる周波数変調を用いたダークマターハロスコープ実験

東京大学 澤田研究室M1 中園寛

アクシオン、ダークフォトン

・meVやμeV範囲でDMの有力候補
(by cosmological observation)
・電磁相互作用によって光子を放出

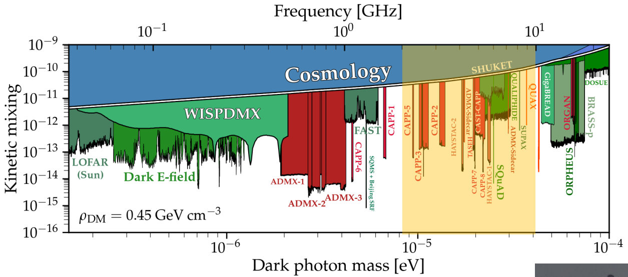


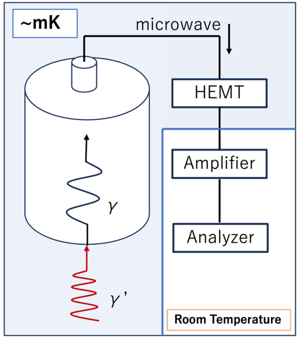


Strong B field needed!

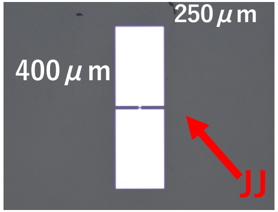
ダークマターハロスコープ実験

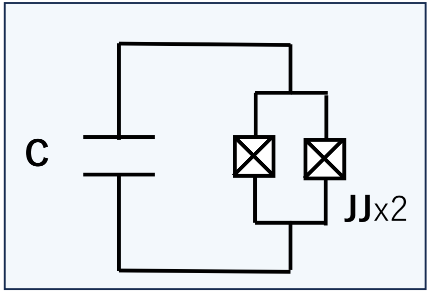
・Cavityで光子を貯めて検出
・DM mass↔Cavityの共振周波数
・周波数変調機構→**mass scan**に必須



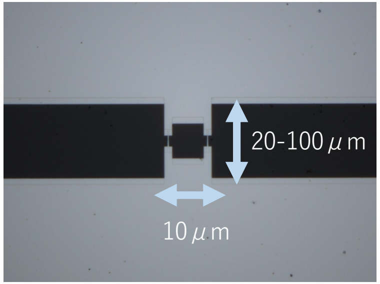


→ 超伝導量子ビットによる変調手法を導入





回路模式図



光学顕微鏡(150倍)

コイルにより**磁場を印加**
→Qubitの共振周波数を変更
→**detuning Δ が変化**
→**Cavityの共振周波数が変調**

周波数変調
(Cavity + atom or qubit,TLS)
Jaynes–Cummings model

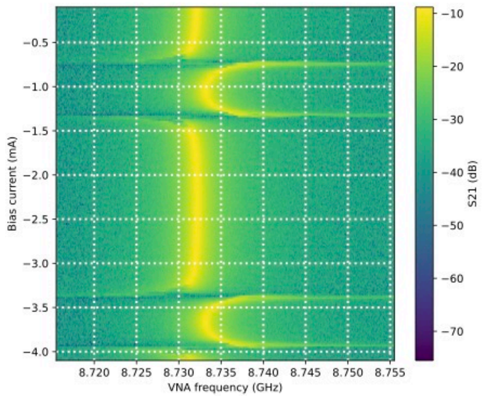
$$H = \frac{\hbar}{2}(\omega_q + \frac{g^2}{\Delta})\sigma_z + \hbar[\omega_c + \underline{\frac{g^2}{\Delta}\sigma_z}]a^\dagger a$$

Cavity's frequency shift

$$|\Delta| = |\omega_q - \omega_c|$$

Result

X-axis:Frequency,Y-axis:Current,Z-axis: transmission wave



Frequency shift observed !