

宇宙史研究センター運営協議会
2018年2月8日@B110(総合B)

光量子計測器開発部門の 活動報告

光量子計測器開発部門
原 和彦

Division for Development of Photon
and Particle Detectors

光量子計測器開発部門

光量子計測器開発部門

宇宙史研究センター

融合研究企画調整室

各研究部門

光量子計測器開発部門

センター共有の光量子計測機器開発基盤+つくば地区連携大学拠点

筑波大およびつくば研究機関における理工学分野の密接な連携により、計測器開発に関する情報共有、計測器開発の融合共同研究、新しい計測器のアイデアの創出、計測器技術の産業社会応用を推進する。

構成教員: 原和彦(部門長)、江角晋一、武内勇司、金信弘

連携教員: 西堀栄治、富田成夫、近藤剛弘

超伝導検出器の開発、SOIピクセル検出器の開発、
新型半導体検出器の開発

STJ

SOI

LGAD

ATLAS pixel/strip

STAR MRPC

ALICE Si-W

連携

- TIA-ACCELERATEの筑波大学における活動拠点
- つくば地区他機関との連携

エネルギー物質科学研究
センター各部門

TIA-ACCELERATE
光量子産業応用イニシアティブ

KEK測定器開発室
産総研 CRAVITY・3D集積システム

Spring-8 Sync. Rad.

Heterodyne STM

STJ mass-spectrom.

Other activities

•2017/12/11-15 **HSTD11+SOIPIX2017 International Symposiumでの講演**

11th International Hiroshima Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HST11)と2nd International Workshop on SOI Pixel Detectors (SOIPIX2017)の合同会議が沖縄技術工科大学で開催され、本部門の原准教授が"Radiation Hardness of SOI Pixel Devices"、修士1年の和田さんが"Evaluation of Characteristics of Hamamatsu Low Gain Avalance Detector (LGAD)"で講演を行いました。世界各国から最前線で検出器開発を行っている187名が参加者しました。[会議のページ](#)

•2017/10/10 **研究会「SOI量子イメージ検出器の新展開に向けて」@東京大学のお知らせ**

2013年度より行ってきた新学術領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」(SOI領域研究)も最終年度を迎えています。SOI領域研究は理学と工学の研究者が一体となり、主に加速器実験に向けた新たな量子イメージング検出器を創り出す事を出発点としてスタートしました。当初目標は十分に達成できたと自負していますが、この研究の過程で生命、物質、宇宙等の基礎サイエンスから社会応用まで、様々な分野においてこうした検出器技術が求められていることを知りました。これまでの成果を元に、3次元量子イメージング技術から、今後どのようなサイエンス・応用を開く事が出来るのか議論を行いたく、この研究会を企画しました。[おしらせのページ](#)

2017/10/1 **宇宙史研究センター(朝永センター)の発足**

ニュース

・2018/3/26-27 **宇宙史国際シンポジウム開催のお知らせ**

宇宙史研究センターの国際融合研究ハブとしての活動の一環として、宇宙史国際シンポジウムを、センター発足記念式典と兼ねて、2018年3月26日、27日に筑波大学で開催します。【日時】March 26 - 27 (Mon - Tue), 2018【場所】3月26日: 筑波大学 大学会館 国際会議室、3月27日: 総合研究棟B棟1階【ホームページ】[link](#)【プログラム】Day 1: Plenary session International Conference Room, University Hall Talks by invited speakers, division heads. Day 2: Parallel sessions Rooms 0107, 0108, 0110, 0112-1, Laboratory of Advanced Research B (総合研究棟 B) [Plenary Session \(13:00-15:00\)](#)

・2018/2/7 **TIA 光・量子計測シンポジウム開催のお知らせ**

第3回TIA光・量子計測シンポジウム 光・量子が繋ぐTIA計測連携～新しい科学と産業の創生をめざして～が2018年2月7日につくば国際会議場で開催されます。3名の招待講演者 三尾典克東大教授「重力波天文学の幕開け」、寺西信一静大特任教授「イメージセンサが切り開く世界」、末永和知産総研主席研究員「電子顕微鏡と電子線分光を用いた最先端計測技術」に加え多くのポスター発表が予定されています。[会議のページ\(更新予定\)](#)
[Poster](#)

・2018/1/29 **3次元積層半導体量子イメージセンサ研究会開催のお知らせ**

第2回「3次元積層半導体量子イメージセンサ研究会」がTIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」: '3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究' グループ (高エネ研、産総研、東京大学VDEC、筑波大)主催で、2018年1月29日(月) 13:30-17:15につくば国際会議場中会議室202室で開催されます。

開催趣旨:

今後の科学・医療・産業分野における光・X線・荷電粒子等の量子イメージセンサでは、異種材料・複数素子による高感度化、微細画素大規模集積、高速画像取得、ダイナミックレンジ拡大などが求められている。これらの解決手段としては、縦方向に異種・複数材料の半導体素子を3次元集積する技術が有望である。本研究会では、TIA「かけはし」事業に採択された“3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究”活動の一環として、最新の3次元積層技術、量子イメージングセンサー技術を持ち寄り今後の研究開発方向に関する議論を行う。[会議のページ](#)

TIA – Tsukuba Innovation Arena



共通基盤プラットフォーム

光・量子計測

システム化プラットフォーム



ナノエレクトロニクス



パワーエレクトロニクス



MEMS

先進材料プラットフォーム



ナノグリーン



カーボンナノチューブ

共通基盤プラットフォーム



光・量子計測



人材育成



共用施設ネットワーク

宇宙の起源、物質や生命の根源を解明するための先駆的学術研究が、大型加速器をはじめとする最先端の高度な光量子計測技術を用い、世界をリードして進められています。「光・量子計測」では、TIA中核5機関の高度な光量子計測技術の力を結集する3つのオープンな連携の場「スクエア」を設け、新しい科学と産業の創成を目指します。そして本活動をTIA-ACCELERATEとして推進しています。

光・量子発生および計測技術の革新とその利用研究の高度化

3つのスクエアは、それぞれ、高性能な光量子発生技術開発、高感度・高精度・高分解能な光量子検出器開発と先端的計測技術法開発、および新たに開発された光量子計測技術を用いて行う物質機能発現メカニズム解明研究と新機能材料の基礎開発を目的としています。

光・量子計測 (TIA-ACCELERATE)

光量子発生技術 スクエア

(主なテーマ)

- SiC半導体を用いた高性能加速器電源開発
- 超小型加速器開発

光量子センシング スクエア

(主なテーマ)

- SOI技術
- 超伝導検出器
- 大型構造イメージング

光量子ナノ材料 スクエア

(主なテーマ)

- 構造材料
- 環境・エネルギー
- エレクトロニクス材料
- 基礎物性

- 第2回TIA光・量子計測シンポジウム 2016/11/10@エポカルつくば



TIAかけはし： TIA連携プログラム探索推進事業

- TIA5機関(産総研、物材機構、筑波大、KEK、東大)は、平成28年度新規共同事業として
 - 「TIA連携プログラム探索推進事業」を開始
 - 本事業は、TIA5機関の連携基盤を強化しつつ、新規領域の開拓や大型研究資金獲得のための戦略の立案と体制の構築等を行い、「知の創造と産業界への橋渡し」を目指す。
- TIA連携プログラムとは：TIA5機関の連携に寄る共同研究・共同事業に関する調査研究
光・量子計測センシングスクエアの筑波大参加の採択テーマ

テーマ	代表者	代表者機関	参加機関
簡単・便利な超伝導計測—100倍精度の計測を非専門家の手で(H28・H29)	田島 治	KEK	AIST、NIMS、筑波大(武内)、東大
3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究(H28・H29)	新井 康夫	KEK	AIST、筑波大(原)、東大

TIA連携プログラム探索推進事業「かけはし」:

'3次元積層半導体量子イメージセンサの調査研究'の目的

- 光・X線・ガンマ線・電子線・アルファ線等のイメージングでは、様々な異種材料を持ちいることで高感度化をはかることができる。
- 同時にこれらの検出器では、微細画素・大規模集積回路・高速画像取得・広ダイナミックレンジ等も求められている。
- これらを解決する手段としては、縦方向に異種材料の半導体素子を3次元集積する技術が有望である。
- KEK及び筑波大学の量子センサ技術、産総研の3次元積層技術、そして東京大学の集積回路設計技術を融合させることで、革新的高機能・高感度量子イメージセンサの実現を目指し調査研究を行う。

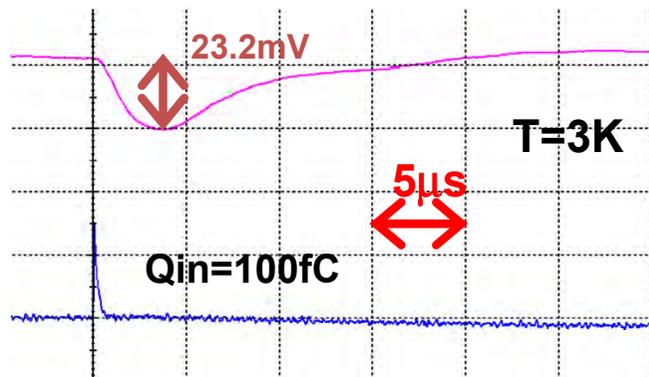


遠赤外一光子検出のための超伝導体検出器の開発(2018)

STJ武内・金

Nb/Al-STJ のSOI極低温増幅回路読出

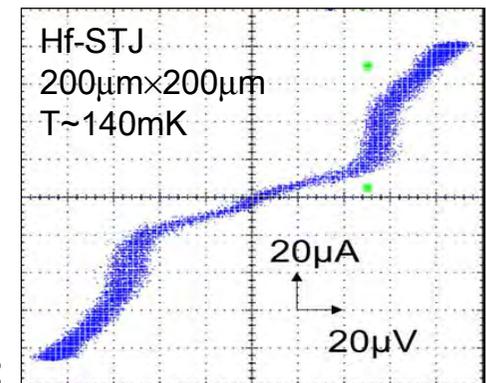
- 2017年度の主な成果: SOI OpAmpの設計・開発. 電荷積分増幅の3ケルビンでの動作を確認. 入力電荷100fC に対し 23mVの出力を得た.



- 2018年度の計画:
 - 電荷積分型SOI増幅器を実際にSTJの光応答信号読出しに用い, Nb/Al-STJ 近赤外一光子検出
 - バイアスラインノイズの低減, および電荷感度増加を目指す次期SOI増幅回路設計

ハフニウムを用いたSTJ光検出器の開発

- 2017年度の主な成果: 表面粗さの小さい条件(RMS=2.5nm)を用いたHf-STJを作製. リーク電流7μA(200μm角, T=140mK)を達成. 我々のグループで今まで達成していたHf-STJリーク電流密度の約1/16にあたる.



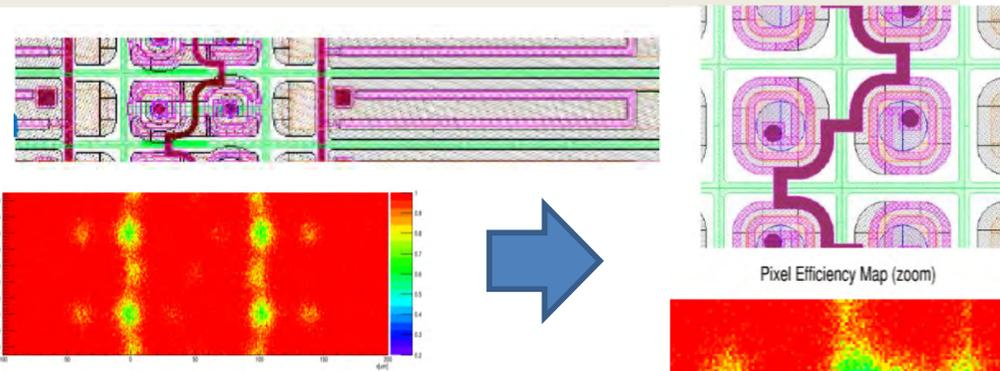
- 2018年度の計画:
 - より低温での測定による熱起因リーク電流の抑制
 - より小さい接合面積の素子を作製しリーク電流を抑制
 - 光応答のより詳細な基礎データ収集

HL-LHC用(2026~)検出器開発

PIXEL



Pixel size: 50x250um FE-I4 → 50x50 um FE65



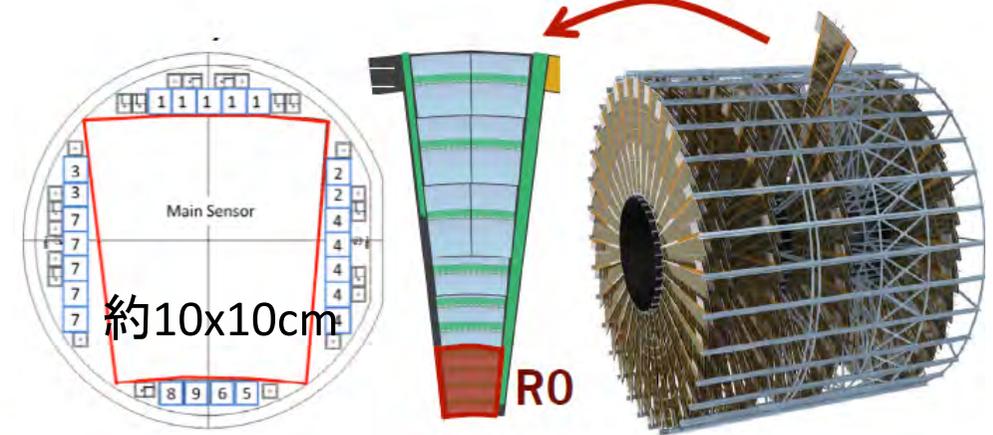
テストビームでの詳細評価:
照射損傷による収集電荷量の劣化を抑える構造に成功

ATLAS pixelのbaseline設計
(全5層の内、外側3層分)

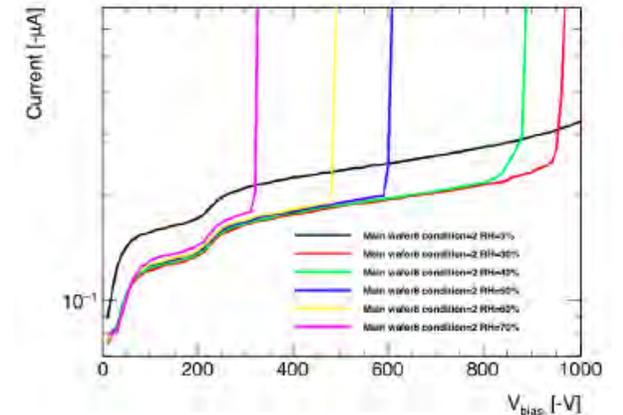
9 モジュール製造をATLAS-Jが分担する

STRIP

量産用strip sensorの評価開始



大面積センサーの不安定性
(湿度依存性 保護被膜改良の検討中)



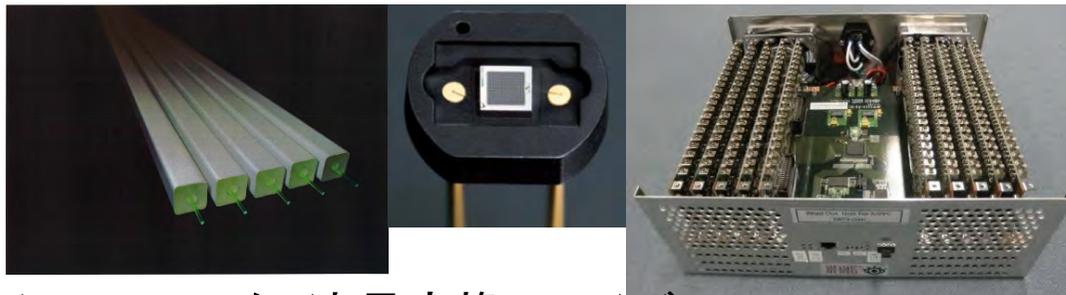
筑波大: センサー設計、放射線耐性試験等に深く貢献
センサー試験分担(~1/4)の打診

宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子力発電所 1-3号炉の核燃料デブリの観測

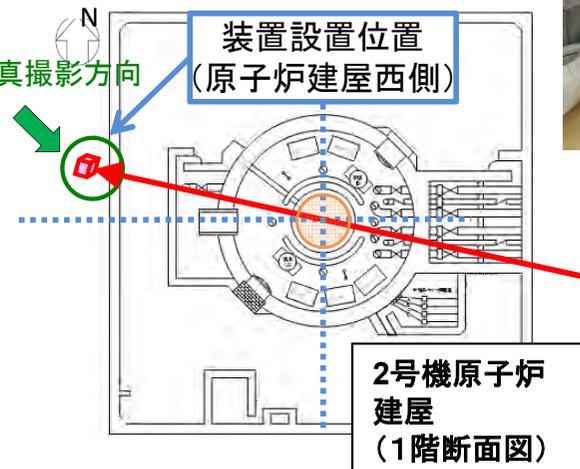
1 KEK 2 筑波大学 3 首都大学
国際廃炉研究開発機構
東京電力ホールディングス株式会社

1 藤井啓文、2 原和彦、1 林浩平、3 角野秀一、
1 児玉英世、1 佐藤康太郎、1 高崎史彦

燃料デブリの状況を宇宙線ミュー粒子で把握する観測を2015.2-2017.9に実施

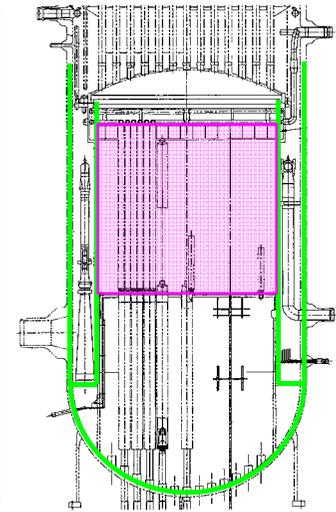
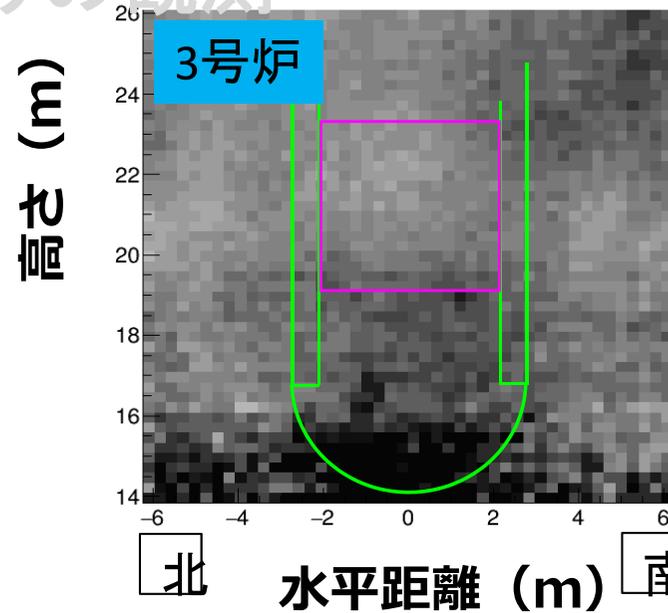
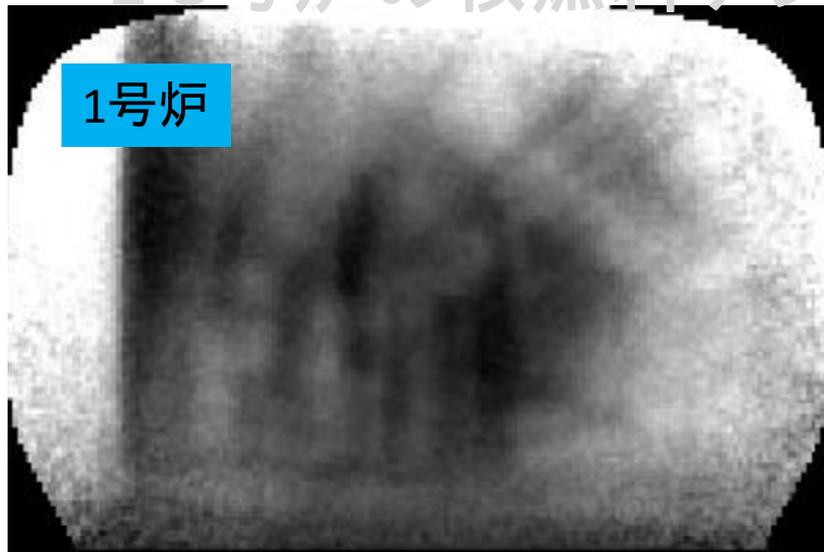


シンチレータ+波長変換ファイバー+MPPC+DAQ
(1cm幅)



ミュー粒子計数分布から炉心部の
質量分布を求める
Muon Radiography

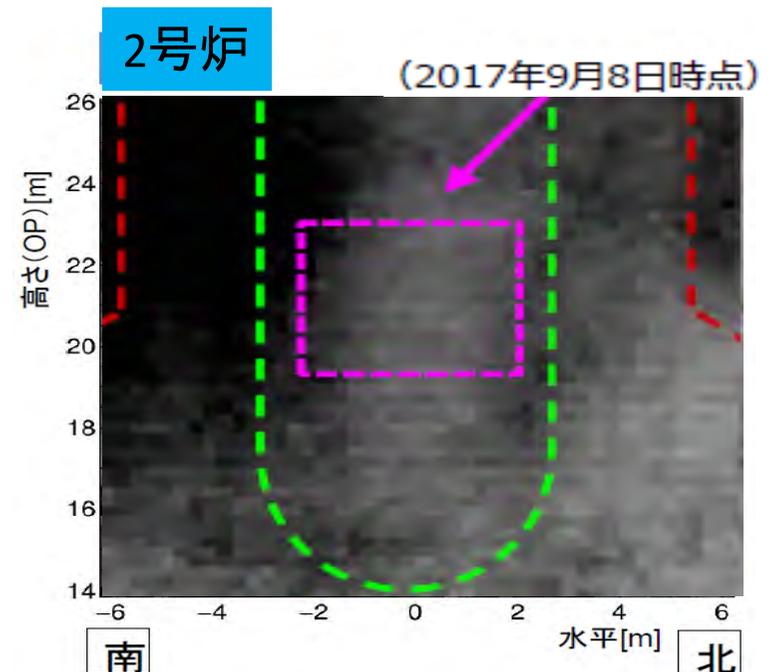
宇宙線ミュー粒子を用いた福島第一原子力発電所 1-3号炉の核燃料デブリの観測



圧力容器下部の構造

まとめ 福島第一原子力発電所の原子炉内燃料の状況を探るために、東日本大震災の直後から宇宙線ミュー粒子を用いたラジオグラフィを用いる方法を開発し福島第一原子力発電所原子炉内の燃料デブリ観測を実施した。

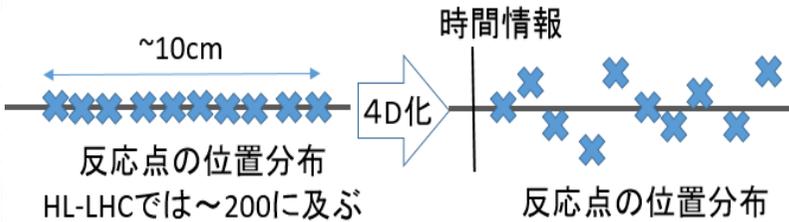
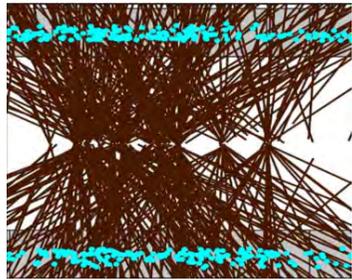
- ◆ 1号炉は燃料装填位置にはほとんど燃料デブリが残っていない。
- ◆ 2号炉では燃料デブリの大部分は圧力容器の底にあると推定できる。
- ◆ 3号炉は燃料装填位置にはほとんど燃料デブリが残っていない。



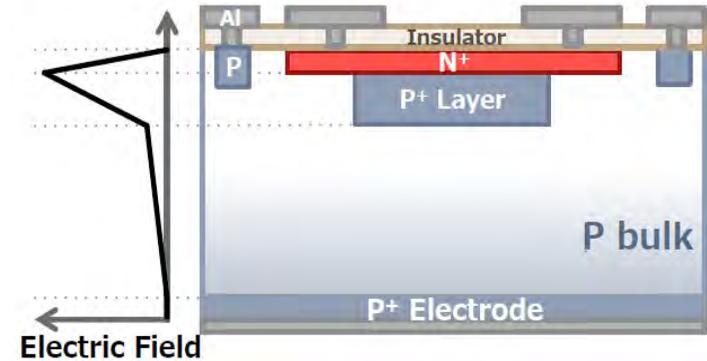
4次元飛跡検出器のための 内部増幅機能付きシリコン半導体LGADの開発研究

筑波大学 和田冨、大鳴匡至、原和彦 KEK-INPS 海野義信、中村浩二

LHC-ATLAS実験



LGAD (low-gain avalanche detector)



ATLASでの17衝突事象

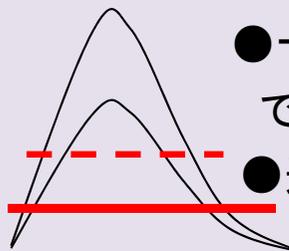
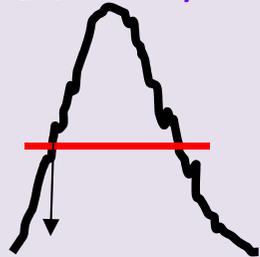
優れた位置分解能だけでは識別が困難になる

LGAD:増幅層で速い立上りで十分大きな信号.
Low Gain($G \sim 10$)で優れたS/N.
高時間分解能(10ps 3mm)をもった高位置
分解能半導体検出器<4D Tracker>

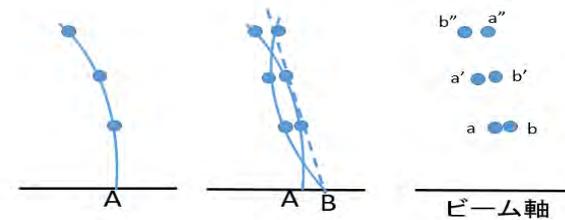
高時間分解能(~ 10 ps)検出器実現には

優れたS/N

小TimeWalk



- 十分な信号量で閾値を下げる
- 速い信号立上り



飛跡再構成 = 時刻をつなぐ =
再構成手法の革新

中性子飛跡検出器のための 内部増幅機能付きシリコン半導体LGADの開発研究

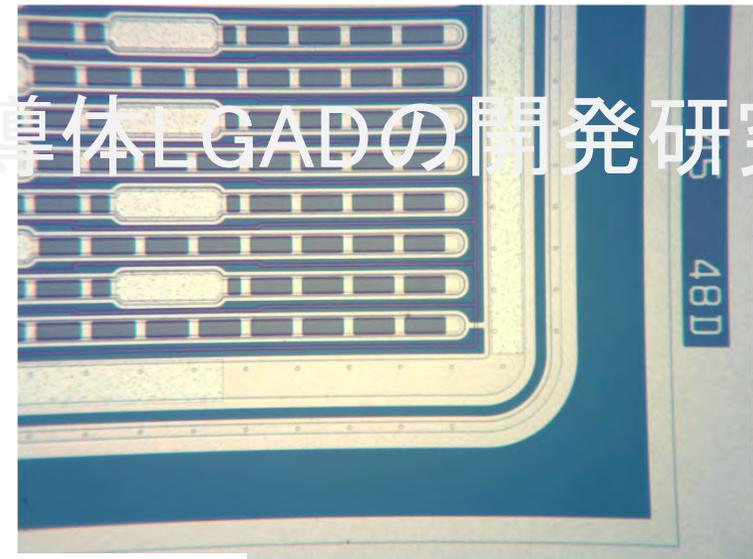
評価サンプル(HPK)

センサー厚: 0, 80 μ m

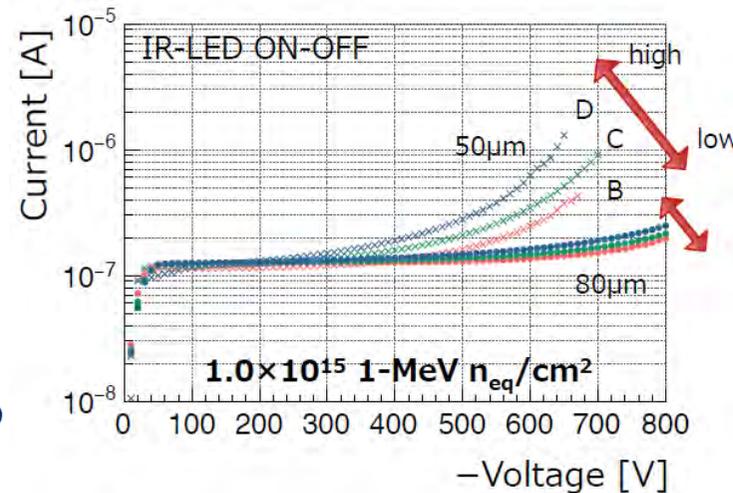
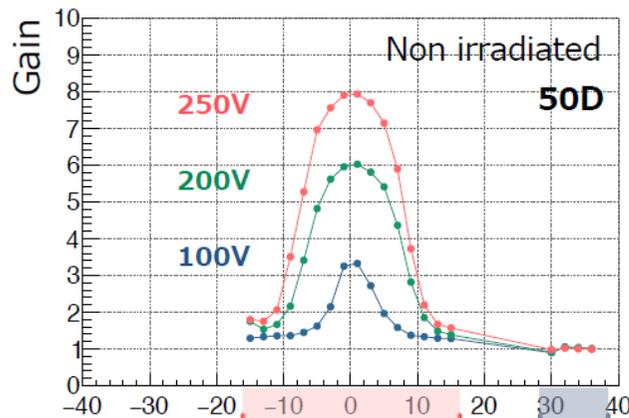
レーザースキャン:
構造を反映した増幅度



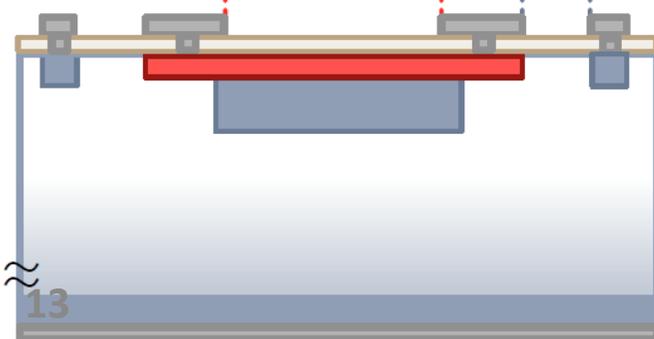
Monitor Diode (1mm ϕ)



Strip (pitch=80 μ m)



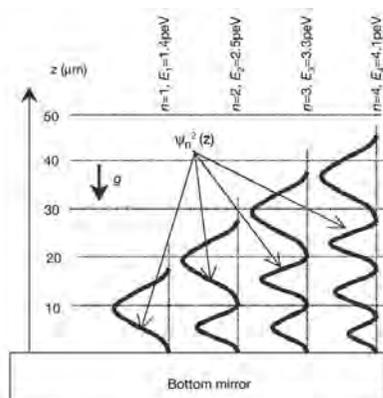
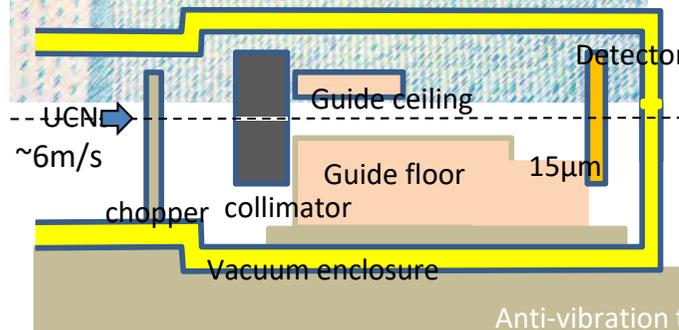
中性子照射後の電流増幅
P+濃度の薄いものほど、
増幅特性の劣化が大きい



まとめ LGADの信号増幅特性を評価した

- ◆ 未照射は期待した通りの特性 ($G > 10$)
 - ◆ 照射後の増幅特性の劣化がみられる
- 時間特性評価は今月のテストビームで行う

SOI技術を用いた 高位置分解能中性子検出器の開発研究

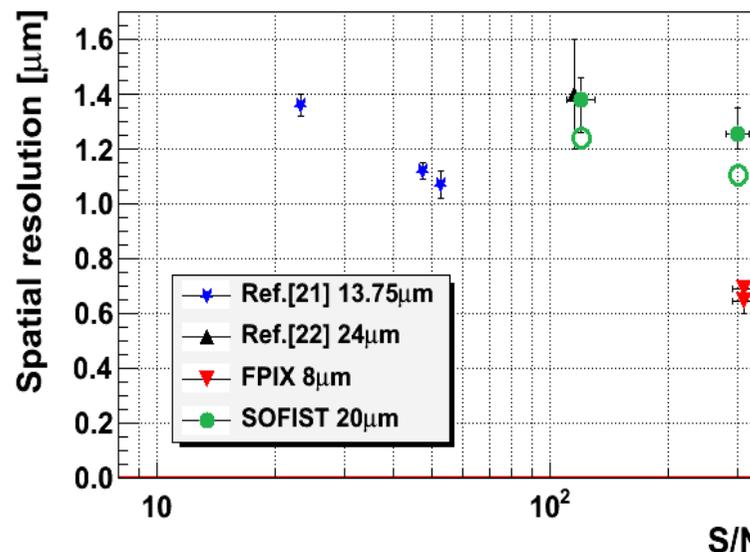
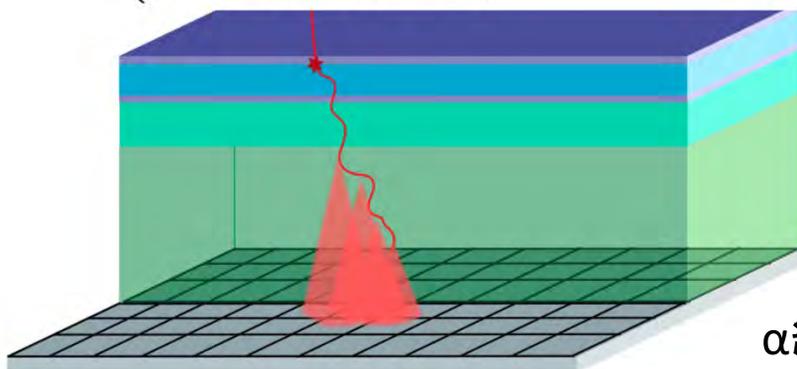
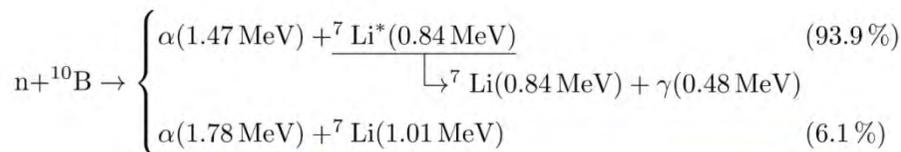


$$z_0 = \left(\frac{\hbar^2}{2m_i m_g g} \right)^{1/3} \sim 6 \mu\text{m}$$

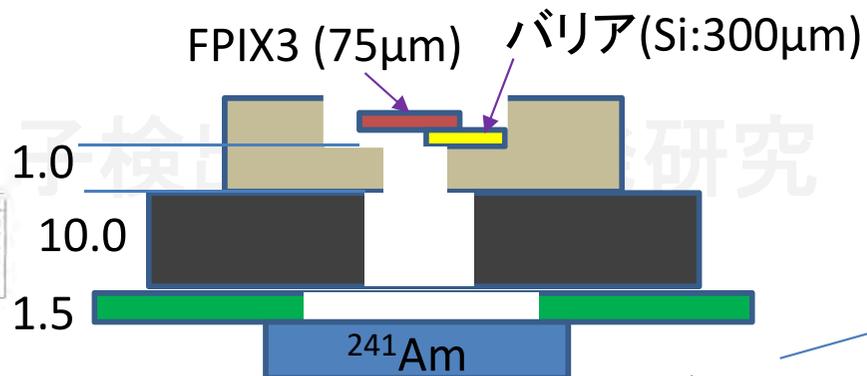
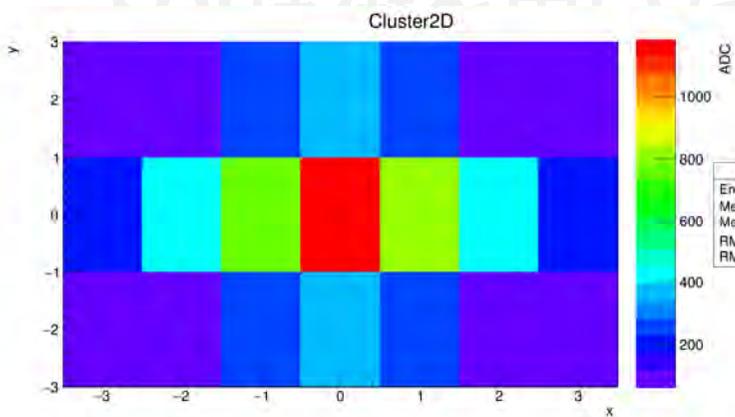
$$E_0 = \left(\frac{m_g^2 g^2 \hbar^2}{2m_i} \right)^{1/3} \sim 0.6 \text{ peV}$$

重力下の超冷中性子の密度分布
O(10μm): 密度分布+時間発展
から重力質量と慣性質量を個別に決定
弱い等価原理の量子状態での検証

UCNはB膜でα+Liに変換



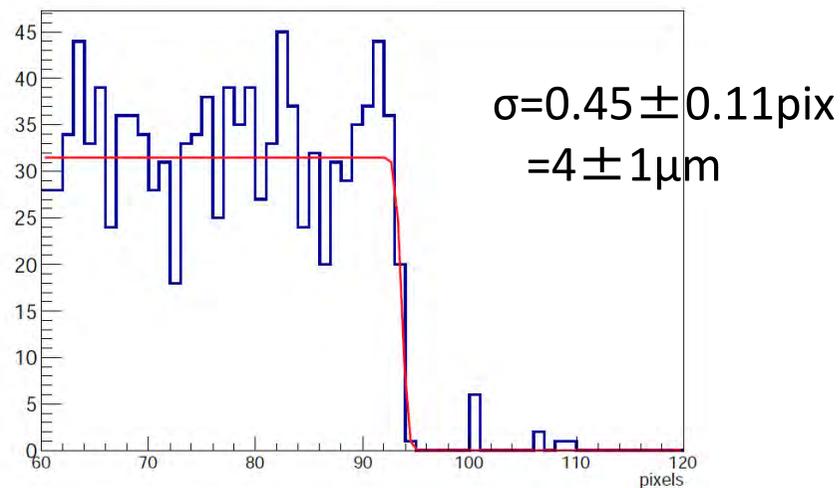
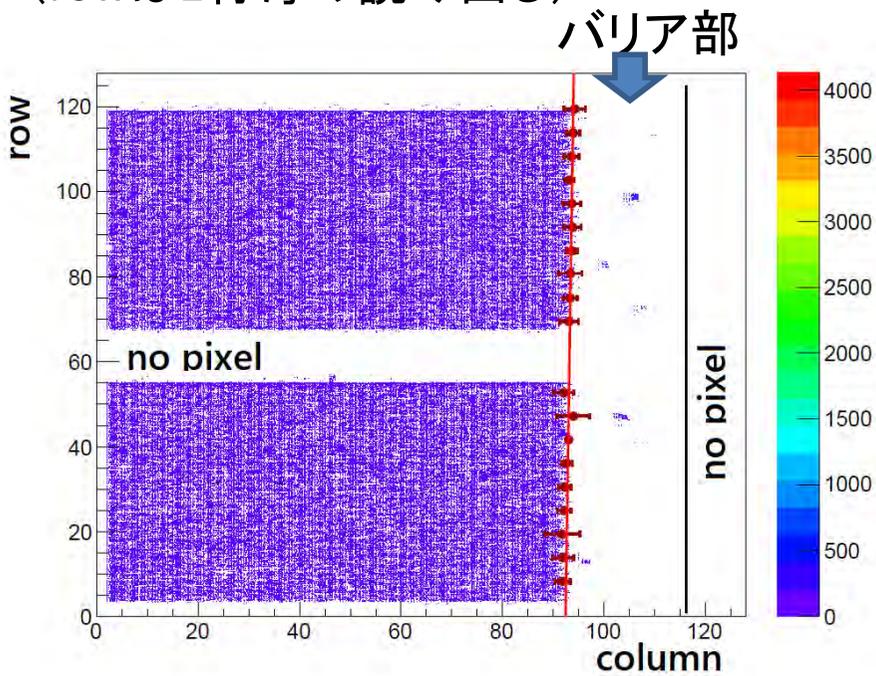
α線への変換位置を、世界最高位置分解能を示す
SOI FPIXで測定する



バリアエッジ

平均的な隣接ピクセルへの電荷分配
荷電重心により高位置分解能達成可能
(rowは2行毎の読み出し)

センサー裏面のバリアで α を遮断し、エッジの位置測定精度から分解能を評価



エッジの非直線性、 α の角度の効果を含む
冷中性子線+Gdエッジで測定予定

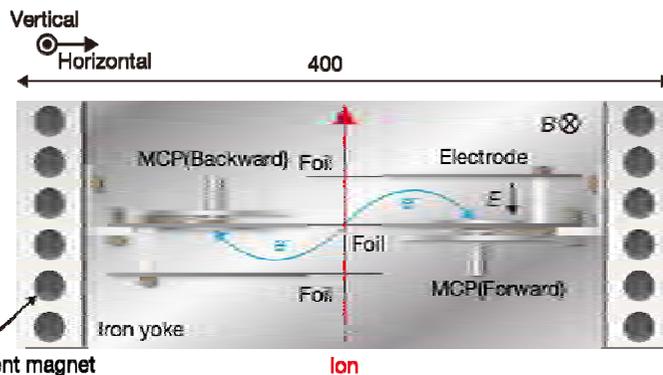
短寿命RI質量測定用の検出器の開発

理研RIBFの蓄積リング（稀少RIリング）を用いた短寿命RIの質量測定
 → rプロセスの経路解明へ

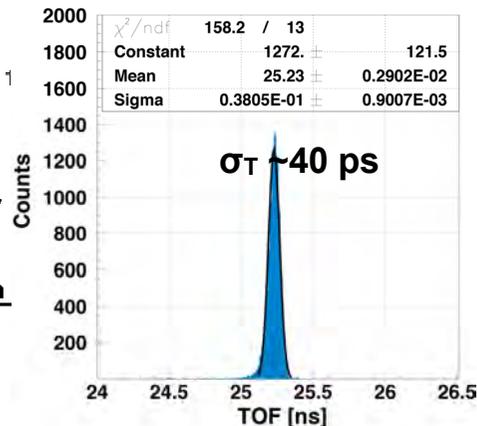
BE-MCP (最重要TOF検出器)

RIの質量は蓄積リング内の周期と速度から決定
 高精度で速度決定のためのTOF検出器への要請

- ・ 時間分解能 $\sigma < 100$ ps
- ・ 可能な限り薄い検出器 ($\Delta\beta/\beta < -1 \times 10^{-4}$)
- ・ 検出効率 100%

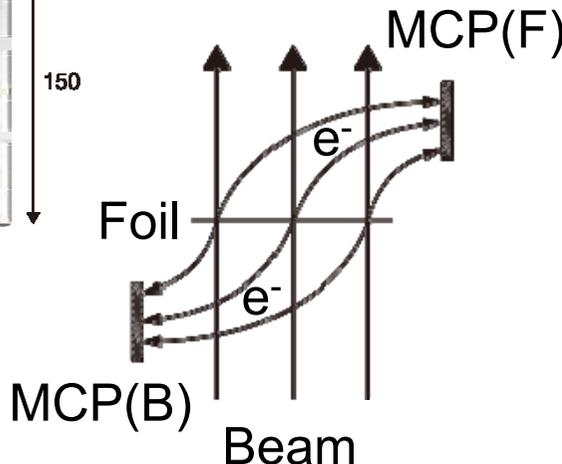
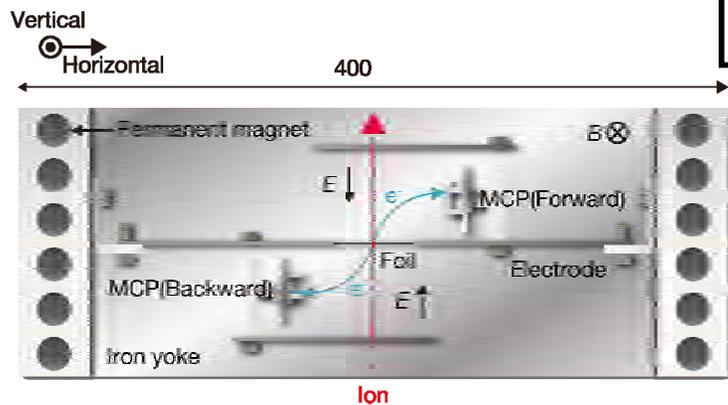
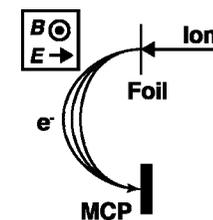


時間分解能

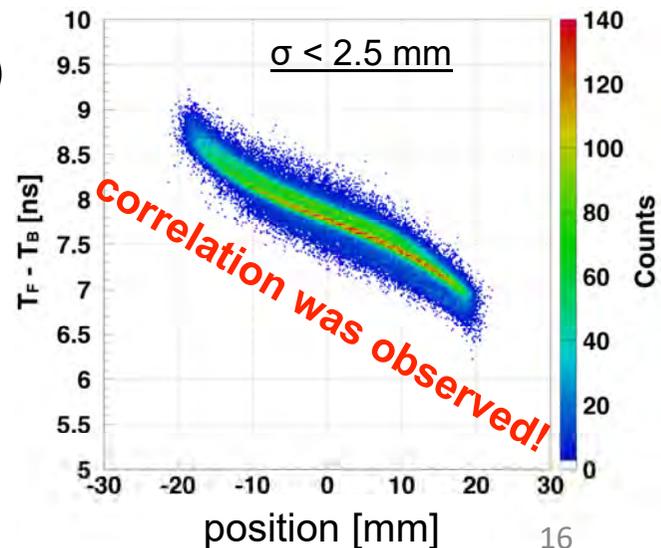


検出原理
 薄膜から放出される二次電子の、
 磁場(B)と電場(E)を用いた等時性輸送

- ・ 時間分解能：等時性により可能
- ・ 速度変化：薄膜により最小限
- ・ 検出効率：大きい磁場により可能



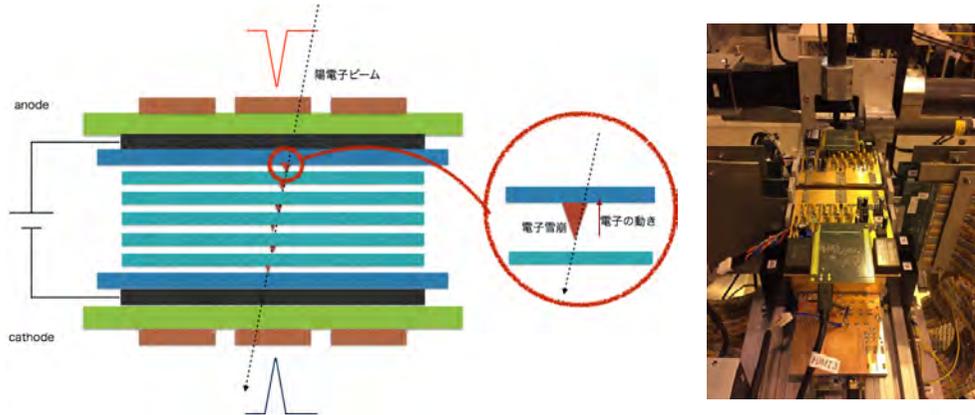
時間差の位置依存性



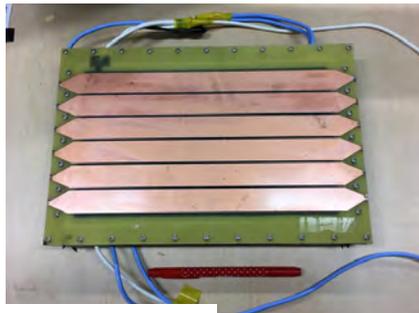
位置検出原理
 薄膜とMCPの角度を90度に設定することにより、
 二次電子の軌道・輸送時間は薄膜位置に依存。
 薄膜の前方と後方に放出される二次電子の時間差から
 ビーム入射位置を決定できる。

中條

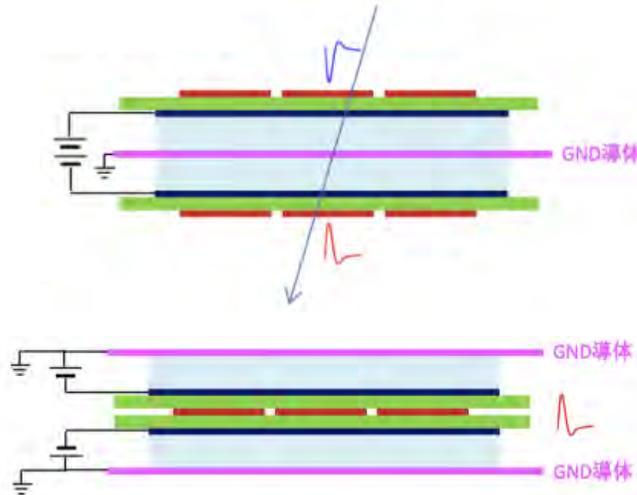
J-PARC実験に向けたMulti-gap Resistive Plate Chamber (MRPC)の開発



検出器のPad形状の最適化



検出器の実GND化

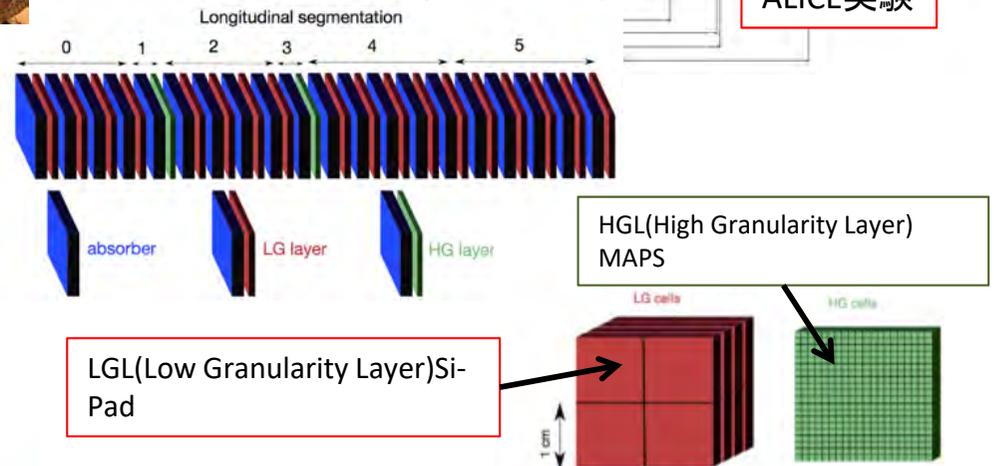
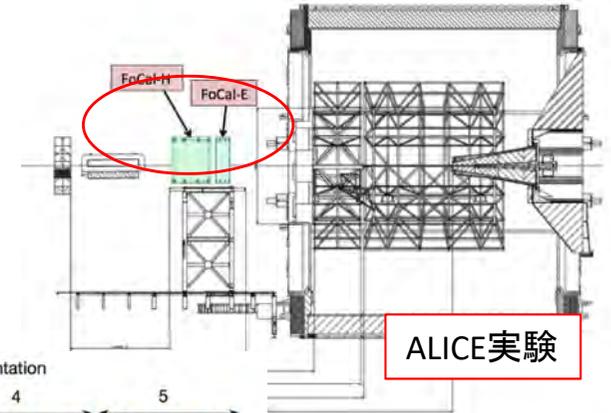


LHC-ALICE実験用 超前方光子測定用新型電磁カロリメーター (Focal) 開発

テスト実験

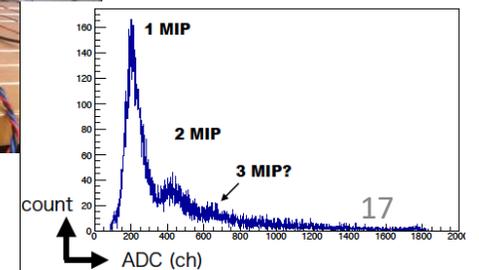
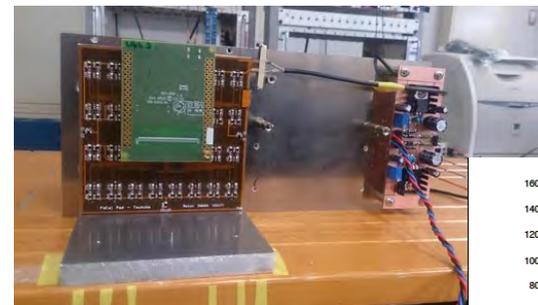
2014-2016年
CERN-PS/SPS

2017/12/15~22
東北大ELPH



LGL (Low Granularity Layer) Si-Pad

HGL (High Granularity Layer) MAPS



放射光 X線回折関連 (西堀)

Cadmium Telluride Module

CdTe sensor

- largest available CdTe sensors
35 x 42 mm², 1 mm thick
- two sensors per module with gap
between sensors

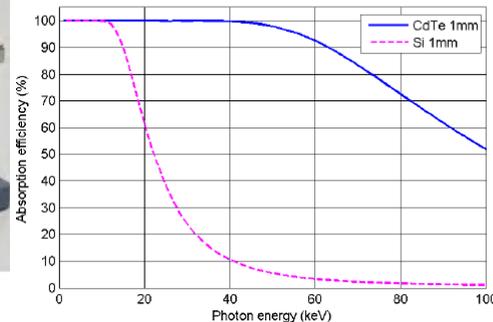
PILATUS3 readout ASIC

- featuring DECTRIS Instant
Retrigger Technology

Number of pixels: 487 × 195 pixels
Pixel size: 172 × 172 μm²
Active area: 83.8 × 33.6 mm²



Efficiency CdTe vs. Silicon



CdTe Pixel Detector



2018年 SPring-8
単結晶X線回折BLに納入決定

SPring-8 パートナーユーザー課題の再延長(~2018年度)決定 2018年1月

代表 : Bo Iversen (Aarhus Univ. /筑波大学海外教育研究ユニット招致)

メンバー: 西堀 英治

ミッション: CdTe検出器を利用した利用研究の立ち上げ



~100KeVの高エネルギーX線の本格利用
へ向けた立ち上げを行う

2018年度はCdTe 検出器の立ち上げ調整
と利用研究を進める。

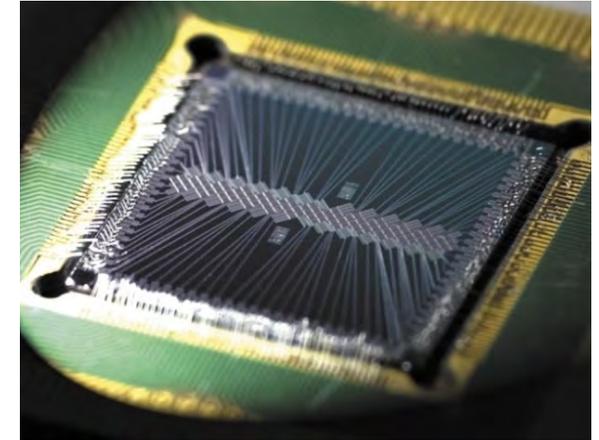
超伝導トンネル接合検出器 (STJ) による粒子検出 (I)

STJを用いた
飛行時間型質量分析装置

質量と電荷を分離した真の質量分析へ

産業技術研究所ナノエレクトロニクス研究部門
超伝導分光エレクトロニクスグループ作成

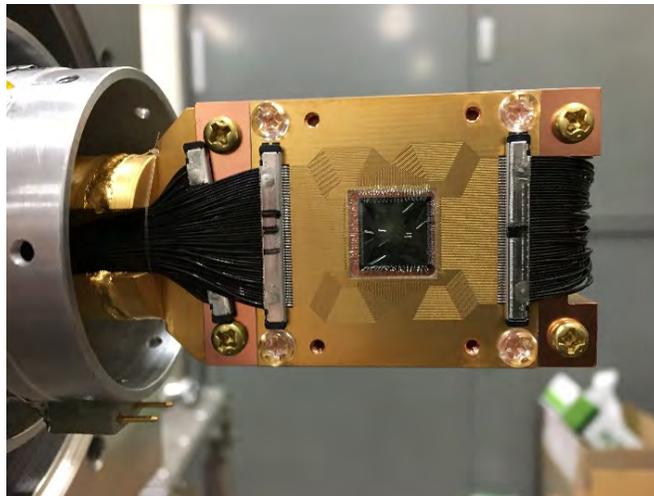
100x 100um x 100um detectors



数十keV領域での粒子検出テスト

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門

100 keV イオンビームを用いたテストベンチによる素子の改良とその性能評価

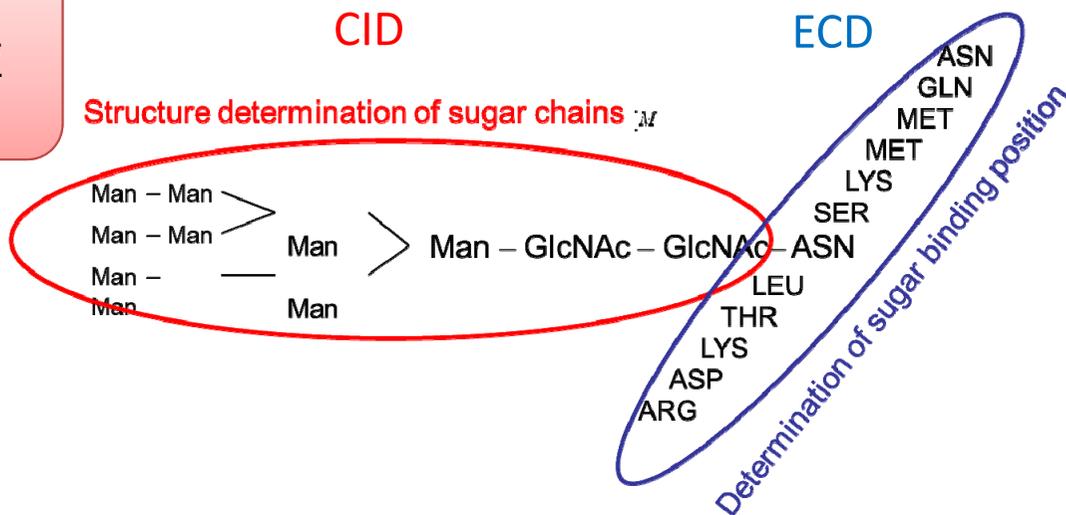


スパッタイオン源から得られる種々の原子イオンに対する応答を調べる。

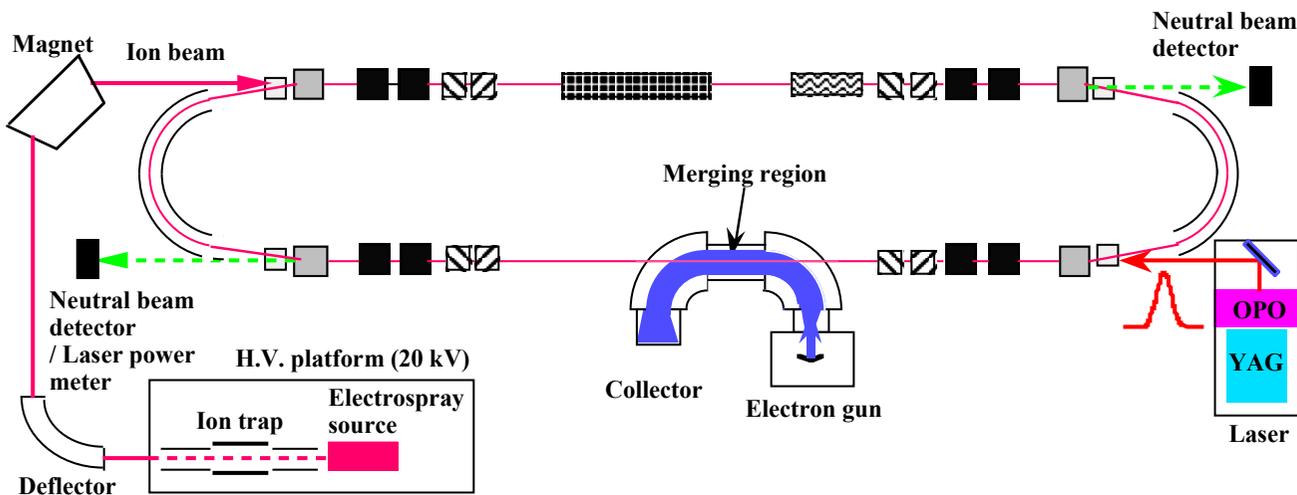
科研費 基盤研究(B)

超伝導トンネル接合検出器 (STJ) による粒子検出 (II)

STJを静電型イオン蓄積リングに導入することによる糖ペプチドの解離過程の研究



糖ペプチドのCIDおよびECDによる解離



静電型イオン蓄積リングによるECD/CID過程
+
STJによる解離片の質量分析

宇宙史国際シンポジウム

14:40 – 14:50 Division for Development of Photon and Particle Detectors

Kazuhiko HARA TCHoU

15:10 – 16:00 SOI Pixel Detector – Looking into History of Universe

Yasuo ARAI KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Inaugural Symposium for the Tomonaga Center for the History of the Universe

March 26 and 27, 2018

DIVISION for DEVELOPMENT of PHOTON and PARTICLE DETECTORS

Plenary Session (13:00-15:00, March 27, 2018)

15 min each including discussion

- Development of ATLAS Pixel Detectors for the HL-LHC (Junki Suzuki)
- Forward Silicon Calorimeter for future ALICE upgrade (TBD)
- Development of TOF detector for Rare-RF Ring (Daiki Kamioka)
- Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Astronomical Observations (Yosuke Murayama)
- R&D of quantum photo-sensor based on superconductor with cryo-SOI readout (Rena Wakasa)
- Multi-gap Resistive Plate Chamber for Time-of-Flight detector (TBD)
- Low-Gain Avalanche Detector (LGAD) for 3D Tracking (Sayaka Wada)
- Silicon-on-Insulator Pixel Detector with Precision Spatial Resolution (Kazuhiko Hara)