

光量子計測器開発推進室の活動について

数理物質融合科学センターワークショップ

2015年1月19日

金 信弘(光量子計測器開発推進室長)

宇宙史国際研究拠点

Research Core for the History of the Universe

数理物質融合科学センター

Center for Integrated Research in Fundamental Science and Engineering, University of Tsukuba



光量子計測器開発推進室

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。

数理物質融合科学センター

宇宙史国際研究拠点

融合研究企画室

環境エネルギー材料研究拠点

光量子計測器開発推進室

開発室員：金(室長)、富田、江角、原、西堀、近藤

超伝導検出器の開発, SOIピクセル検出器の開発, MPPC読み出しミュー粒子検出器等+公募プロジェクト

2015/10/19 発足

TIA-ACCELERATE
の光量子センシング
スクエア(光量子計
測技術開発を目的と
する)における筑波
大学の活動拠点。

つくばの他機関との連携

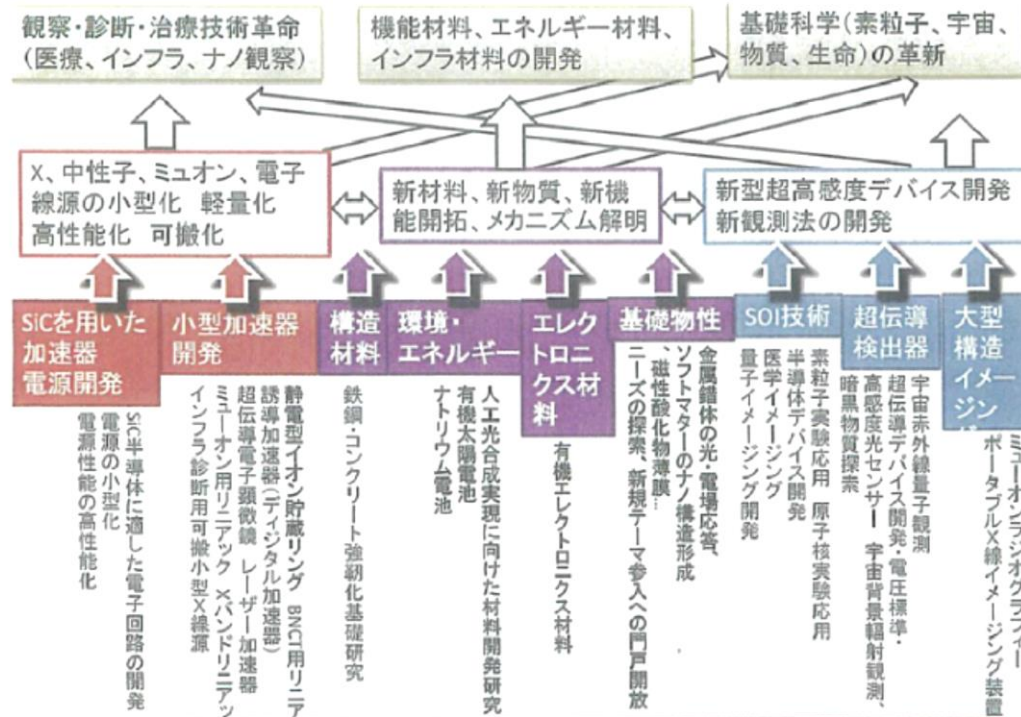
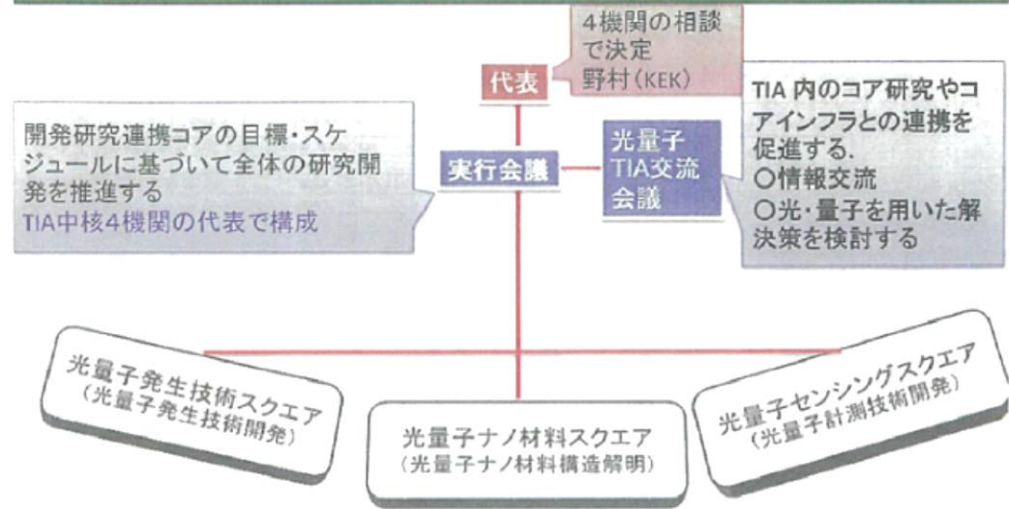
TIA-ACCELERATE
光量子産業応用イニシアチブ

KEK 測定器開発室
産総研 CRAVITY施設

光量子産業応用イニシアチブ:TIA-ACCELERATE

TIA-nanoが挑む新領域
計測技術とナノバイオ
野村昌治(KEK)

第5回TIA-nano公開シンポ
ジウム(2014. 9. 3)



計測タスクフォース(座長: 秋宗)検討報告(2012年度)

最先端光量子計測技術の開発と展開

つくば光量子計測器工房

～つくば科学・産業創成コンビナート～

超高性能の最先端光量子計測器関連技術の開発とその利活用を促進。

X線分光：超高エネルギー分解能、超高速
→高精度の材料分析

赤外線－光子検出
→量子情報通信

超微細半導体デバイス

医学イメージング

宇宙線を用いたインフラ診断

宇宙線を用いた火山活動予測

最新産業

先端基礎科学

宇宙赤外線
光子観測

宇宙背景
ニュートリノ探索

暗黒物質探索

宇宙背景輻射観測

ヒッグス粒子研究

超対称性粒子探索

ニュートリノ研究

トップクォーク研究

宇宙線研究

つくば光量子計測器工房

主な開発項目

- ①超伝導光量子検出器 ②SOIピクセル飛跡検出器
- ③SOI増幅器 ④MPPC読み出しミュー粒子検出器
- ⑤極低温増幅器 ⑥半導体・超伝導複合型検出器

技術展開

最近の光量子計測器トピックス

超伝導検出器 SOIピクセル技術
大型構造イメージング用MPPC光子検出

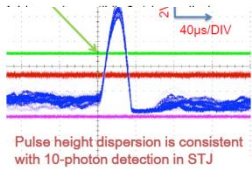
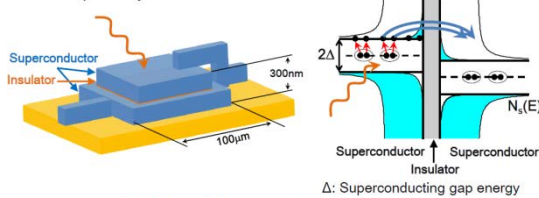
KEK、NIMS、筑波大、産総研
つくば研究機関
つくば企業群

光量子計測器開発プロジェクト

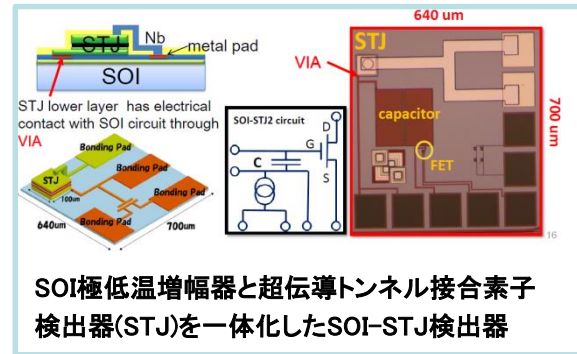
光量子計測器開発プロジェクトの基盤テーマとして、以下の計測技術の開発を推進する。

超伝導検出器

- Superconductor / Insulator / Superconductor Josephson junction device

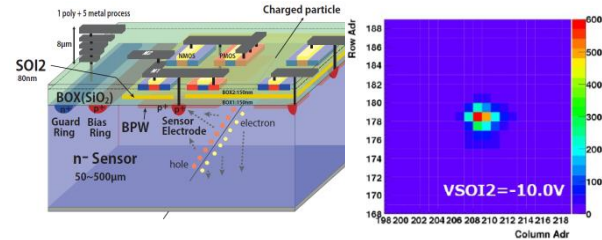


超伝導トンネル接合素子検出器(STJ)の構造(上)と可視光レーザー光(10光子相当)に対する応答信号(下)



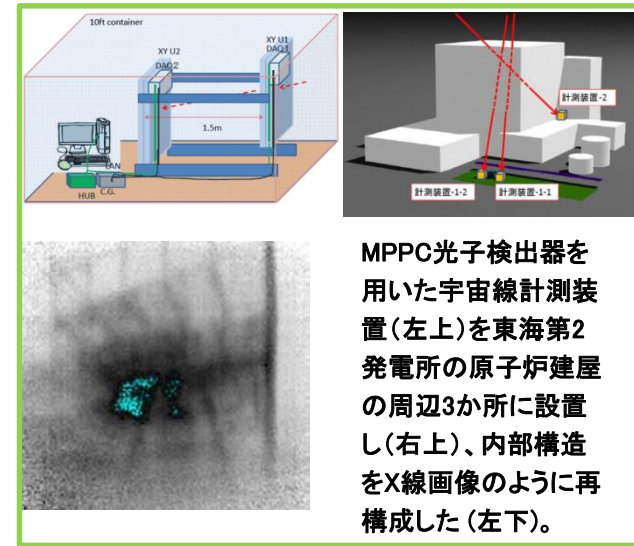
SOI極低温増幅器と超伝導トンネル接合素子検出器(STJ)を一体化したSOI-STJ検出器

SOI技術



SOI技術による電子回路と半導体飛跡検出器を一体化したSOIピクセル飛跡検出器(左)と100kGyガンマ線照射後の赤外レーザー光応答信号(右)。

大型構造イメージング MPPC光子検出器



MPPC光子検出器を用いた宇宙線計測装置(左上)を東海第2発電所の原子炉建屋の周辺3か所に設置し(右上)、内部構造をX線画像のように再構成した(左下)。

1. 超伝導検出器: 遠赤外線光子カウンター、高エネルギー分解能光量子計測器として宇宙史研究・物質科学研究・産業応用
2. SOI技術: 高集積電子回路・極低温電子回路・粒子ピクセル検出器として宇宙史研究・物質科学研究・産業応用
3. 大型構造イメージング用MPPC: 宇宙線ミュー粒子計測器として、宇宙線研究・インフラ診断・火山活動予測

さらに、上記以外の計測技術についても、本センターにおける基礎科学・産業応用に用いられる計測技術の提案検討に基づいて、プロジェクトの一テーマとして開発

光量子計測器開発推進室発足会議

日時: 2015年11月30日15時

会場: 計算科学研究センター・ワークショップ室

発足会議プログラム:

15:00 - 15:10	<u>推進室概要</u>	金 信弘
15:10 - 15:30	<u>超伝導検出器</u>	武内 勇司
15:30 - 15:50	<u>SOIピクセル検出器</u>	原 和彦
15:50 - 16:10	<u>超伝導検出器の生体分子研究利用</u>	富田 成夫
16:30 - 16:50	<u>放射光X線回折</u>	西堀 英治
16:50 - 17:10	<u>分光分析による表面物理化学</u>	近藤 剛弘
17:10 - 17:25	<u>宇宙線を用いた大型構造イメージング</u>	原 和彦
17:25 - 17:40	<u>シリコン電磁カロリメータ等</u>	江角 晋一



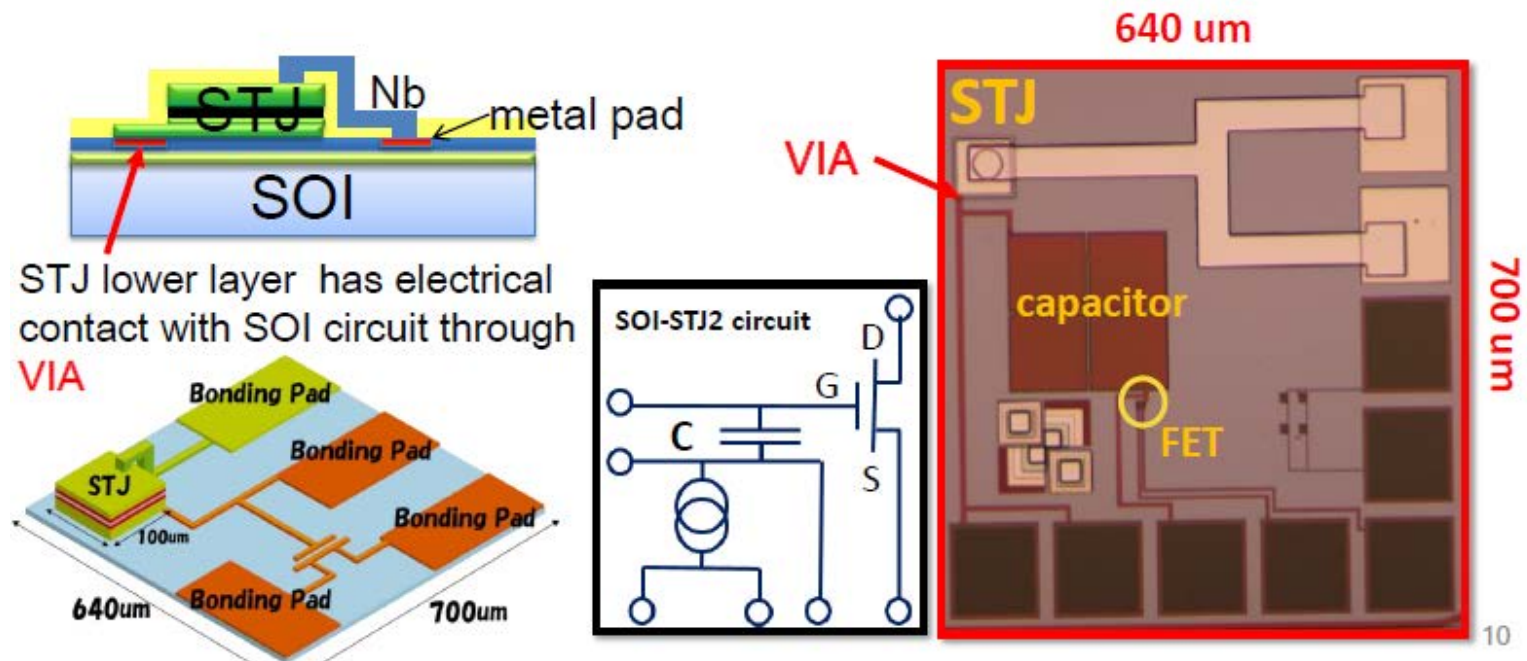
光量子計測器に関する情報の共有、融合共同研究、新型計測技術の創出、産業・社会への応用を推進するために、理工連携・つくば連携のもとに光量子計測器開発研究の情報交換と議論を行った。

KEK3名、産総研2名を含めて15名の研究者が参加。

超伝導検出器

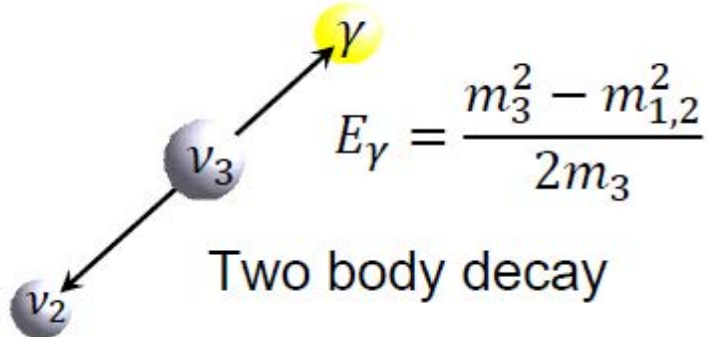
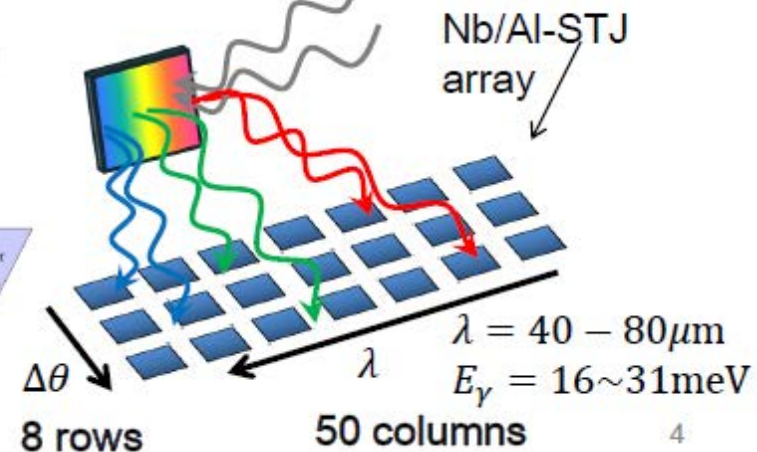
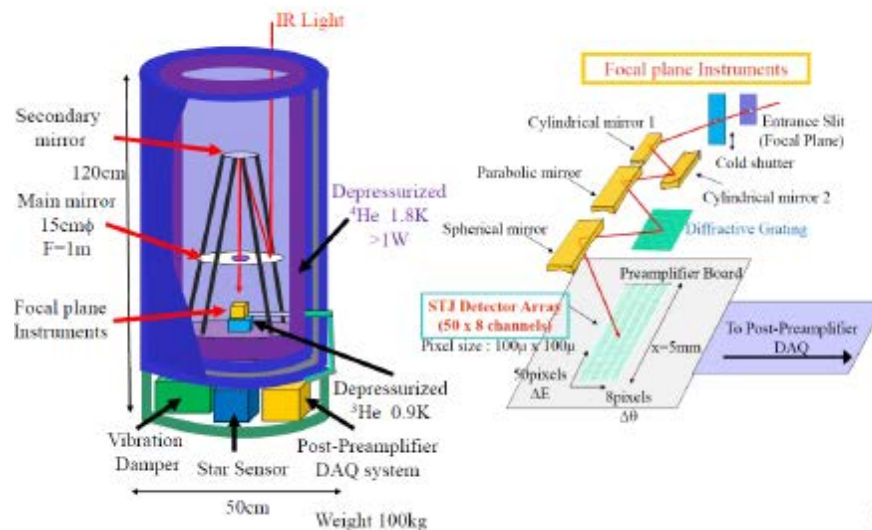
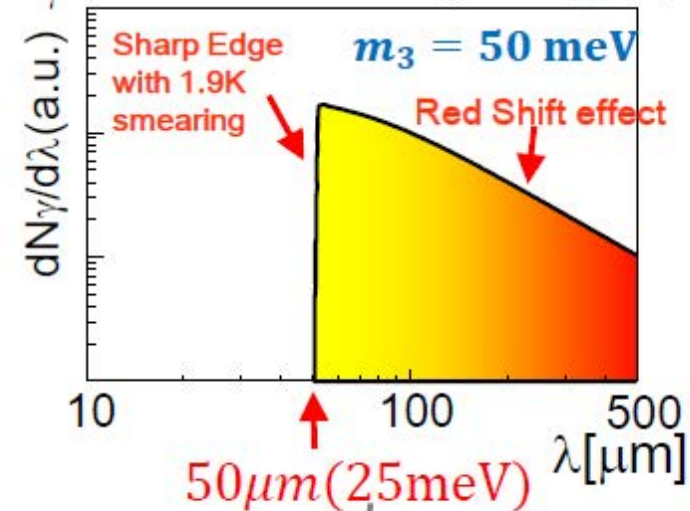
筑波大, KEK, 産総研等との共同研究で, SOI技術を用いた極低温増幅器と超伝導トンネル接合素子STJを一体化したSOI-STJ検出器を開発中

- SOI: Silicon-on-insulator
 - CMOS in FD-SOI is reported to work at 4K by T. Wada (JAXA), et al.
J Low Temp Phys 167, 602 (2012)
- SOI と STJ の融合 (SOI回路一体型 STJ の基礎研究)
 - STJ layers are fabricated **directly on** a SOI pre-amplifier board and cooled down together with the STJ
- Started test with Nb/Al-STJ on SOI with p-MOS and n-MOS FET



宇宙背景ニュートリノ崩壊探索への応用

$$\nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$$

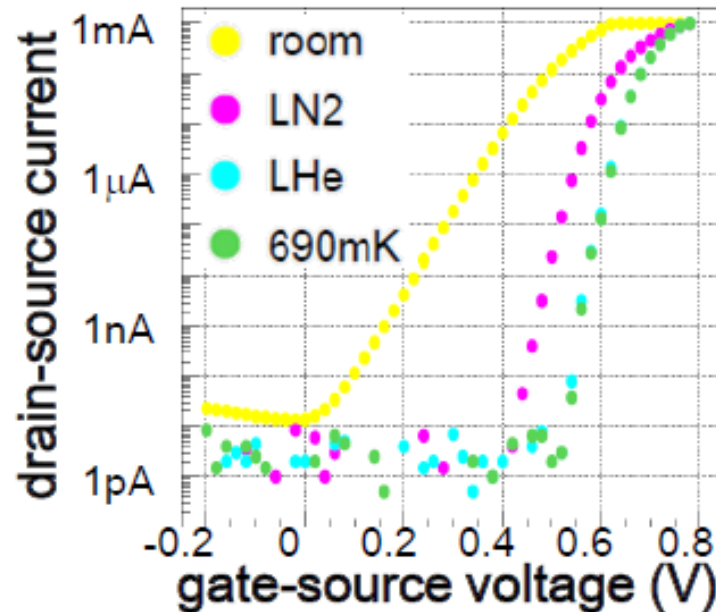
in the ν_3 rest frame λ_γ distribution in $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$ 

ニュートリノ崩壊探索実験のSTJ検出器に対する性能要求: 遠赤外線光子の一光子検出

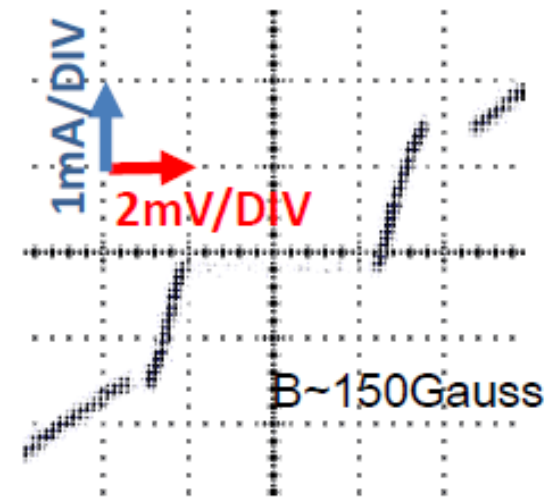
(1) $2 \mu\text{sec}$ 積分したノイズ電荷が30e以下

(2) STJのリーク電流が0.1nA以下

SOI上にSTJを形成後の特性



nMOS-FET in FD-SOI wafer on which a STJ is fabricated at KEK

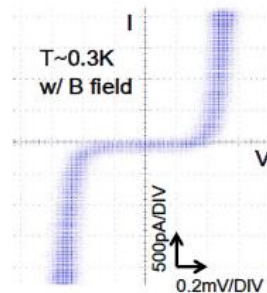


I-V curve of a STJ fabricated at KEK on a FD-SOI wafer

- Both nMOS and pMOS-FET in FD-SOI wafer on which a STJ is fabricated work fine at temperature down below 1K
 - 極低温では、スレッショルド電圧のシフト、サブスレッショルド領域のドレイン電流抑制、飽和領域でのドレイン電流の上昇など、特性が変動
- Nb/Al-STJ fabricated at KEK on FD-SOI works fine
- We are also developing SOI-STJ where STJ is fabricated at CRAVITY

STJの性能評価結果

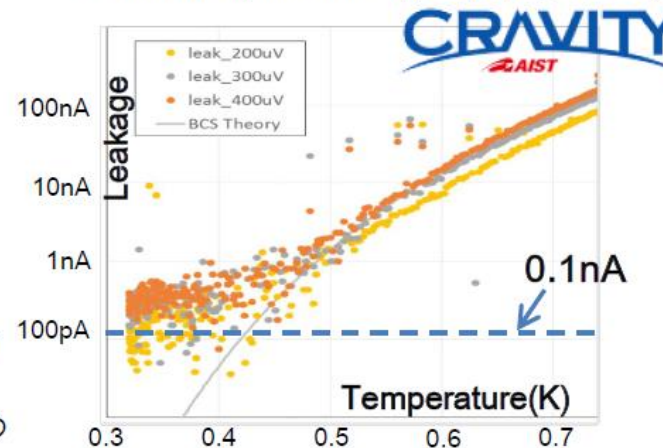
産総研CRAVITY施設で作成したSTJの性能試験： リーク電流0.2nA (50 μ m角)達成
SOI-STJ一体型検出器の開発をつくば連携によって推進



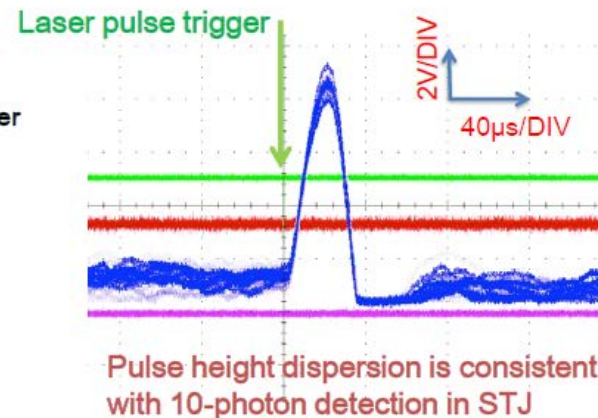
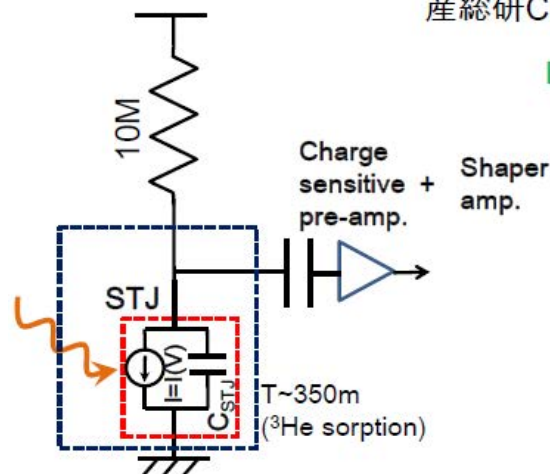
50 μ m $\times$ 50 μ m Nb/Al-STJ
fabricated in CRAVITY at AIST

- $I_{leak} \sim 0.2$ nA を達成
- 更に小さな junction size のものでテスト中

M. Ukibe et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 010115 (2012)
M. Ohkubo et al., IEEE Trans. Appl. Super, 24, 2400208 (2014)



産総研CRAVITY製100x100 μ m² Nb/Al-STJ



超伝導検出器の生体分子研究利用

筑波大, KEK, 産総研、京都大の共同研究

超伝導トンネル接合素子STJ検出器を用いて、電氣的に中性の生体分子の運動エネルギーと飛行時間を測定（運動エネルギー $E < 3\text{keV}$, $\Delta E = 200\text{eV}$ ）



生体分子の質量を測定



糖ペプチドの構造解析、結合位置の決定

今後の課題： 分解能の向上、有感面積の改良

SOI技術を用いたピクセル検出器の開発

筑波大, KEK等との共同研究で, SOI技術を用いたピクセル粒子検出器を開発中

4

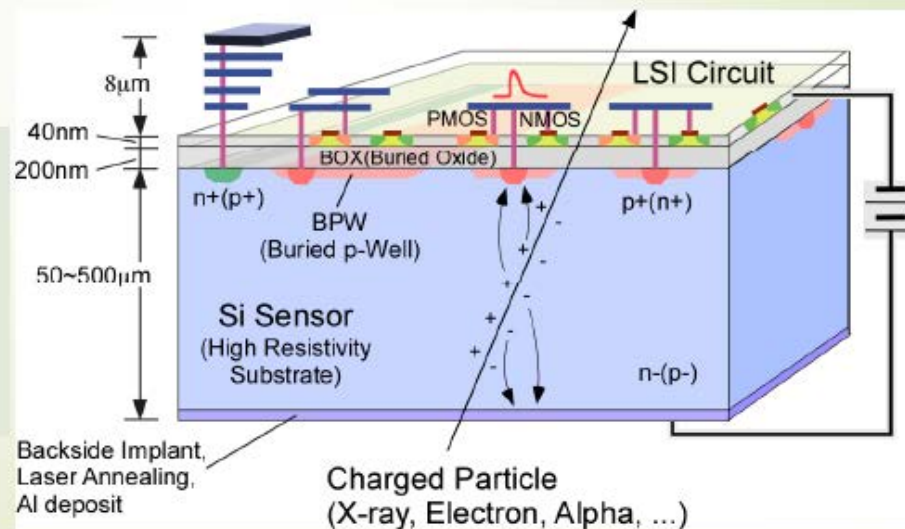
読出し一体型SOIピクセル検出器

SOI Pixelの技術的特徴:

- Soitec (⇒信越化学) による張合ウェハー
従来抵抗値: CMOS回路の製作
高抵抗ウェハー: 粒子検出部
→用途に応じた (全空乏型高速センサ)
- Lapis Semiconductor (0.2 μ m CMOS) によるMPW
→reliable fabrication

Handle wafer:

CZn $\sim 700 \Omega\text{-cm}$ (Default)
FZn $> 3 \text{ k} \Omega\text{-cm}$ (2009~)
FZp $\sim 25 \text{ k} \Omega\text{-cm}$ (2010~)
Double SOI (CZn) (2012~)
Double SOI (CZp) (2014~)

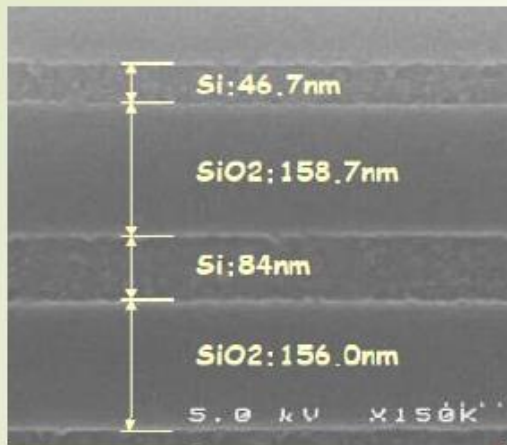


9

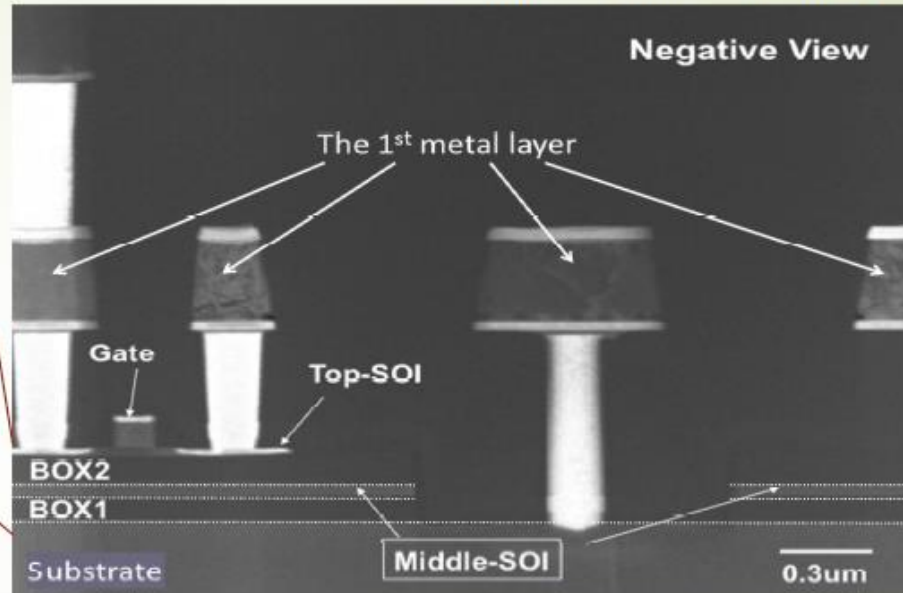
2重SOI による TID Recovery

2012~

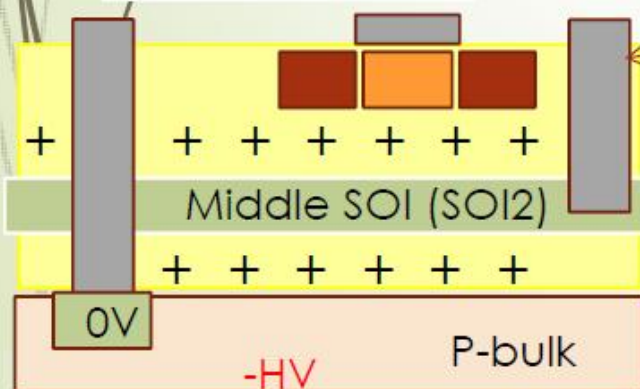
(SOITEC DSOI)



Courtesy of Lapis SemiConductor



(SHINETSU DSOI)



apply negative voltage (V_{SOI2}) to compensate positive charges in oxide layers



SOITEC nCZ



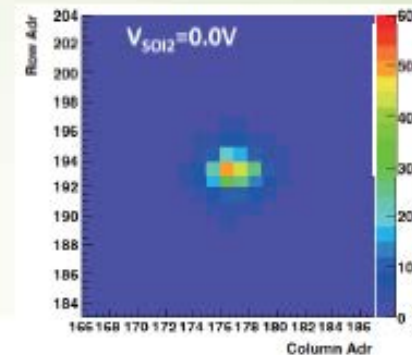
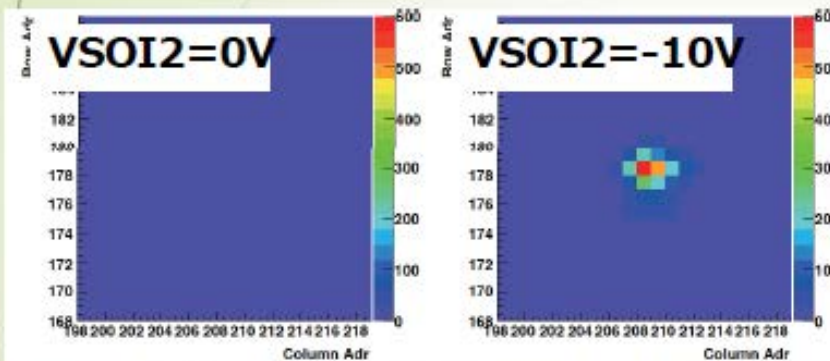
SHINETSU pCZ

16

Response of irradiated DSOI Pixel

M. Asano

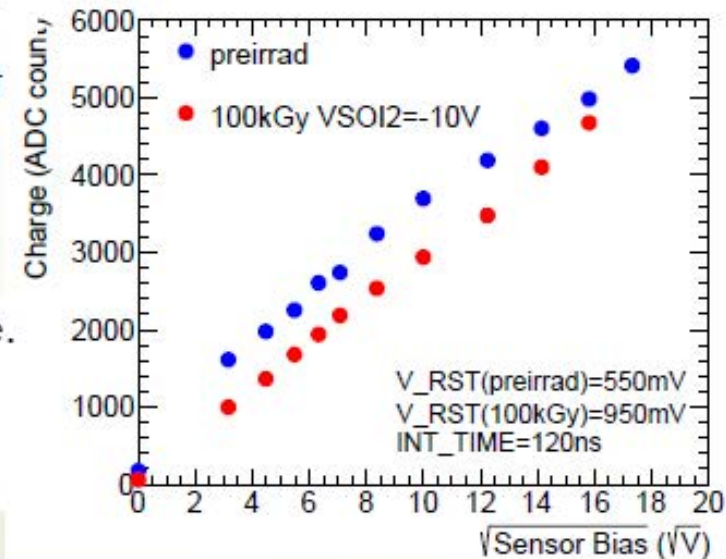
Response to infrared laser of 1064 nm wavelength and 20 ns pulse duration.

Pre-irrad

Images after 100 kGy disappeared but recovered with VSOI2=-10V.

Average ADC count vs. the bias voltage.

→ Linearity and sensitivity after 100kGy (with VSOI2=-10V) are similar to pre-irradiation



SOI技術を用いたピクセル検出器の開発

SOI Pixelの開発を初めて10年が経過

新学術科研費 進行中 2013-17

放射線耐性評価を主導的に

TID効果による限界： 数kGy

DSOIの導入 >100kGy

LDD調整 ~MGy (評価中)

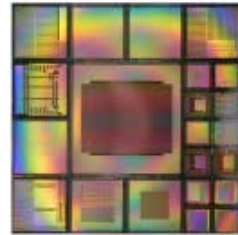
FPIXの設計・製作 (最小ピクセルサイズ 8um角)

ILC用のSOFIST開発中

25 新学術 計画研究

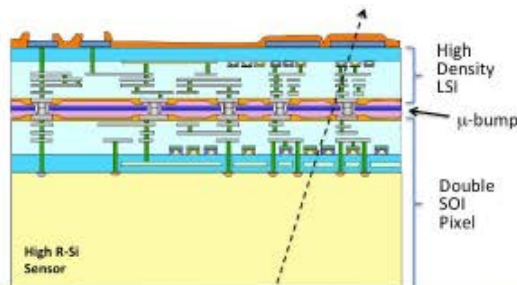
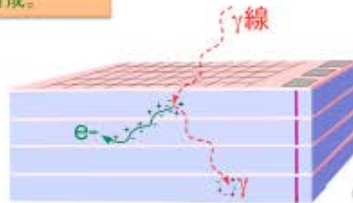
A01: 3次元ピクセル・プロセス開発

- SOI量子イメージングプロセスの性能向上。
- 高放射線耐性構造、高集積化、大面積化へ向けた研究。
- Si貫通ビアによる多層検出器の実現に向けた研究開発。
- SOI技術を発展させ、積層回路を実現する3次元回路実装技術の研究。
- 相乗りプロセス(MPW)の主催。
- 他研究班へのアドバイス、人材育成。



MPWランのマスク

多層SOI検出器のイメージ:
放射線による相互作用の素過程を全て検出し、新たな測定手法の提案を行う。



A02班: SOI技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究

B01班: 宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓

B02班: 「ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温SOI赤外線イメージングの開拓」

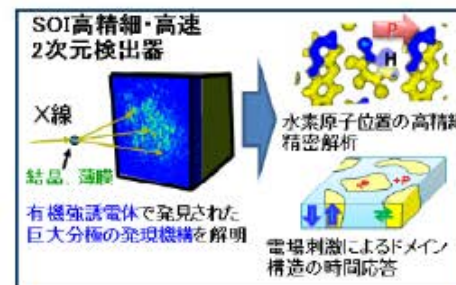
C01班: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

C02班: X線自由電子レーザー(XFEL)による超高速ナノ構造解析用検出器

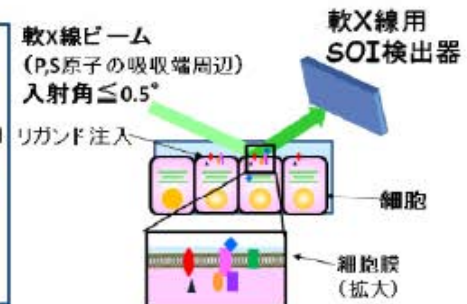
D01: 放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング

構造の空間・時間変化を精密に捕らえるため、高精細(30 μ mピクセル)・高速(1マイクロ秒毎に動的撮影)・高感度(軟X線)のX線検出器を開発する。

先端的機能性物質(有機強誘電体)の研究

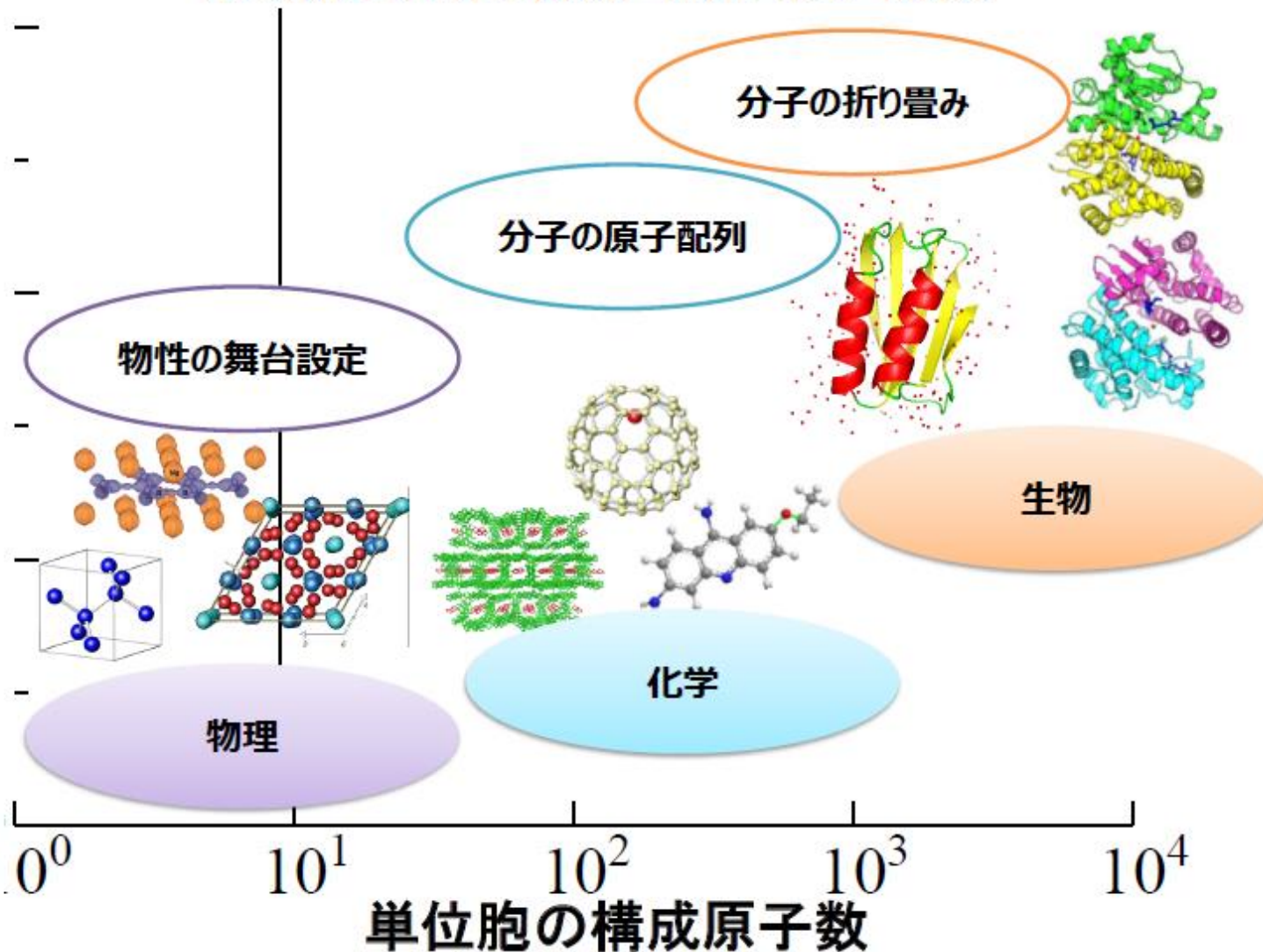


細胞膜近傍の構造変化を捉える

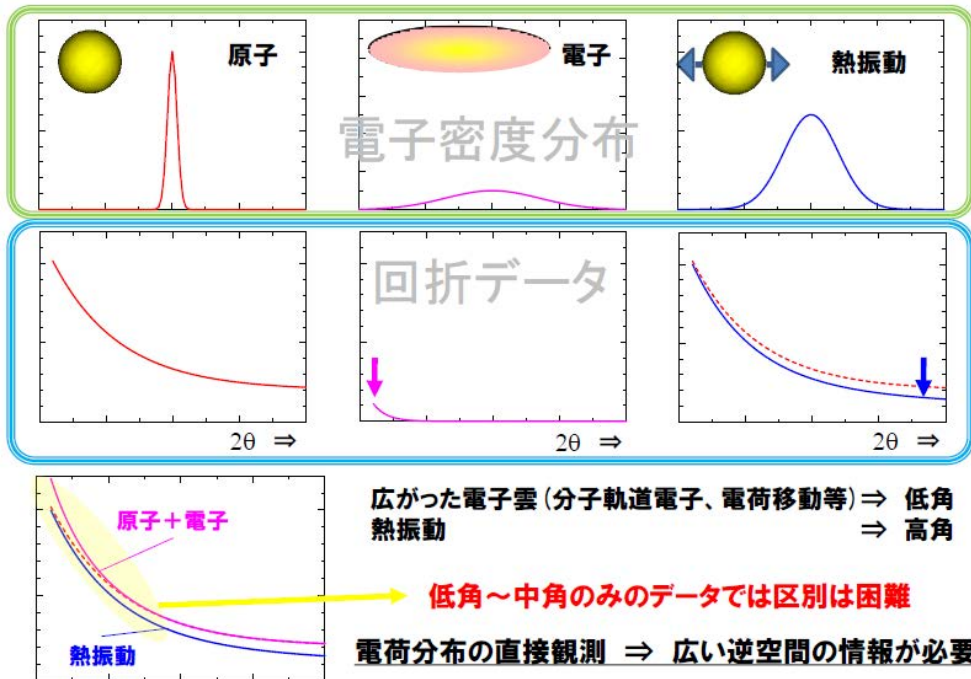


D02班: 投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング

放射光X線回折の対象



電子密度分布と回折データ



まとめ

X線回折の観測量は波数空間の強度データであり、高次の波数までの測定が物質の基礎科学の推進には必須。放射光の高エネルギー X 線の利用がそれを可能にする。

現状、放射光 X 線回折用の検出器は、Si 半導体に基盤としたものが殆ど。実験室や生体高分子の利用には最適。しかし、波長 $0.5 \text{ \AA}$ 程度からの検出効率は著しく低い。

海外検出器メーカーと高エネルギー放射光施設では、既に次世代に向けた高エネルギー回折の実験が始められている。

Need for faster readout time

Replacing IP technology with single photon counting detector

Required reading and erasing time (> 7 min.)



Image plate (IP) currently installed at BL02B1

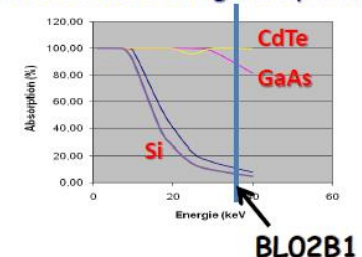
Fast readout



XPAD3 detector

A semiconducting layer of Silicon is not sufficient at high X-ray energies

Replacement of SC material required



極低温走査トンネル顕微鏡

Scanning tunneling microscope (STM)

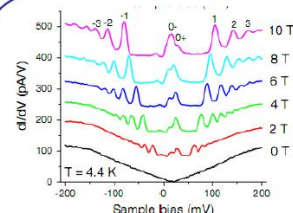
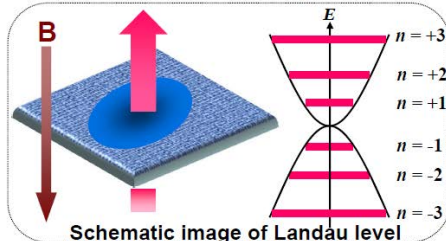
Low temperature STM

STM・STS計測では
固体表面の物理化学的な知見
特に物性や化学反応過程などを
原子分解能での顕微鏡観察と
局所分光計測で
明らかにすることが可能

(LDOS) can be measured

Graphene shows specific Landau levels under magnetic fields

Landau levels in 2D electron gas



La

Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene

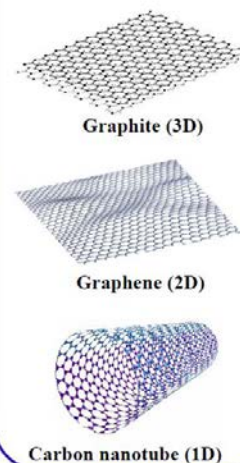
K. S. Novoselov,¹ Z. Jiang,^{2,3} Y. Zhang,² S. V. Morozov,¹ H. L. Stormer,² U. Zeitler,⁴ J. C. Maan,⁴
G. S. Boebinger,³ P. Kim,^{2*} A. K. Geim^{1*}

Novoselov et al., Science, 315 (2007) 1379

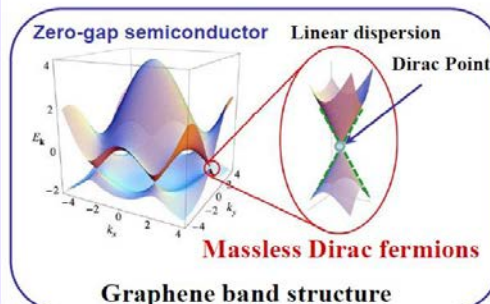
Large energy difference of graphene Landau levels is known to lead to **Quantum Hall effects at room temperature**

Background and motivation

Graphitic material

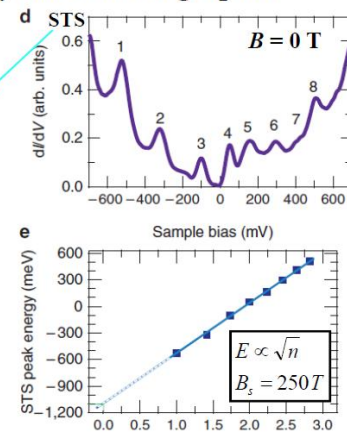
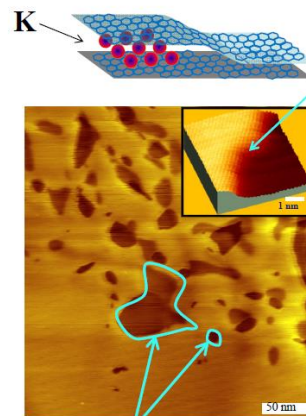


Graphene shows specific physical and chemical properties among the graphitic materials **due to its unique electronic structure**



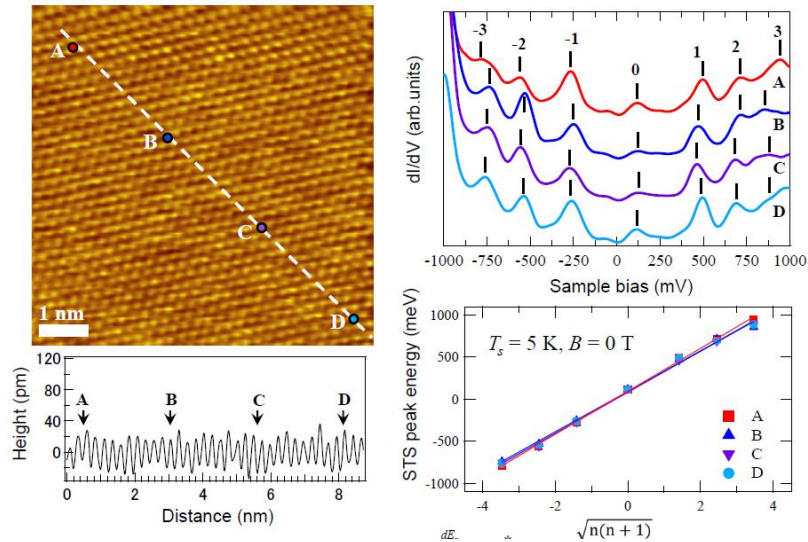
We have also observed Landau levels at $B = 0$ T

Potassium (K) partially intercalated graphite



D. Guo, T. Kondo, J. Nakamura, et al., Nature Communications 3 (2012) 1068

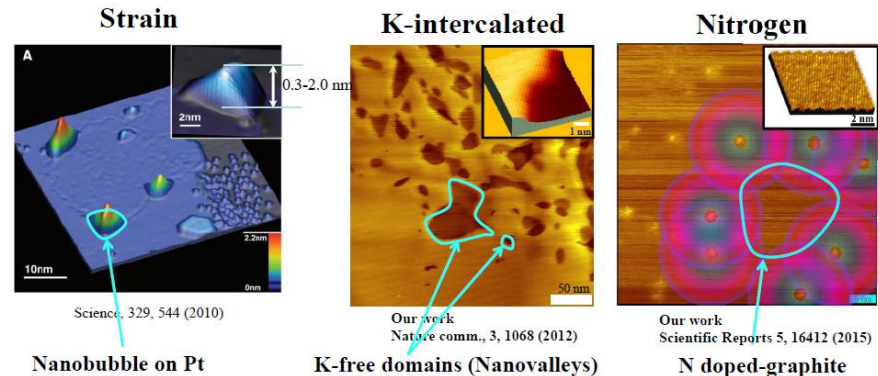
STM and STS on nitrogen doped graphite at $B = 0\text{T}$



Landau levels of **bilayer graphene** appear at **FLAT** area !

Summary

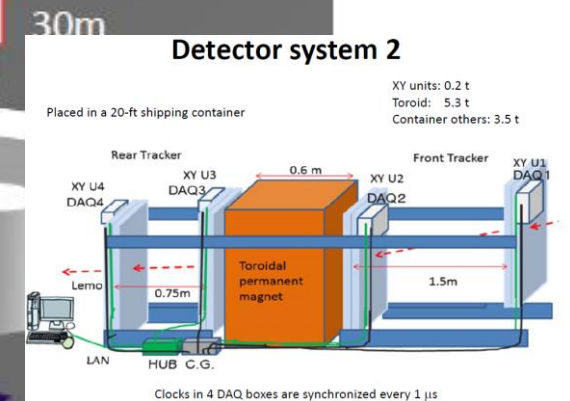
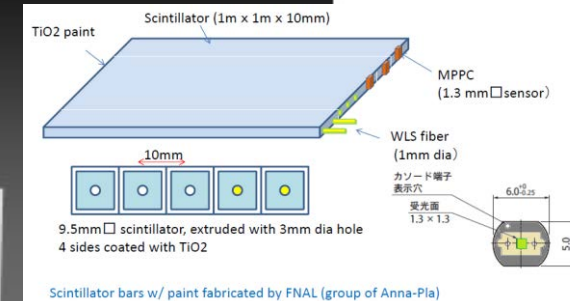
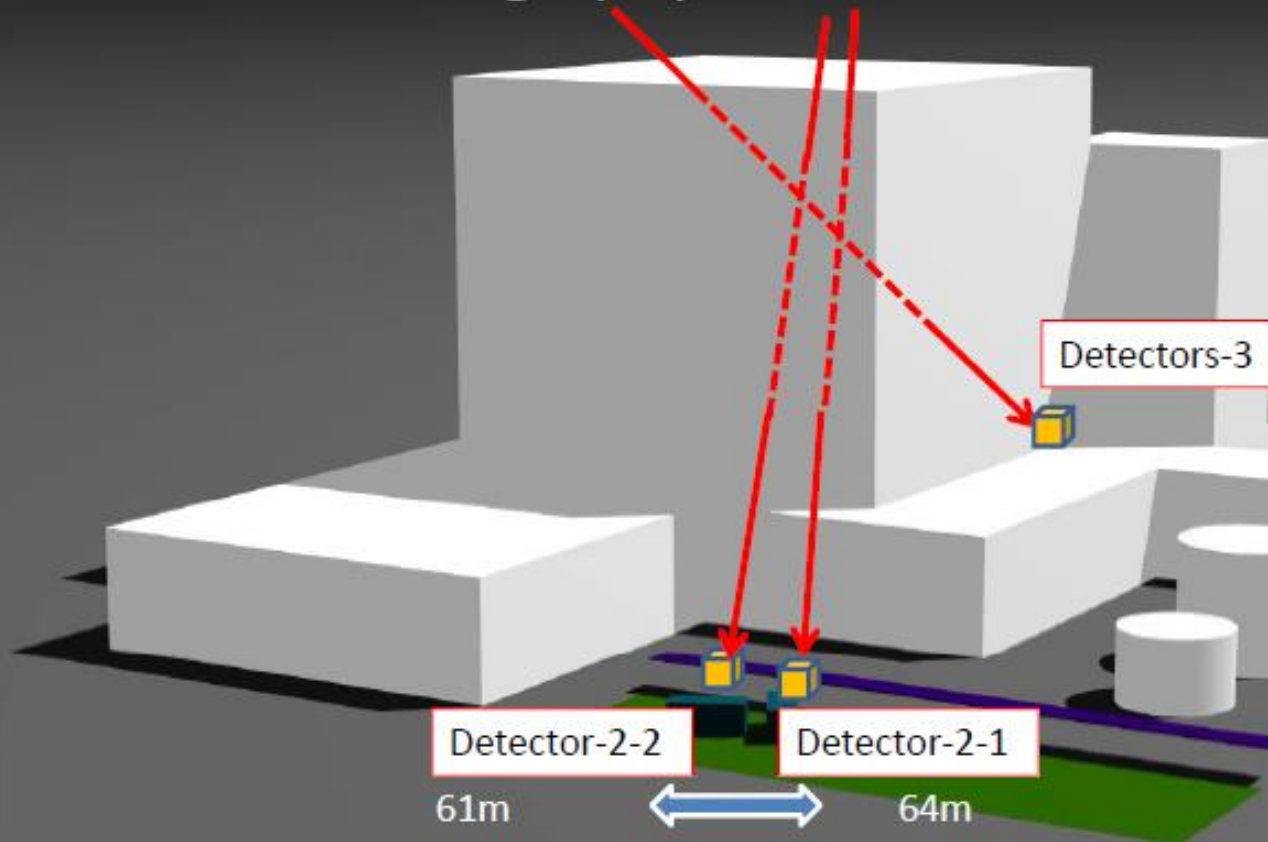
- Landau level peaks of bilayer graphene are observed in STS at the atomically flat area of nitrogen doped HOPG at $B = 0\text{ T}$.
- Domain model can explain the LL appearance. (difference in the on-site potential)



宇宙線を用いた大規模構造のイメージング

3 光量子計測器開発推進発足会議 2015.11.30

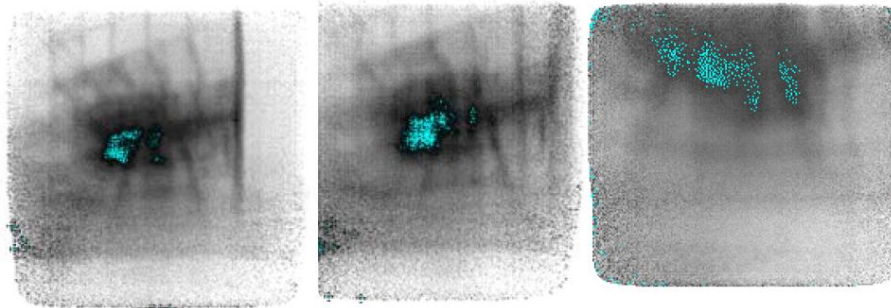
Muon Radiography



宇宙線ミュオン粒子はほぼ決まったエネルギー分布・角度分布で一様に降り注ぐ
 ミュオン粒子は高い透過性(1GeV/cでFe 0.7mがレンジ)
 ⇒より低運動量、より高物質質量により、背後での測定できるミュオン粒子数が減少

宇宙線を用いた原電東海の原子炉プール内燃料のイメージング

Area with large absorption (Period 2)



Point-1
(173days,1524kEv)

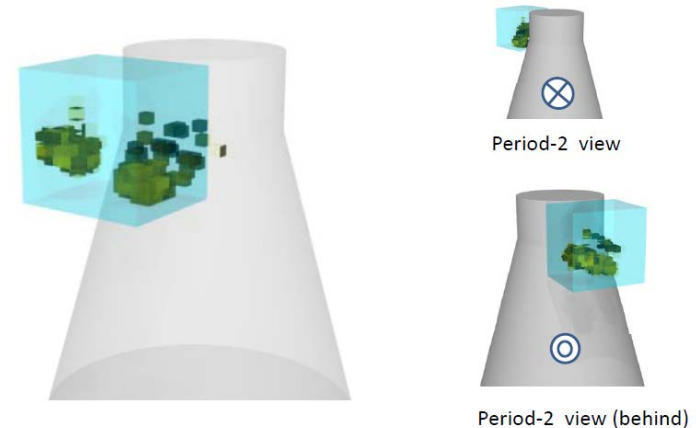
Point-2
(94days,722kEv)

Point-3
(208days,816kEv)

Points with larger absorption, $-\ln(\text{Nobs}/\text{Nexp}) > 1.35, 1.4, 1.9$, distribute inside the fuel storage pool

Mesh the pool at $(1\text{m})^3$ and color the mesh if two of the three say "heavy"

Distributions of heavy objects



Reconstructed distribution of heavy objects

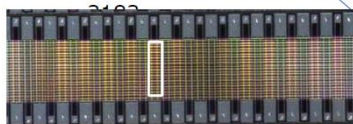
19 光量子計測器開発推進充足会議 2015.11.30
今後の発展

社会インフラの透視



LHCb MPPC array

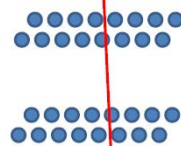
Hamamatsu S10943-3102



Sensitive area: 0.23mm x 1.5mm (96pixels)

橋梁点検車(目視、ハンマー、クラックゲージ)

宇宙線ミュオン粒子を使う



シンチファイバー~1mm径
(CDF SciFiで開発済み)
詳細な要求は要検討

XY読出しの最適化が必要



20 光量子計測器開発推進充足会議 2015.11.30

まとめと展望

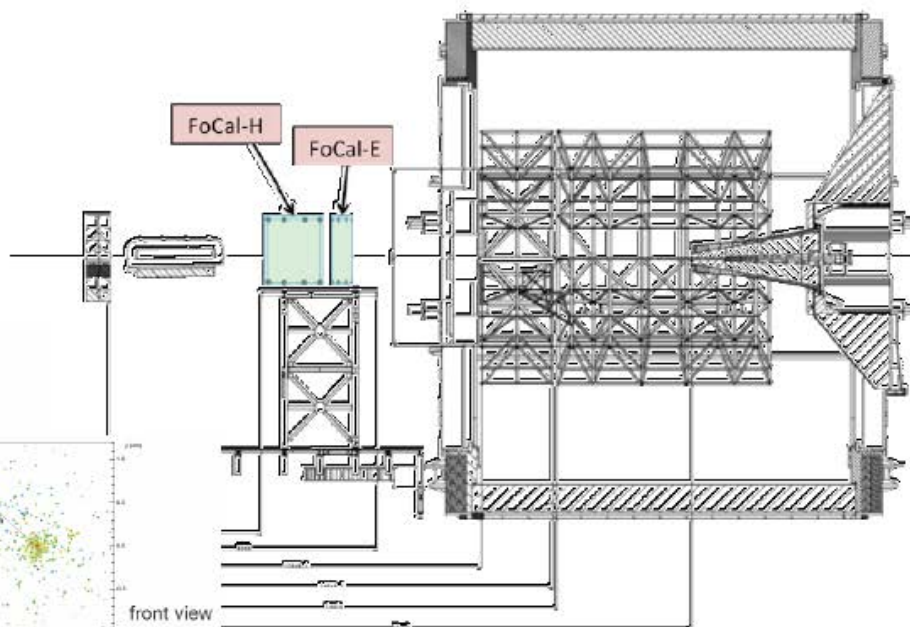
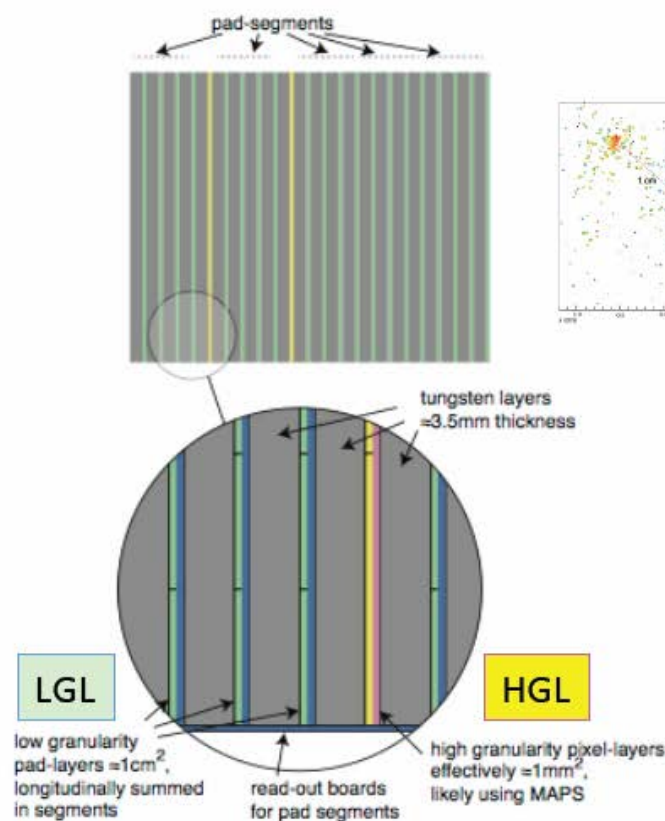
宇宙線を用いた大規模構造の透視

- KEK • 測定装置を開発し、原子炉の透視性能を実証
- 福島1号炉での燃料棒の現状を確認(ほぼ溶け落ちている)
- 福島2号炉の観測(検討中)
- 溶け落ちたデブリの観測のために
 - KEK地下からの観測実証
 - 水平ミュオンの頻度と運動量の測定
 - 検出器の小型化による現場への適用

宇宙線を用いた社会インフラの透視

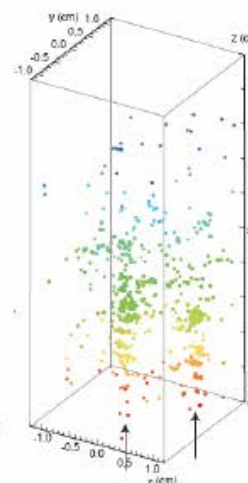
ALICE FoCal upgrade

for forward photon and π^0
W/Si sampling EM-calorimeter
Moliere radius $\sim 9\text{mm}$
Radiation length $\sim 3.5\text{mm}/\text{layer}$



LGL : low granularity layer
1x1 cm² Si-pad
Analog read-out per 4 layers
5 LGL modules

HGL : high granularity layer
25x25 μm^2 CMOS-pixel (MAPS)
digital sum (40x40 pixels)
1x1 mm² effective cell per 1 layer
2 HGL modules



光量子計測器開発推進室の活動計画

2月下旬： 光量子計測器ワークショップを開催

3月： 先端基礎科学と最新産業応用のための
光量子計測器開発の提案作成