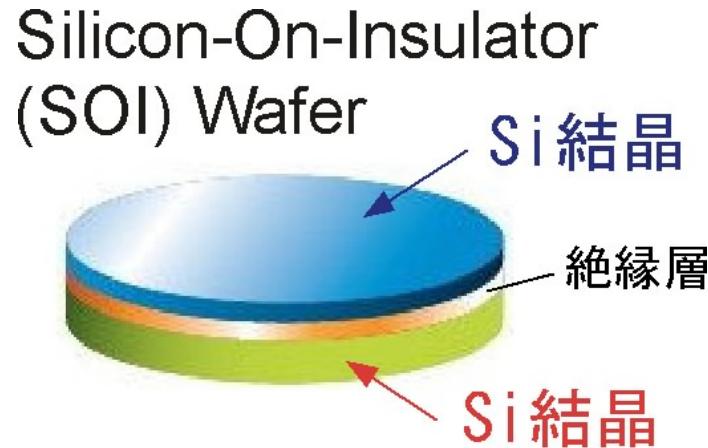


新学術領域(研究領域提案型)ヒアリング

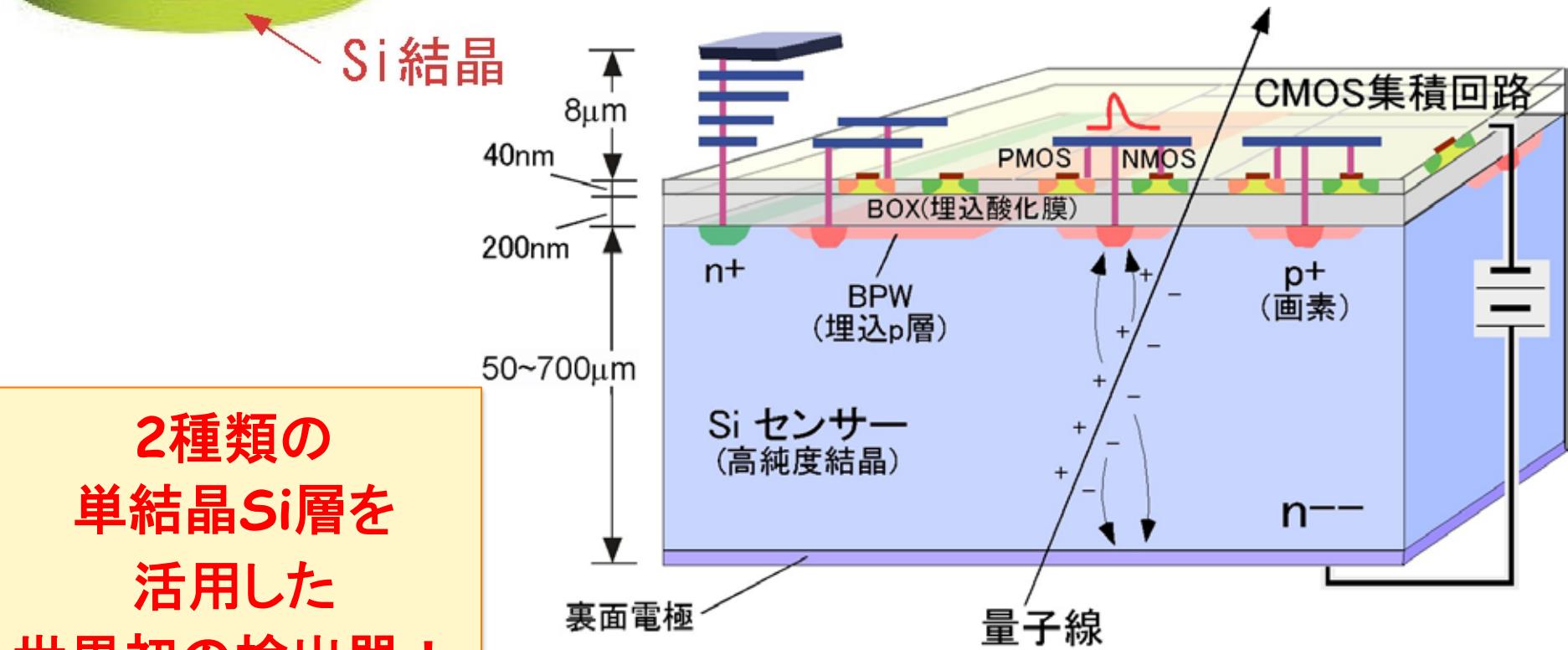
## 3次元半導体検出器で切り拓く 新たな量子イメージングの展開

2013年5月14日  
高エネルギー加速器研究機構  
新井康夫  
[yasuo.arai@kek.jp](mailto:yasuo.arai@kek.jp)  
<http://rd.kek.jp/project/soi/>

# 3次元半導体量子イメージング検出器 (SOIPIX)

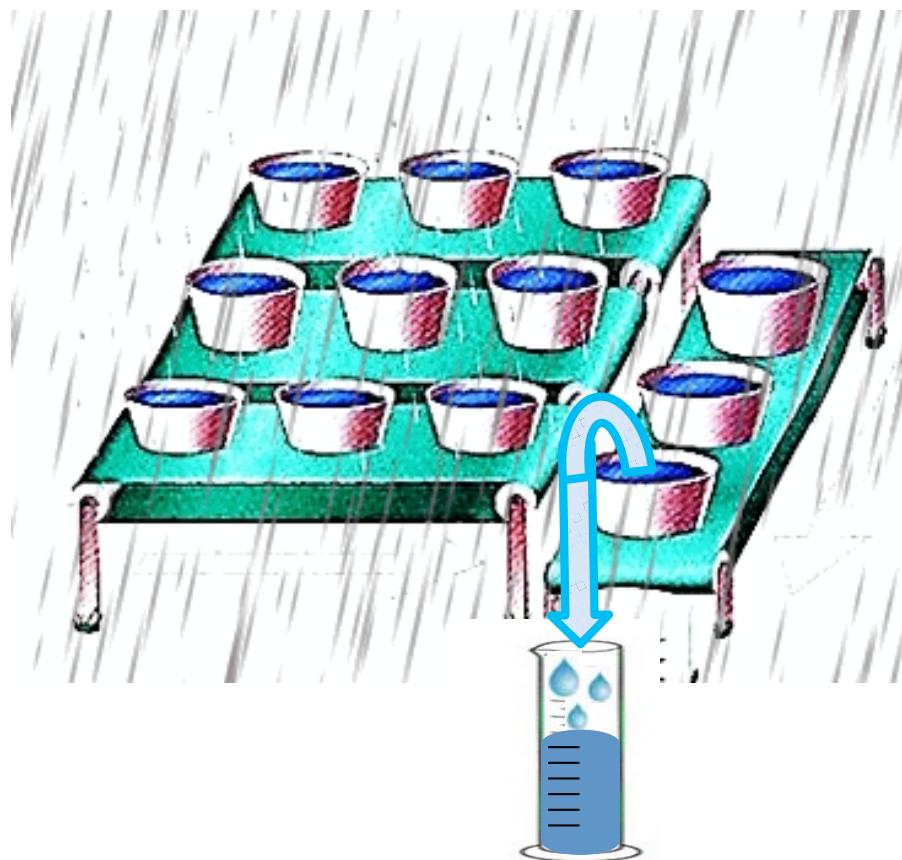


半導体センサの優れた検出能力と、  
集積回路の高機能を併せ持つ、  
3次元構造の量子イメージング検出器。



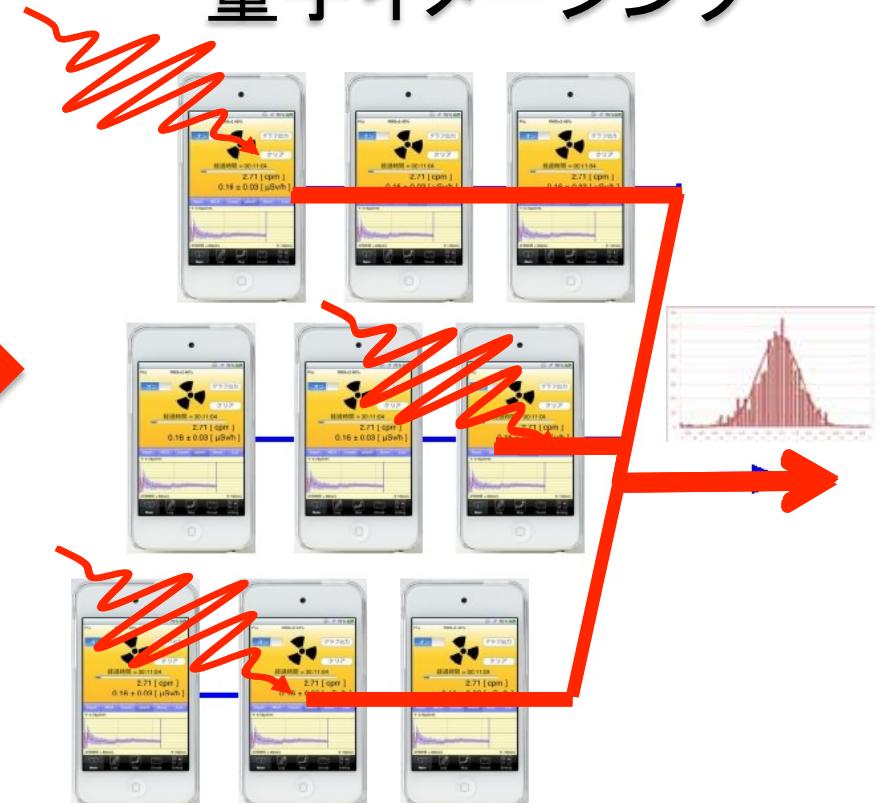
## 検出方法の革新

### 従来の放射線検出器



放射線の量を  
アナログ的に積算。

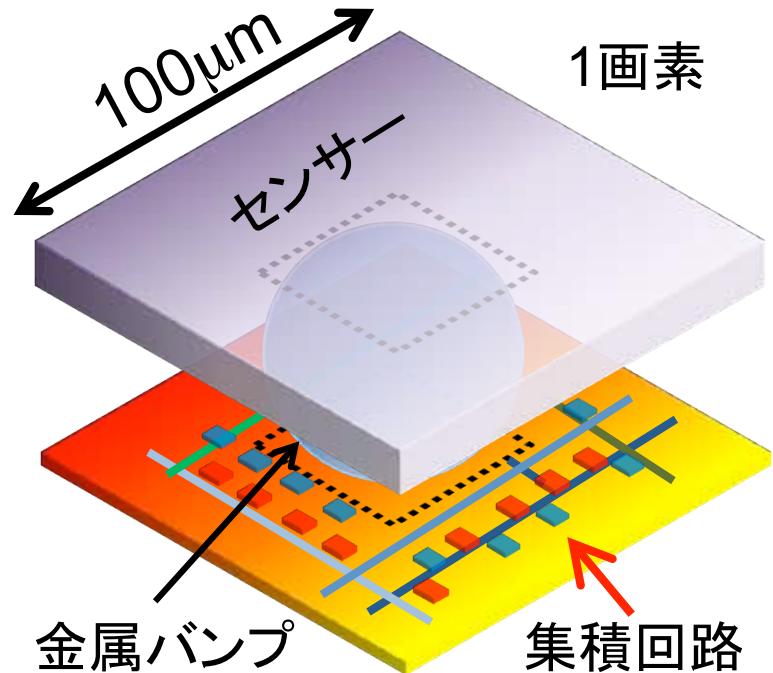
### SOIPIX 量子イメージング



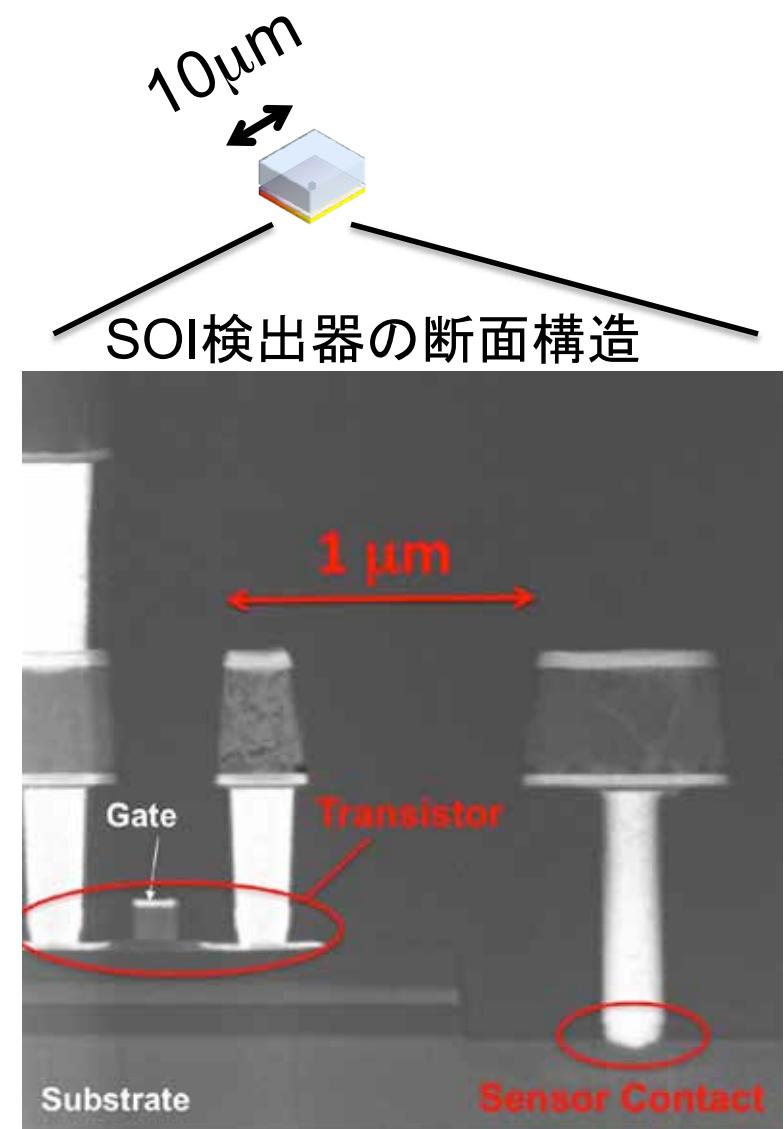
各画素が单一量子を検出  
計測処理を行う。

# スケールの革新

現在の検出器(Hybrid)



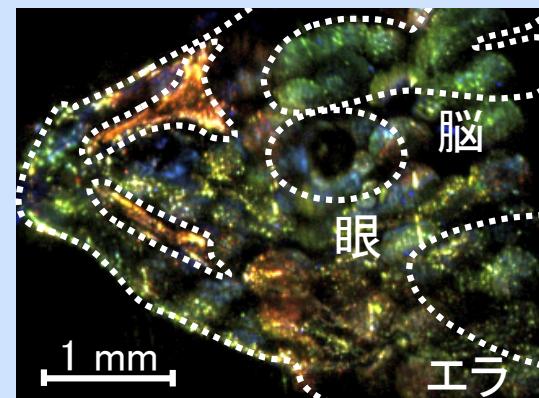
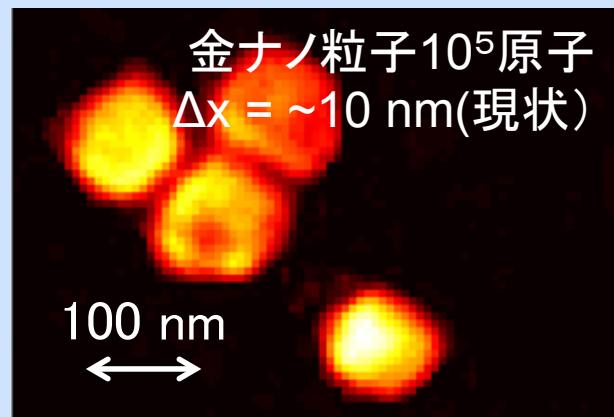
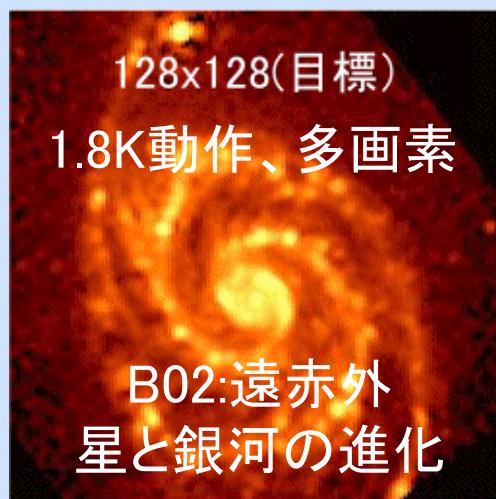
SOI検出器(Monolithic)



画素面積100分の1  
ナノスケールへ！

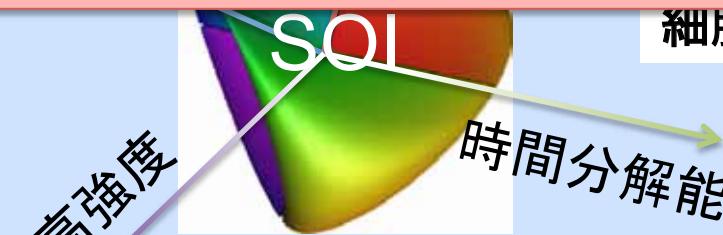
# 広範囲の科学研究に展開し、サイエンスに革新をもたらす

## C01: 素粒子イメージング



D02:  
投影型質量分析  
超速解析  
1日→数分へ

見えなかつたものを  
SOI検出器で見る！



細胞の立体構造



C02: XFEL  
フェムト秒と  
1nmの解像度

B01: 宇宙最初期  
超巨大ブラック  
ホールの探査

## 融合分野形成の歩み

- 2005 SOI Pixel R&D提案@KEK
- 2006 SOI 共同研究スタート  
**第1回相乗りプロセス(MPW)**
- 2007 第2回 MPW (2008以降年2回)
- 2008 SOI研究会@KEK
- 2009 SOI Workshop @京都大学  
SPIE(国際光工学会)誌に掲載
- 2010 物理学会誌に紹介(表紙に)
- 2011 SOI collab. mtg @ FNAL(US)  
JST 先端計測分析技術・手法開発事業(2007~2011)で最高評価(S)
- 2012 SOI collab. mtg @ LBNL (US)  
PIXEL2012国際会議@猪苗代(120名参加, 外国人60名)
- 2013 SOI collab. mtg @ Krakow (Poland)  
SOI Mini workshop@北京  
物理学会シンポジウム「ピクセルセンサー技術で拡がる科学者の視野」

# 融合分野形成の歩み

- 2005 SOI Pixel R&D提案@KEK
- 2006 SOI 共同研究スタート  
第1回相乗りプロセス(MPW)
- 2007 第2回 MPW (2008以降年2回)
- 2008 SOI研究会@KEK
- 2009 SOI Workshop @京都大学  
**SPIE(国際光工学会)誌に掲載**
- 2010 物理学会誌に紹介(表紙に)
- 2011 SOI collab. mtg @ FNAL(US)  
JST 先端計測分析技術・手法開発事業(2007~2011)で最高評価(S)
- 2012 SOI collab. mtg @ LBNL (US)  
PIXEL2012国際会議@猪苗代(120名参加, 外国人60名)
- 2013 SOI collab. mtg @ Krakow (Poland)  
SOI Mini workshop@北京  
物理学会シンポジウム「ピクセルセンサー技術で拡がる科学者の視野」

## Silicon-on-insulator technology enables next-generation radiation image sensors

Yasuo Arai and Toshinobu Miyoshi

The fabrication process can reduce multiple scattering effects and decrease pixel size, paving the way for improved x-ray, charged particle, and neutron detectors.

Combining a radiation sensor and an intelligent large-scale integrated circuit on a monolithic chip has long been desired in many fields, such as nuclear and high-energy physics, astrophysics, medical imaging, and materials science. Such detectors need two kinds of silicon (Si) crystals: a thick, high-purity layer for efficiently detecting radiation and a thin one with many dopants for implementing high-performance devices.

Existing radiation imaging devices are mainly built from two different chips—a sensor and readout electronics—and these two are bonded with bulky metal bumps. Thus, unwanted materials cause multiple scattering, and the bump size limits the pixel size. In addition, high false capacitances limit the readout speed and signal-to-noise ratio.

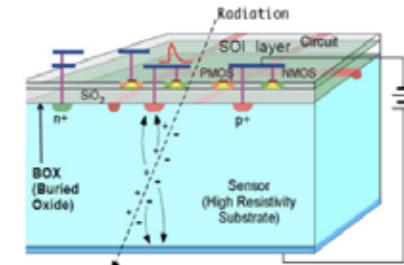


Figure 1. The silicon-on-insulator (SOI) sensor's basic structure. The thickness of the top silicon layer and BOX is ~40nm and 200nm, respectively. The sensor can be thinned from 700μm to tens of microns, depending on the application. SiO<sub>2</sub>: Silicon dioxide. NMOS: N-type metal oxide semiconductor. PMOS: P-type metal oxide semiconductor.

# 融合分野形成の歩み

- 2005 SOI Pixel R&D提案@KEK
- 2006 SOI 共同研究スタート  
第1回相乗りプロセス(MPW)
- 2007 第2回 MPW (2008以降年2回)
- 2008 SOI研究会@KEK
- 2009 SOI Workshop @京都大学  
SPIE(国際光工学会)誌に掲載
- 2010 物理学会誌に掲載(表紙も)  
**JST 先端計測分析技術・手法開発事業(2007~2011)で最高評価(S)**
- 2011 SOI collab. mtg @ FNAL(US)
- 2012 SOI collab. mtg @ LBNL (US)  
PIXEL2012国際会議@猪苗代(120名参加, 外国人60名)
- 2013 SOI collab. mtg @ Krakow (Poland)  
SOI Mini workshop@北京  
物理学会シンポジウム「ピクセルセンサー技術で拡がる科学者の視野」



# 融合分野形成の歩み

2005 SOI Pixel R&D提案@KEK

2006 SOI 共同研究スタート

竹内・中村・木村・大庭・伊藤・山本・佐々木



2011 SOI collab. mtg @ FNAL (US)

JST 先端計測分析技術・手法開発事業(2007~2011)で最高評価(S)

2012 SOI collab. mtg @ LBNL (US)

**PIXEL2012国際会議@猪苗代(120名参加, 外国人60名)**

2013 SOI collab. mtg @ Krakow (Poland)

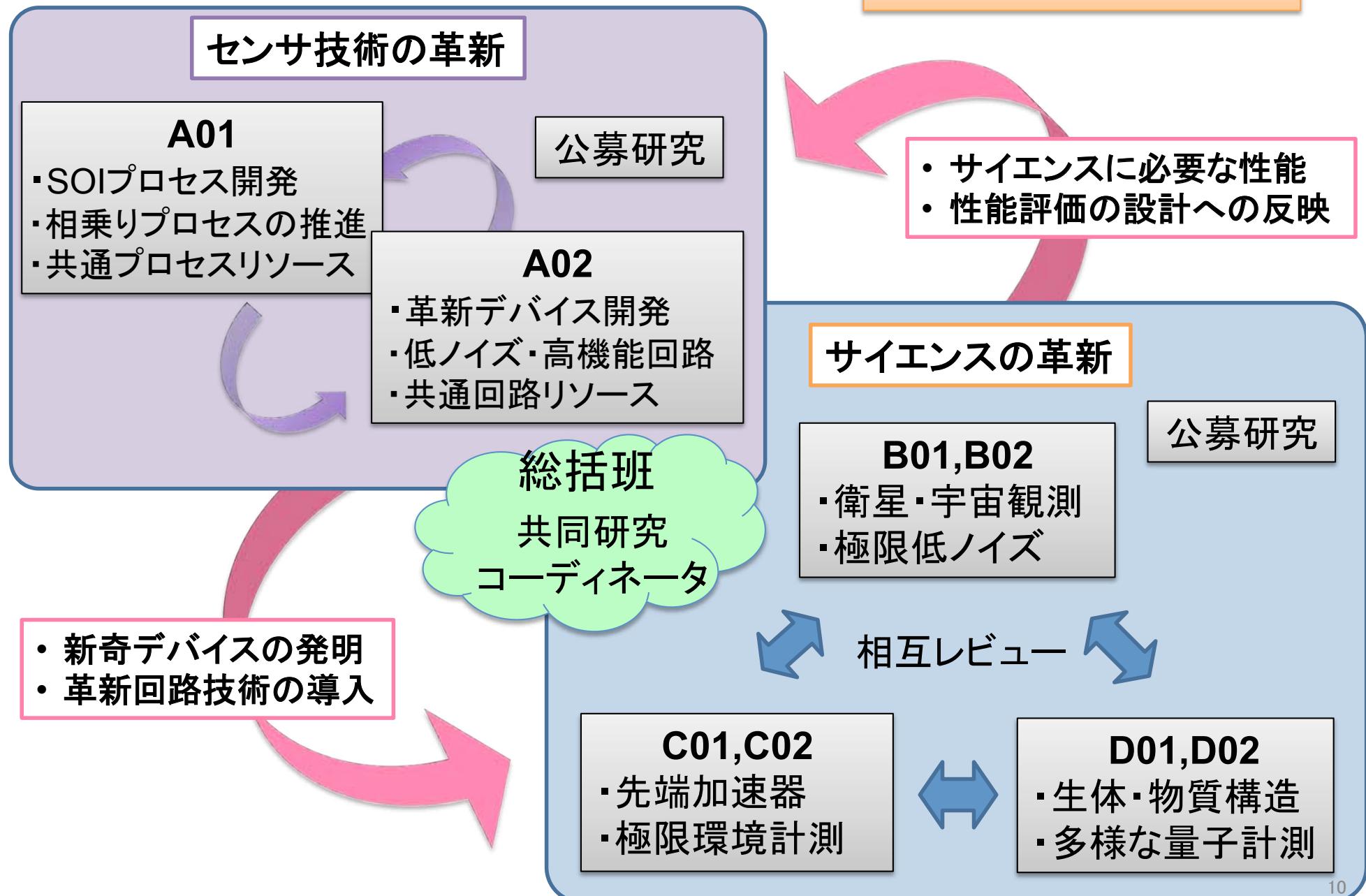
SOI Mini workshop@北京

物理学会シンポジウム「ピクセルセンサー技術で拡がる科学者の視野」

コアメンバーによる新学術の戦略的な研究体制を構築。  
SOI検出器基盤技術の革新とサイエンスへの飛躍的展開を狙う。

# 領域研究の進め方

## 理学・工学の融合



## ベースとなる研究手法: 相乗りプロセス(MPW)

- 多くのユーザがマスクを共有しプロセスを行う。
- 若手研究者、公募研究も容易に参加出来る。
- A01班が中心になってサポート



KEK

JAXA

北大

筑波大

京都大

東大

理研

産総研

東北大

静岡大

大阪大

...



Lawrence Berkeley Lab.  
Fermi Nat'l Accl. Lab.  
U. of Hawaii

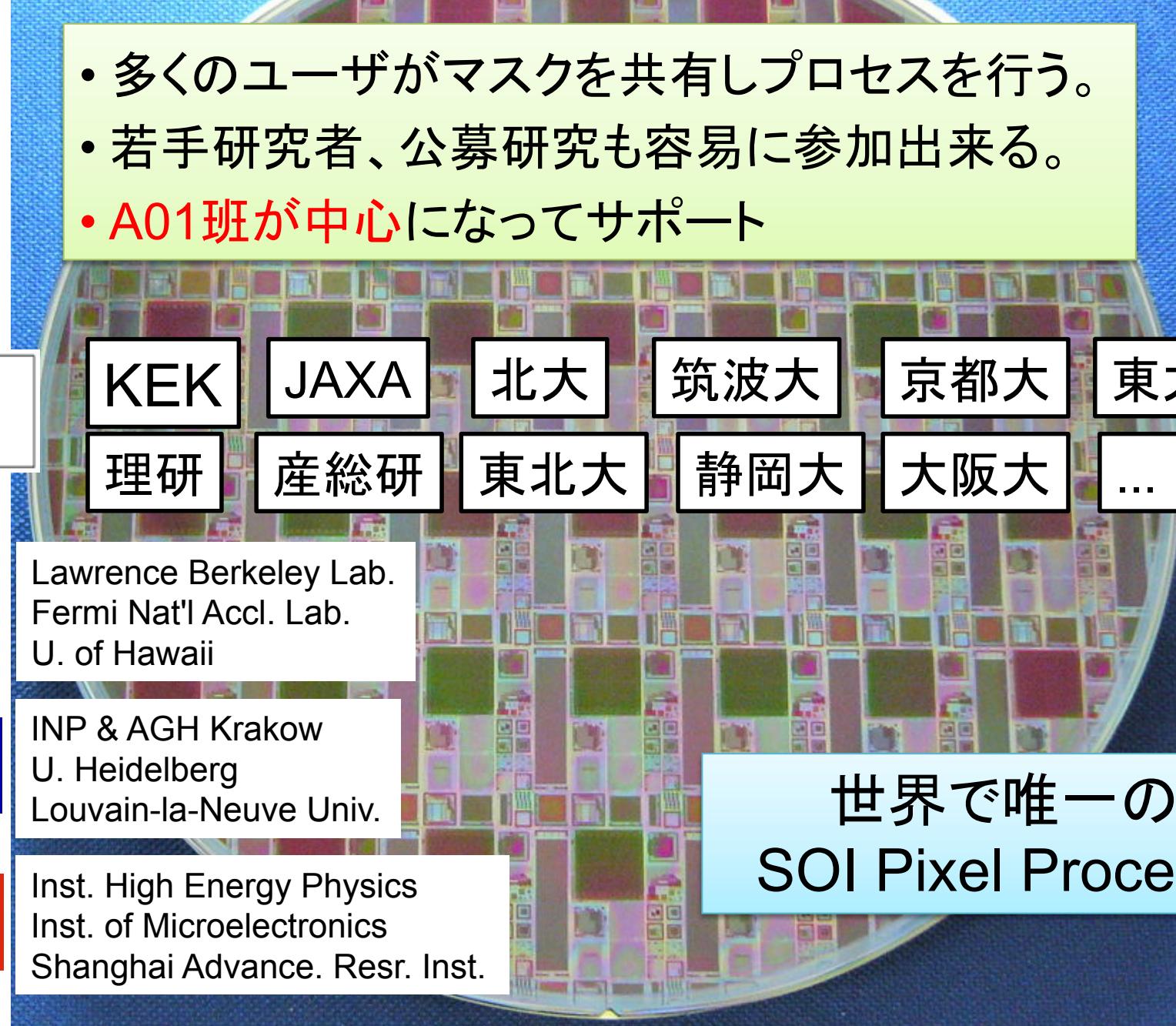


INP & AGH Krakow  
U. Heidelberg  
Louvain-la-Neuve Univ.



Inst. High Energy Physics  
Inst. of Microelectronics  
Shanghai Advance. Resr. Inst.

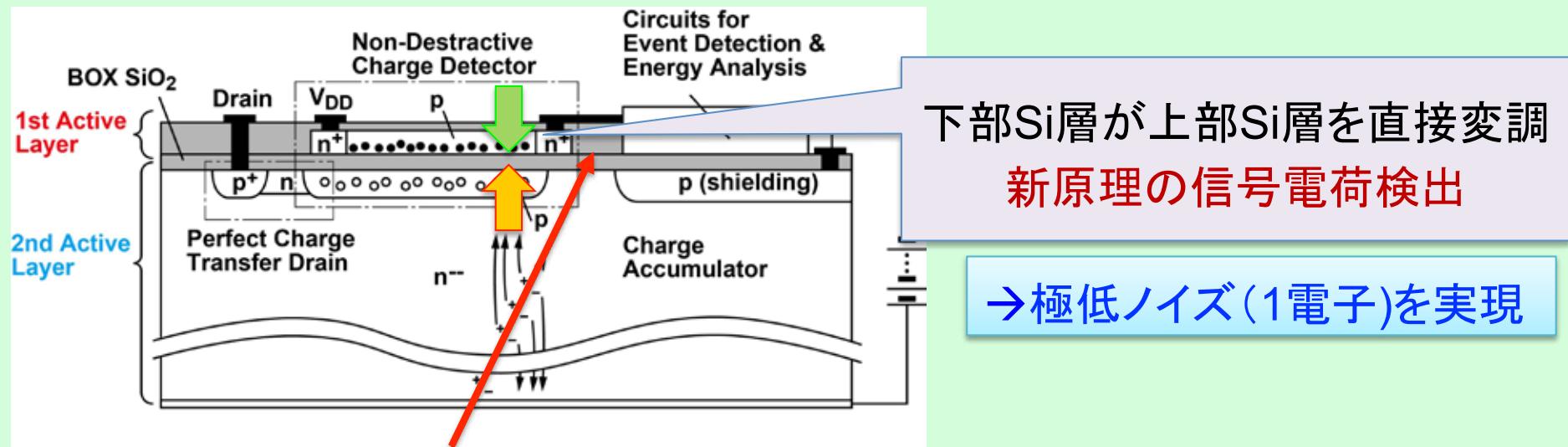
世界で唯一の  
SOI Pixel Process!



A01(プロセス)、A02(デバイス)研究班:  
極低ノイズ・高速イメージングデバイス開発

B, C, D班のサイエンス領域の先端計測性能を  
画期的に高める要素技術を研究

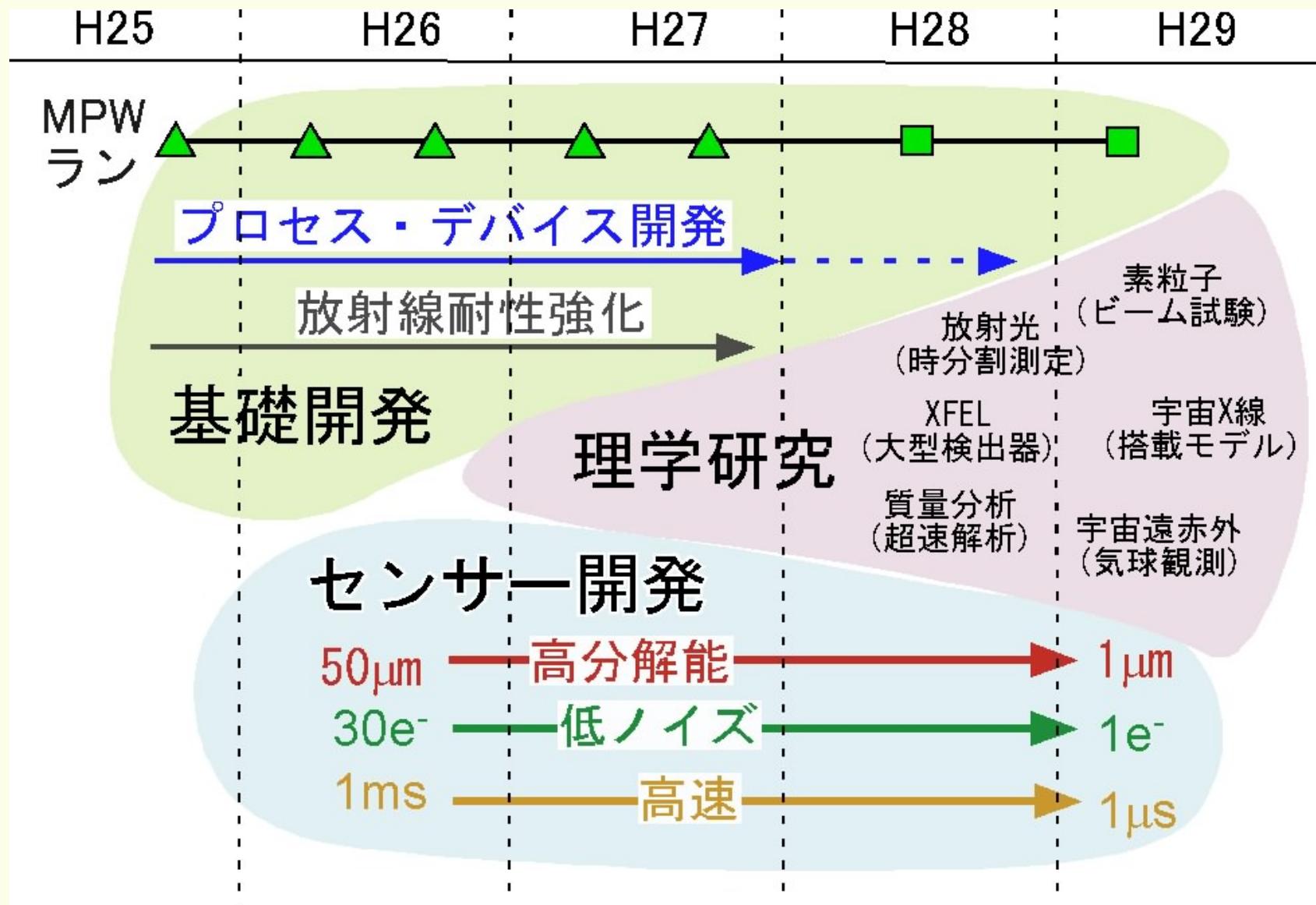
革新デバイス例)



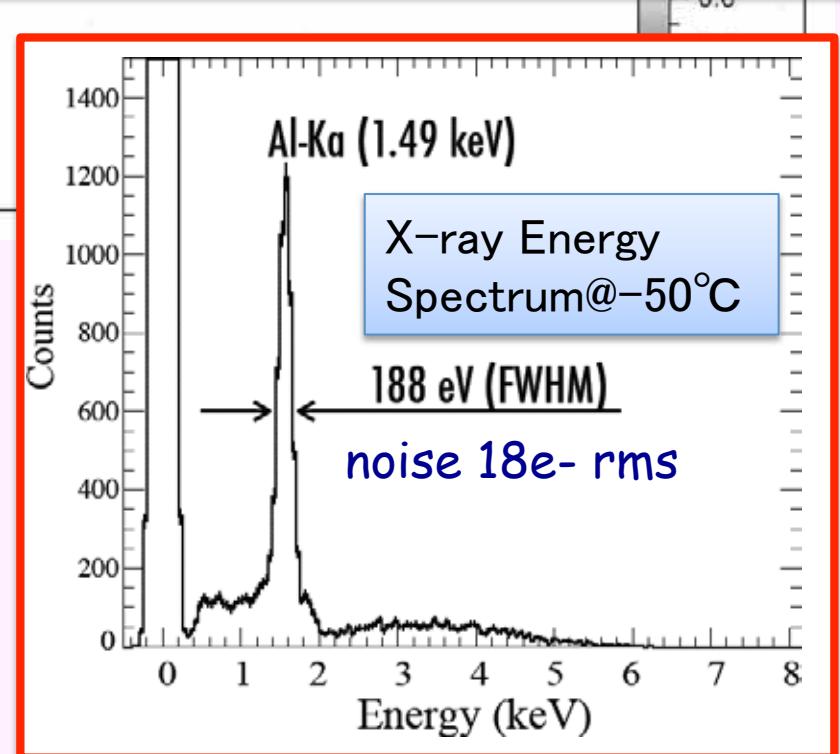
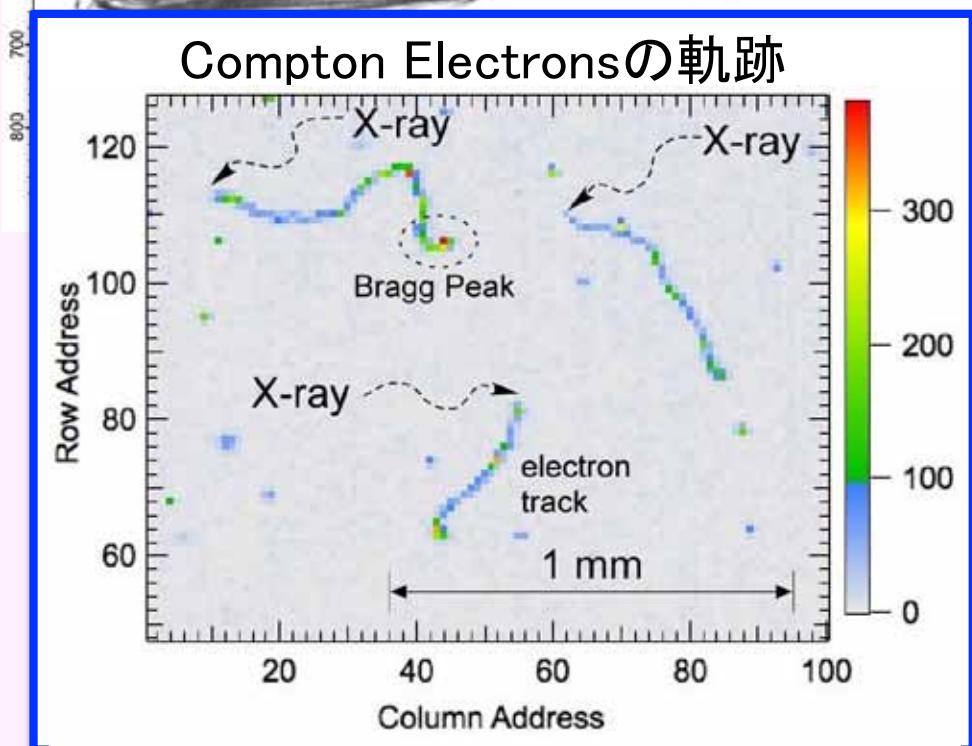
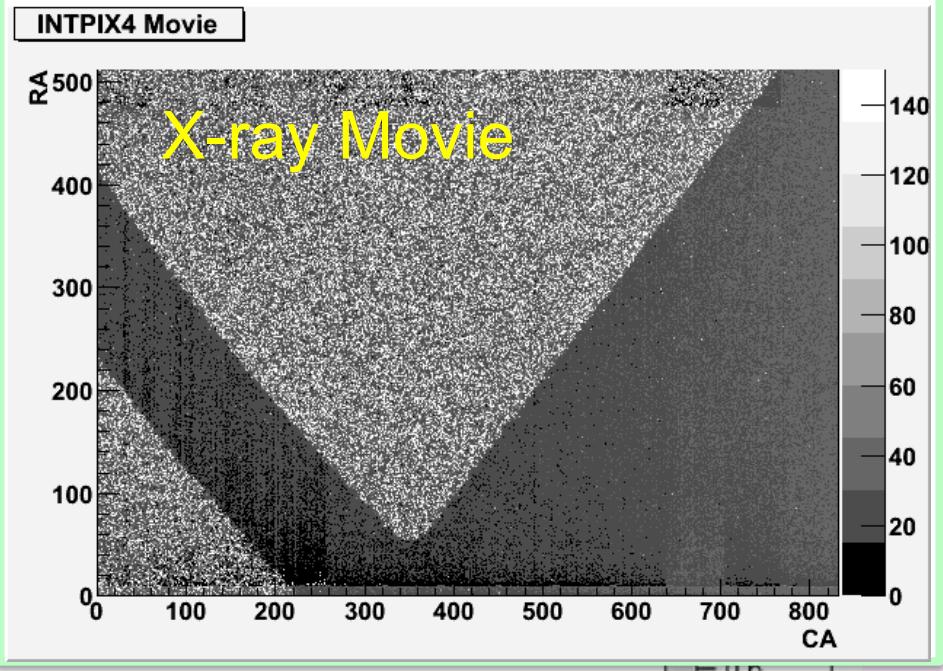
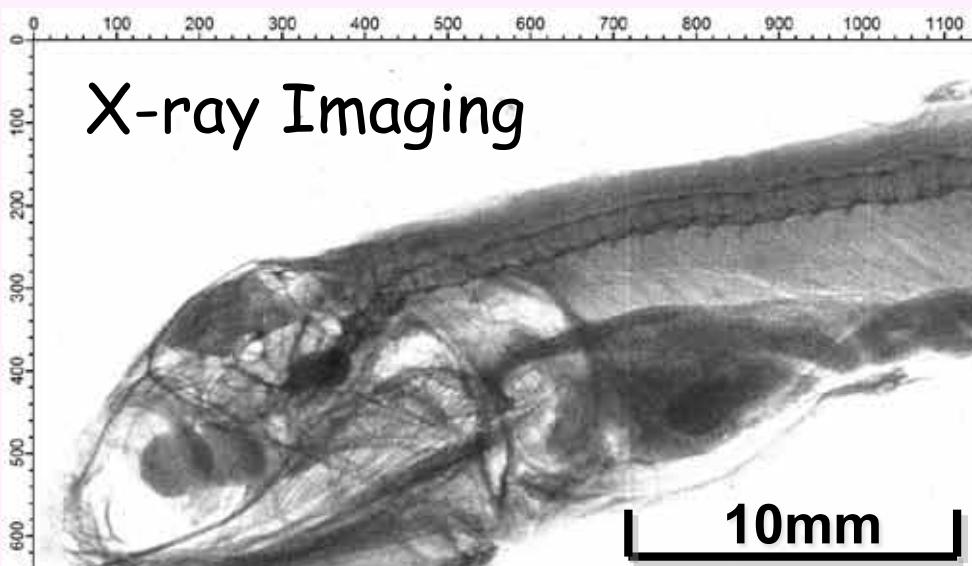
SOIの2重活性層を利用する「イベント駆動 True -CDS技術」  
(特許申請中)

川人祥二: ISSCC (国際固体回路会議, LSIのオリンピック)で、  
過去10年間で撮像デバイス最多論文発表数。

# 年次計画



## これまでのSOIPIXによる測定例



# 最後に

- 3次元半導体検出器技術を基に、理学・工学の融合研究により、新奇検出器の創出と、革新的な計測手法を実現し、新しい量子イメージングの研究領域を創る。
- 量子イメージングを通じて、素核宇宙・物質・生命の幅広い分野においてサイエンスのブレイクスルーを実現し、世界をリードする。
- 検出器・量子イメージング技術の革新を担う人材を分野横断的に育成し、将来の発展につなげる。

# Supplements

## 昨年度評価への対応

SOI技術は我が国発の優れたセンサ技術であるが...、研究領域の設定による相乗効果によってどのような新しい展開が期待出来るのかが明確でない。また...、領域のコアとなる部分を明確にする必要がある。



- ・相互レビュー、共同研究コーディネータ等、一体となって開発する組織補強。
- ・放射線耐性、極低ノイズ測定、等において、各項目を専門とする研究者の活用。



センサー工学研究の第一人者である川人、XFEL検出器開発リーダーの初井等が新たに参画。



### 相乗効果：

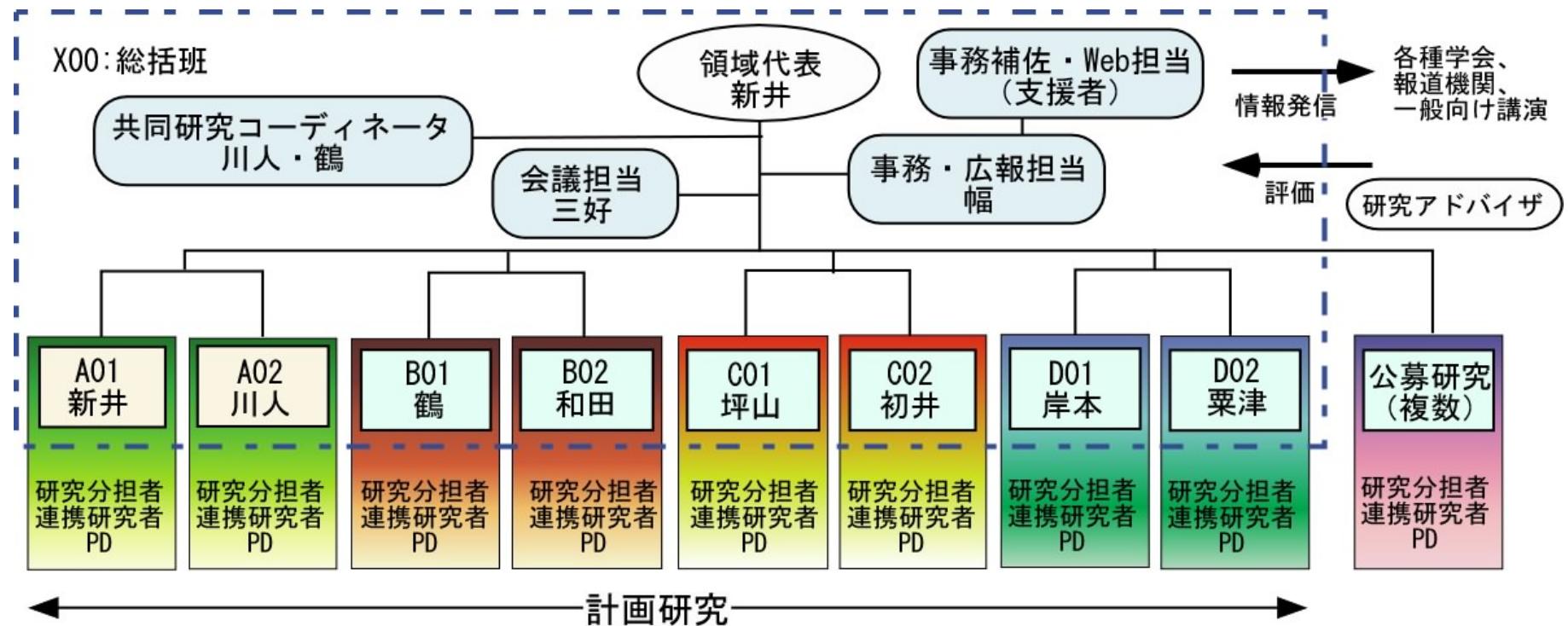
理学・工学の研究者が一体となって研究する事で、新奇デバイス・計測技術の開発が行え、新たな科学的成果の創出へ繋がる。



### 領域のコア：

新奇SOIピクセル検出器によって、量子イメージングという新たな領域研究を立ち上げ、素核・宇宙・物質・生命科学等のサイエンスにおけるブレークスルーを創出する。

## X00: 総括班

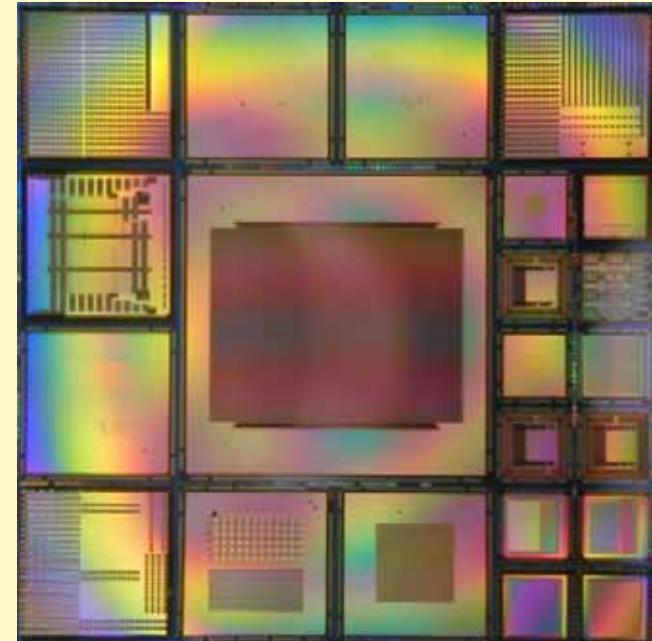


- 2つの技術開発を目標とした研究班
- 6つの科学目標を持った研究班
- 複数の公募研究
- これらを連携させ、新たな研究領域の開拓と人材育成を行う。

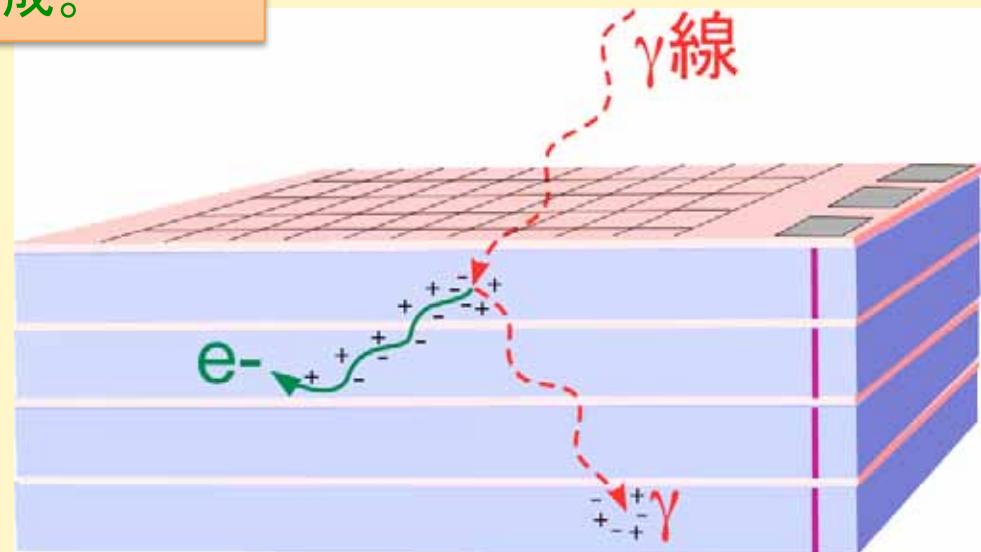
## A01: 3次元ピクセル・プロセス開発

- 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。

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。

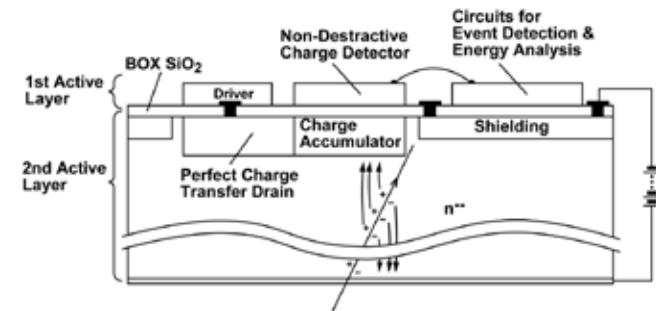


MPWランのマスク



## A02: 極低ノイズ・高速イメージングデバイス開発

- ・検出器性能を画期的に高める革新的デバイスの研究。
- ・低ノイズ、高機能回路の開発。
- ・他研究班の設計サポート。



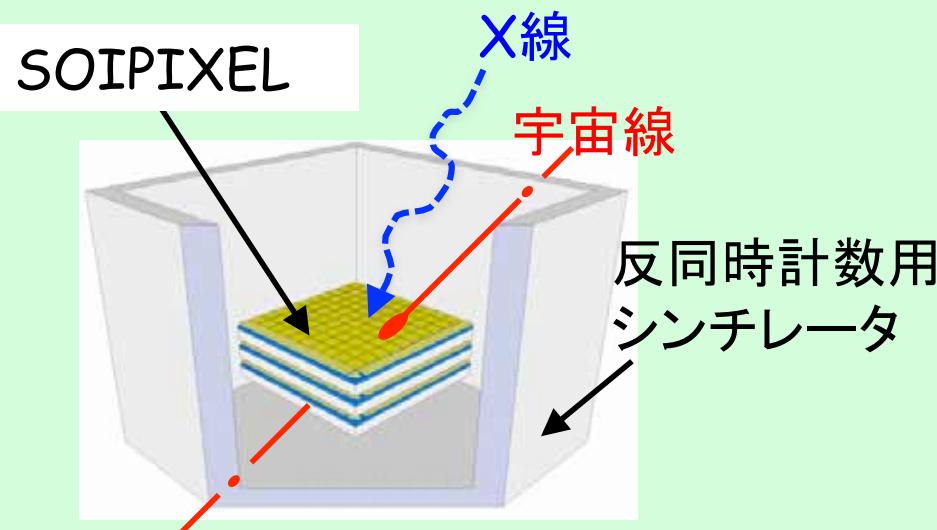
2重活性層を用いたイベント駆動True CDS (ET-CDS)技術

順位	発表数	研究者名	所属機関
1	9	S. Kawahito	静岡大(日)
2	6	E. Charbon	デルフト工科大(蘭)
3	5	A. El Gamal	スタンフォード大(米)

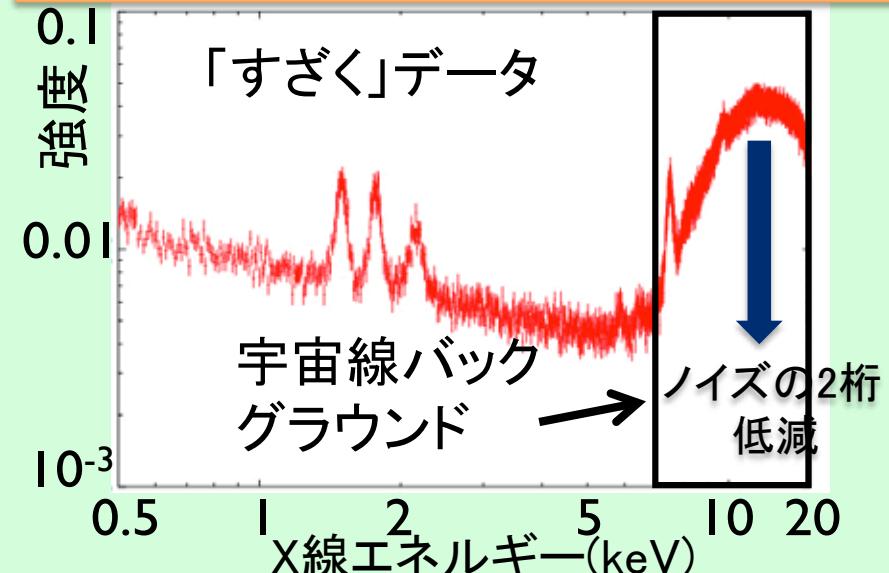
ISSCC (国際固体回路会議, LSIのオリンピック)での過去10年間の撮像デバイス論文と世界的位置づけ

## B01: 宇宙X線：宇宙最初期超巨大ブラックホールの探査・研究

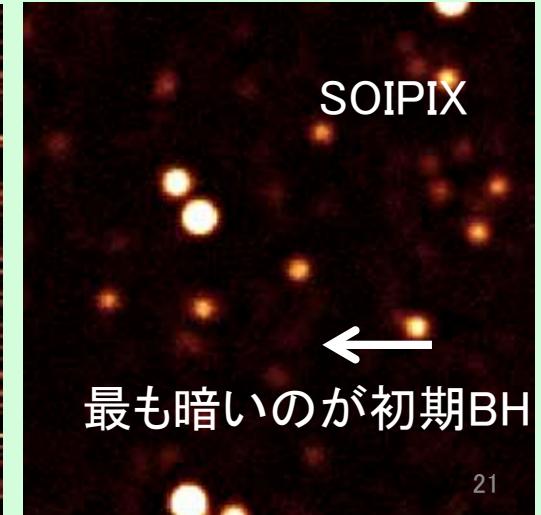
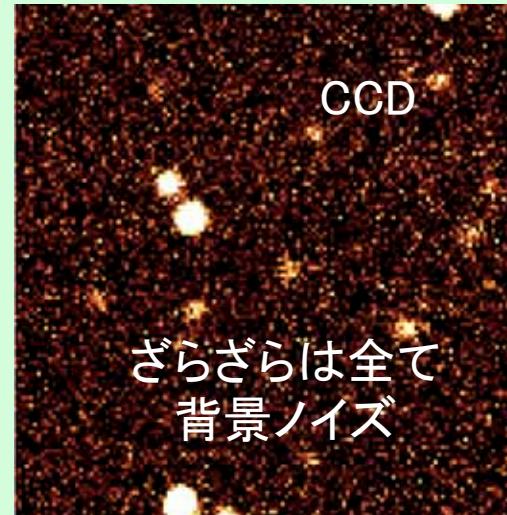
従来の積分形センサーではX線からの信号と荷電粒子(宇宙線)によるノイズを弁別することが不可能。



SOI ではX線の到達時刻がわかる。シンチレータで宇宙線事象を認識しS/Nの圧倒的な向上を図る。



宇宙最初期(最遠方)の超巨大ブラックホールの探査・研究が初めて可能に！



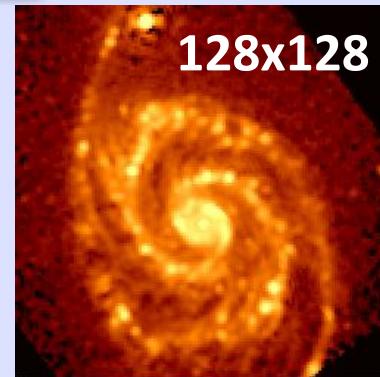
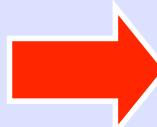
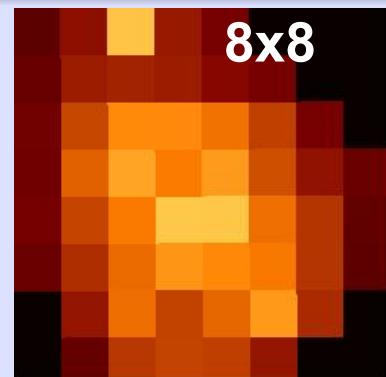
B02:

## 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

- ・「遠赤外線」は最後の未開拓波長領域。
- ・「多画素画像センサー」を開発し、高解像度画像により、ダストに隠された銀河のエネルギー源を明らかにする。

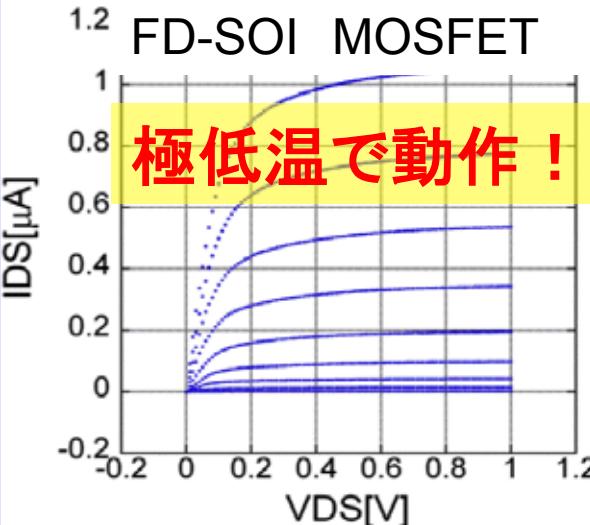
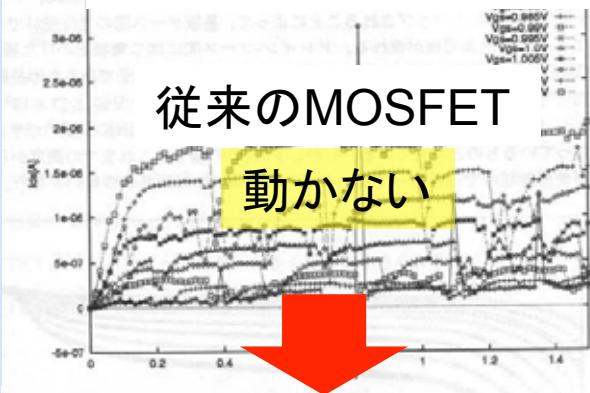
- ・読み出し集積回路の暗電流低減のために  
極低温(<4K)に冷却が必要。  
→SOIは極低温(1.8K)でも動作
  - ・回路の簡素化/発熱低減/多画素化

あかり衛星  
(2006)  
(8x8素子)



多画素化で鮮明な  
像が得られる。

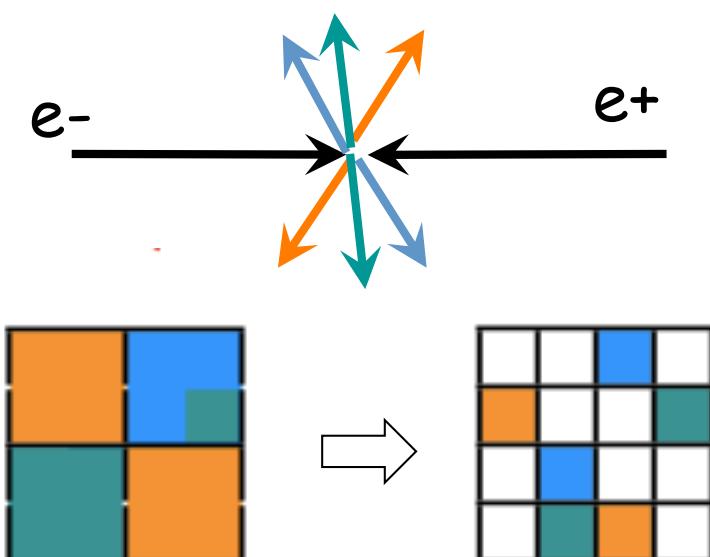
### 電流電圧特性(極低温)



## C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

### SOIピクセル検出器が解明する、素粒子と宇宙が織りなすパズル

- ・ヒッグス粒子の研究を通じて質量起源の解明に迫る！
- ・電子の質量が少しでも違っていたら、今の宇宙は生まれなかつた…



- ・次世代加速器実験(HL-LHC/ILC)では、高精度な荷電粒子飛跡検出器が不可欠
  - ヒッグス粒子識別の要。
  - 素粒子反応事象から、必要な情報を高効率・高精度でとりだす。
  - 低物質量、高機能、高解像度のSOI検出器は次世代ピクセル技術として最有力。

ピクセル微細化による  
粒子識別能力の向上。

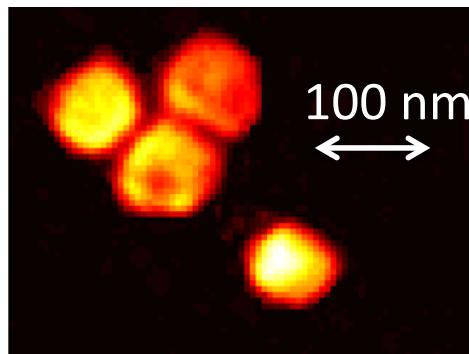
# C02: X線自由電子レーザー(XFEL)による 超高速ナノ構造解析用検出器

フェムト秒からミリ秒の動力学:物質科学・生命科学の機能理解に極めて重要

## 【現状】

XFELのコヒーレント超短X線パルス  
コヒーレントX線回折顕微鏡(CDI)

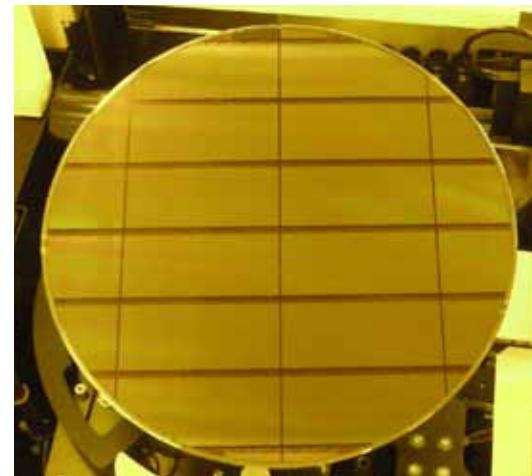
- フェムト秒分解能の構造解析
- 分解能:  $\sim 10 \text{ nm}$
- フェムト秒領域の原子の動きを見るには、超広ダイナミックレンジ検出器が必要。



金ナノ粒子  $10^5$  原子  
 $\Delta x = \sim 10 \text{ nm}$

## 【本研究】

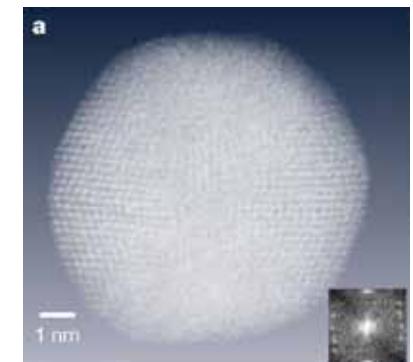
物質科学・生命科学:  
機能の本質に迫るには、1 nm以下  
の分解能が重要。  
1光子～ $10^8$ 光子の計測が必要  
収集電極を複数に、回路を多ゲ  
イン化することで超広ダイナミッ  
クレンジを実現する。



大面積センサー  
(66 mm x 33 mm)

## 【得られる成果】

新しいX線検出器の開発  
分解能1 nm以下  
かつ、フェムト秒分解能の測  
定が可能に



Electron Tomography image by  
J. Miao et.al.,  
Nature 483, 444–447(22 March  
2012)  
静的な状態の観察例  
現状では静的な状態の観測に  
とどまる

# 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

物質構造の空間・時間変化を精密に捕らえるため、  
高精細・高速・高感度の軟X線検出器が必要。

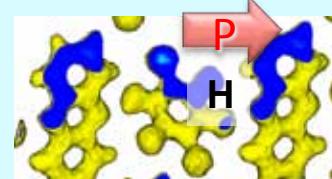
## 先端的機能性物質の研究

SOI高精細・高速  
2次元パルス検出器

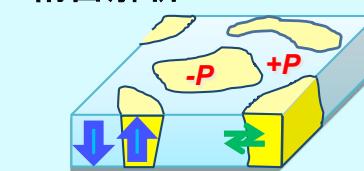
X線

結晶、薄膜

有機強誘電体で発見された  
巨大分極の発現機構を解明



水素原子位置の高精細  
精密解析



電場刺激によるドメイン  
構造の時間応答

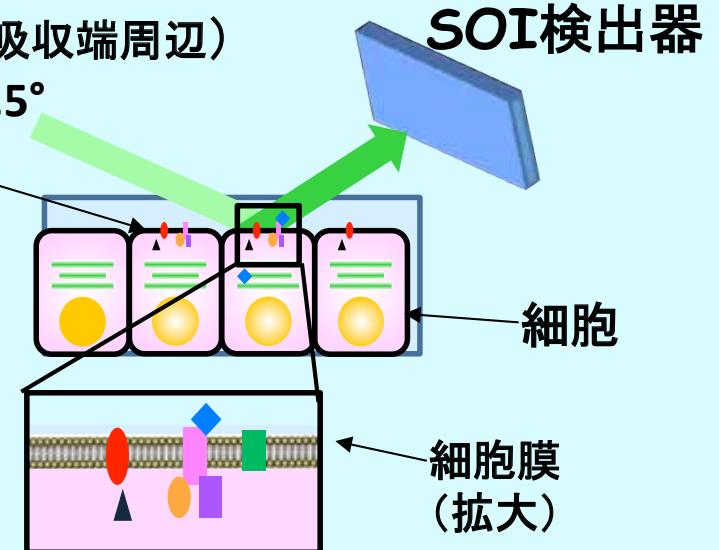
## 細胞膜近傍の構造変化を捉える

軟X線ビーム

(P,S原子の吸収端周辺)

入射角  $\leq 0.5^\circ$

リガンド注入

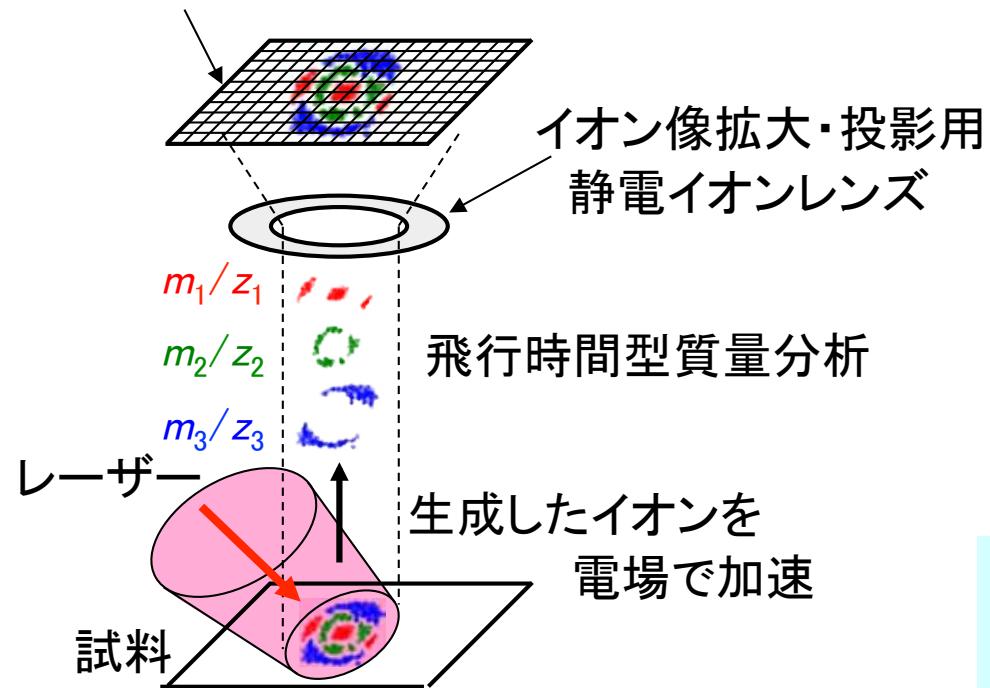


- 個々のX線をパルス検出できる、高精細(30μmピクセル)二次元検出器の開発。
- 1マイクロ秒毎に動的撮影が出来る、高速メモリ内蔵型ピクセル。
- 原子レベル構造解析を実現し、物性の起源を明らかにする

## D02: 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

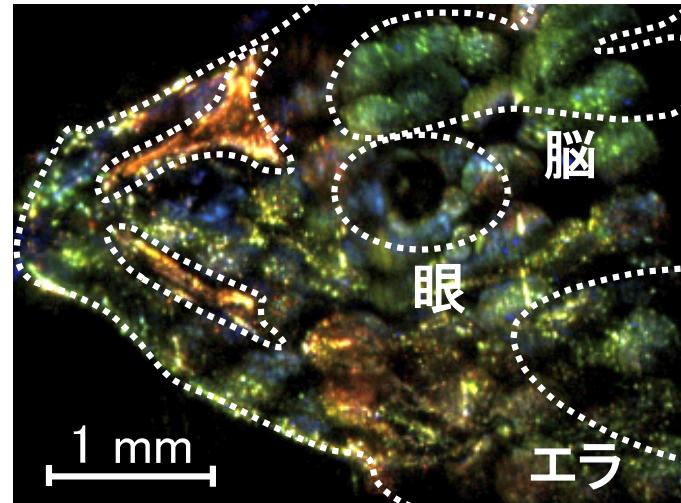
飛行時間と入射位置を  
同時に測定可能なイオン検出器

(現状では1  $\mu$ sに1個のイオンしか検出できない)



全ピクセル同時に時間分解能1 ns動作  
可能なSOIイオン検出器で生体内分子  
の迅速なイメージングが可能に。  
1日かかる測定を数分に短縮！

Csを取り込ませたメダカ頭部の測定結果



青: Cs<sup>+</sup> ( $m/z = 133$ ), 赤: Na<sup>+</sup> ( $m/z = 23$ )  
緑: K<sup>+</sup> ( $m/z = 39$ )

空間分解能1  $\mu$ mの分子イメージングで  
・ 病理研究・病理診断  
・ 放射性物質の体内動態研究  
・ 新薬候補物質の評価  
・ 有機電子デバイスの評価  
などの応用が可能に！