

光センサー・シンチレータ一周辺の 最新状況?レビュー

横山 将志

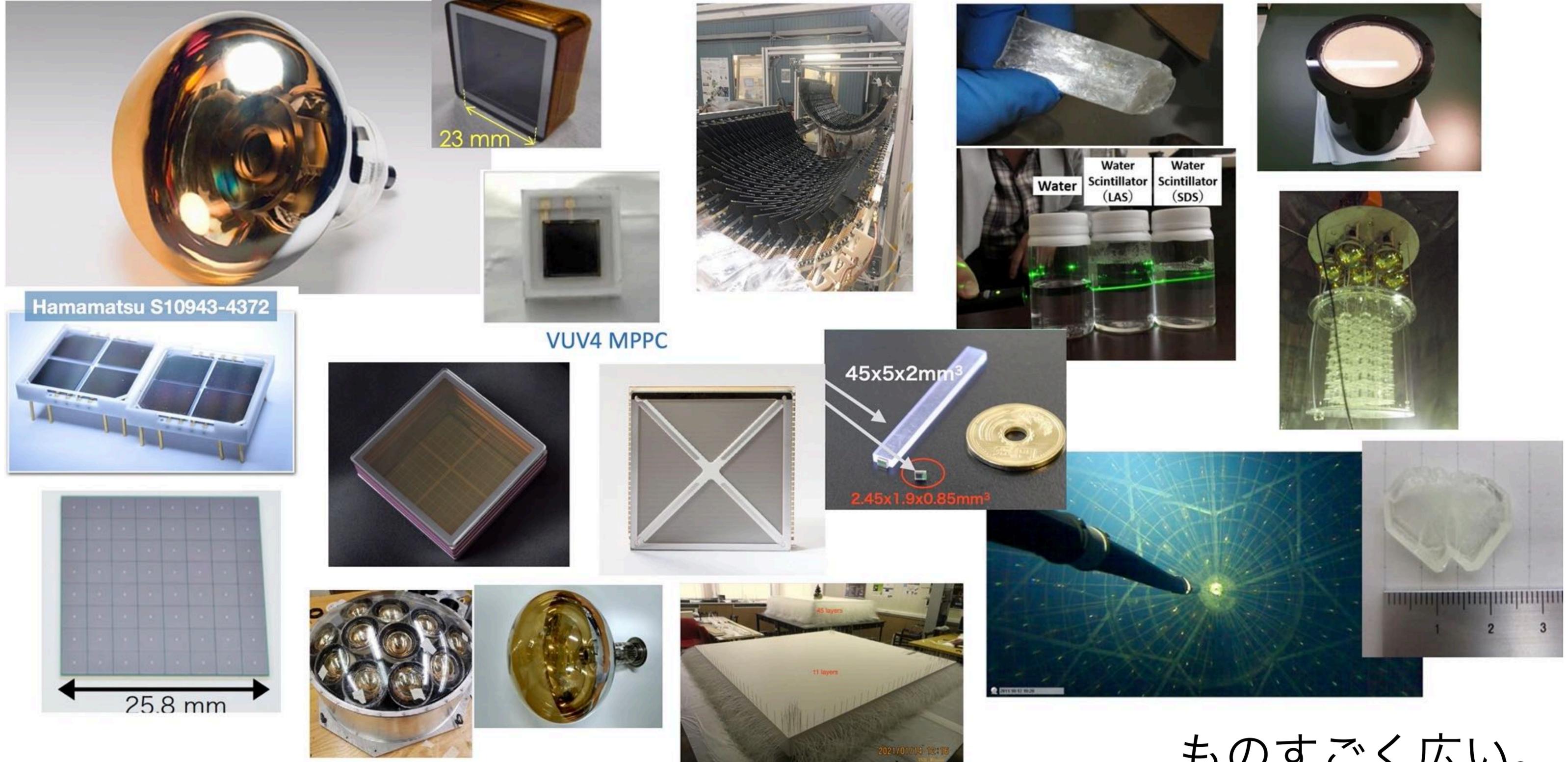
東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻

高エネルギー将来計画委員会：第13回 勉強会

『測定器開発フロンティア勉強会』

2021年8月27日

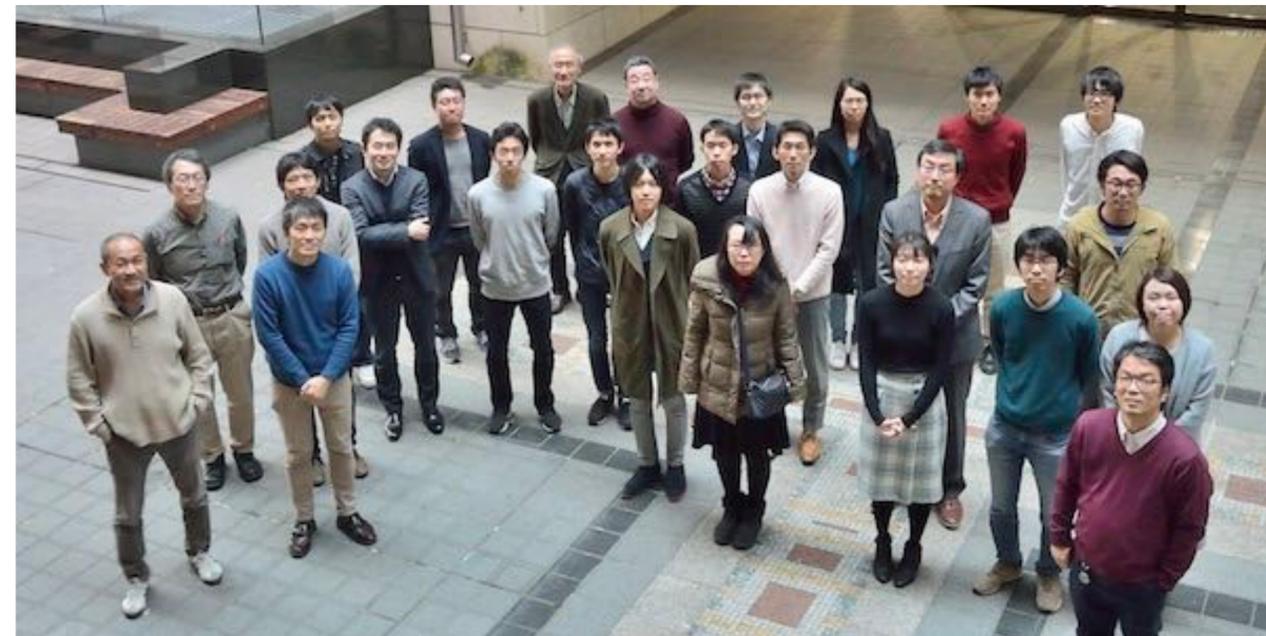
「光センサー・シンチレータ一周辺」



ものすごく広い。

測定器開発プラットフォーム・A班

- 光センサーとシンチレータ
- 世話人：越水（東北大工学研究科），横山
- KEK内部のサポート：西田（KEK）
- 現在 約40名の参加，物性分野・企業からも
- 第1回研究会を2019年末に開催
 - 第2回がコロナ禍で幻になり足踏み
 - 対面での研究会再開を熱望
- 参加，サポート，活動の提案を歓迎します
世話人まで連絡を



第1回研究会の参加者

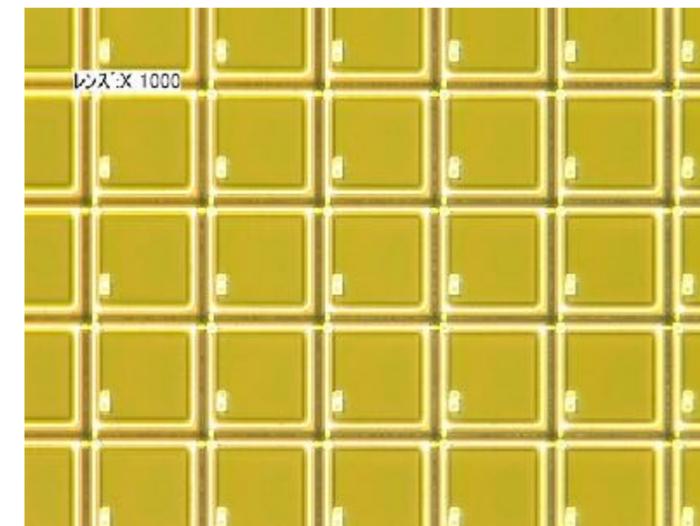


KEK富士実験室B3共用スペース

高エネルギーニュースに記事を書いたのでご覧ください

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)[®]

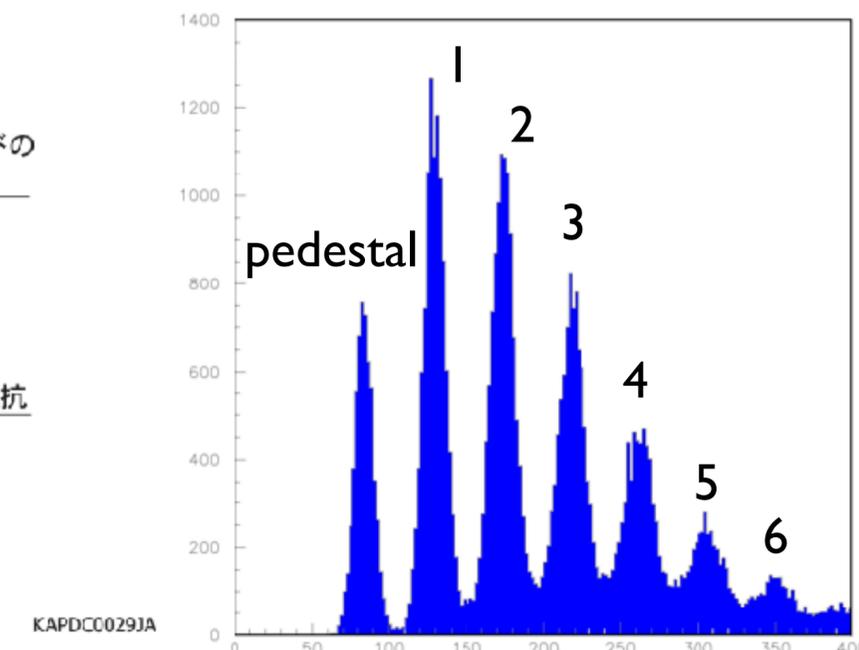
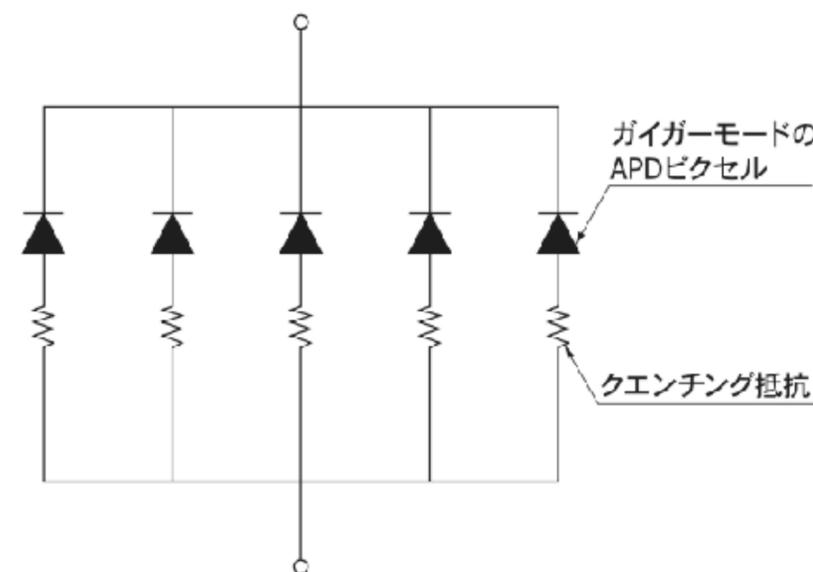
- ガイガーモードで動作するAPDを多数並列につないで、光子を検出したピクセルの数に比例した電荷を出力させる



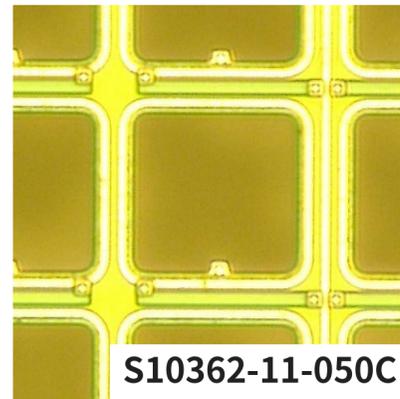
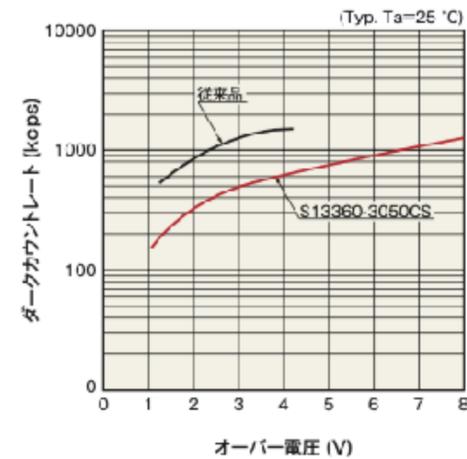
- MPPC：浜松ホトニクス製の製品名
一般的にはSiPM, PPD

- Siじゃなくても可能 (ex. InGaAs MPPC)

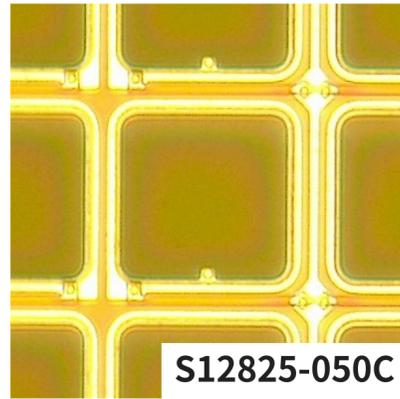
- コンパクト，低電圧で動作，
高光検出効率(PDE)，磁場の影響なし



■ ダークカウントレートーオーバー電圧

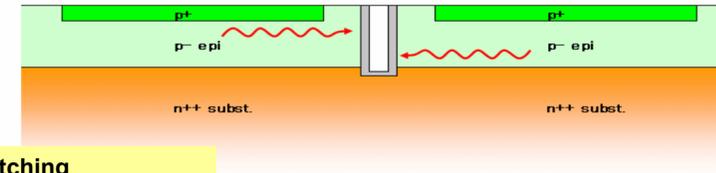


S10362-11-050C

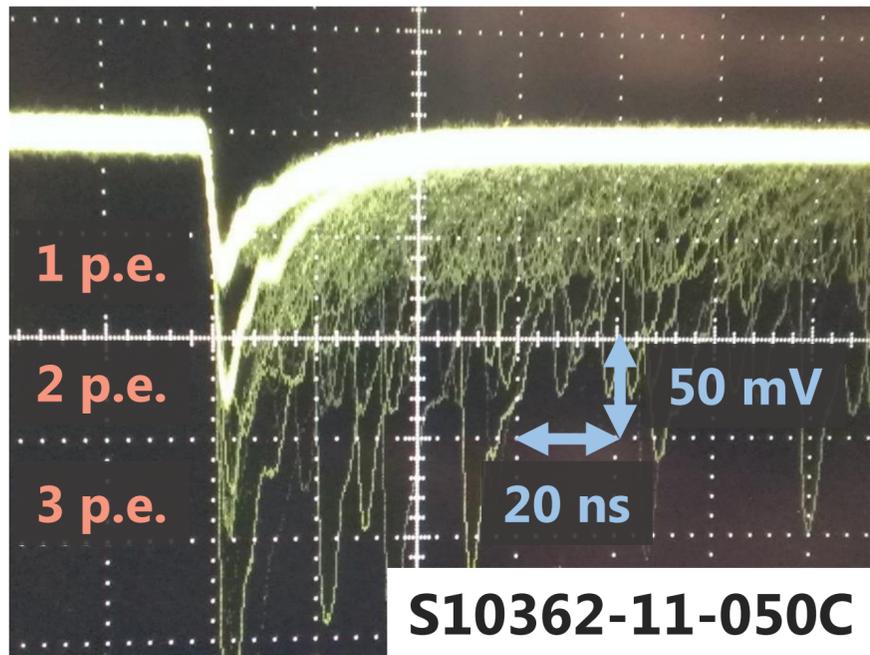
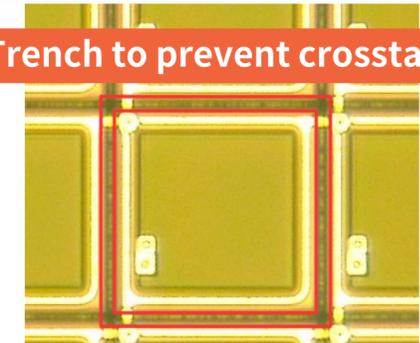


S12825-050C

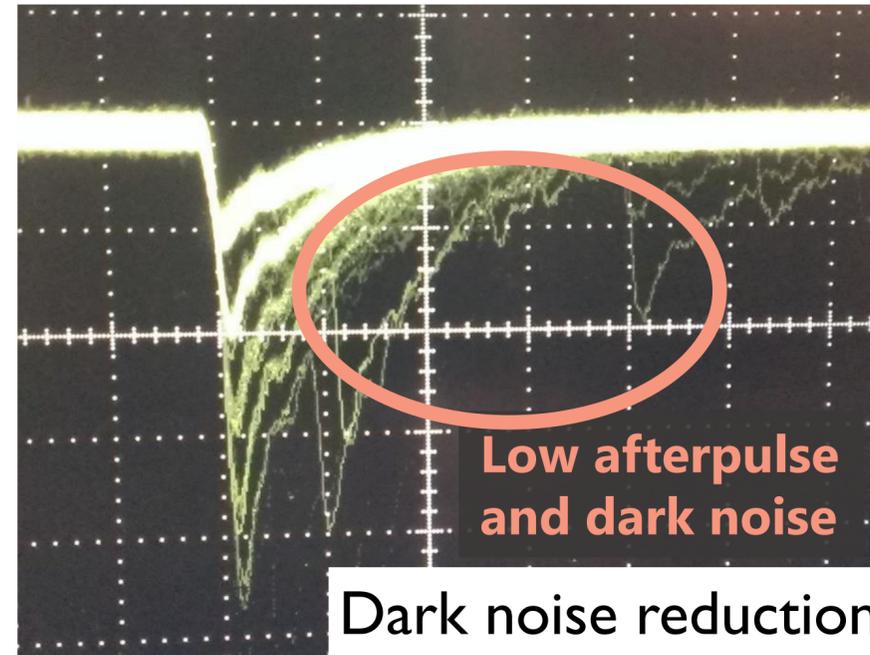
Trench etching



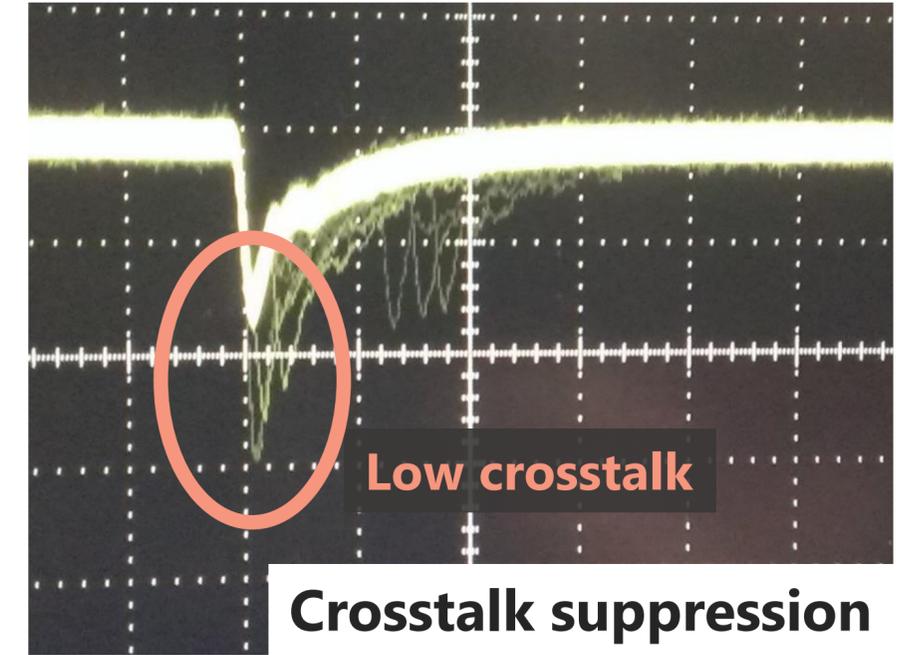
Trench to prevent crosstalk



S10362-11-050C



Dark noise reduction



Crosstalk suppression

2007年

T2K前置検出器で使用
6万個以上

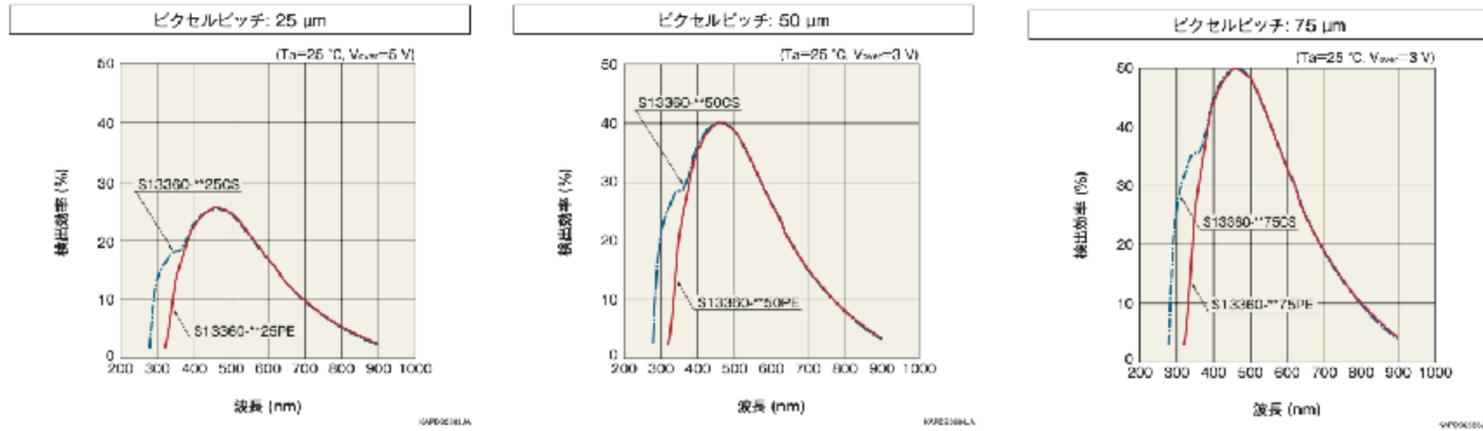
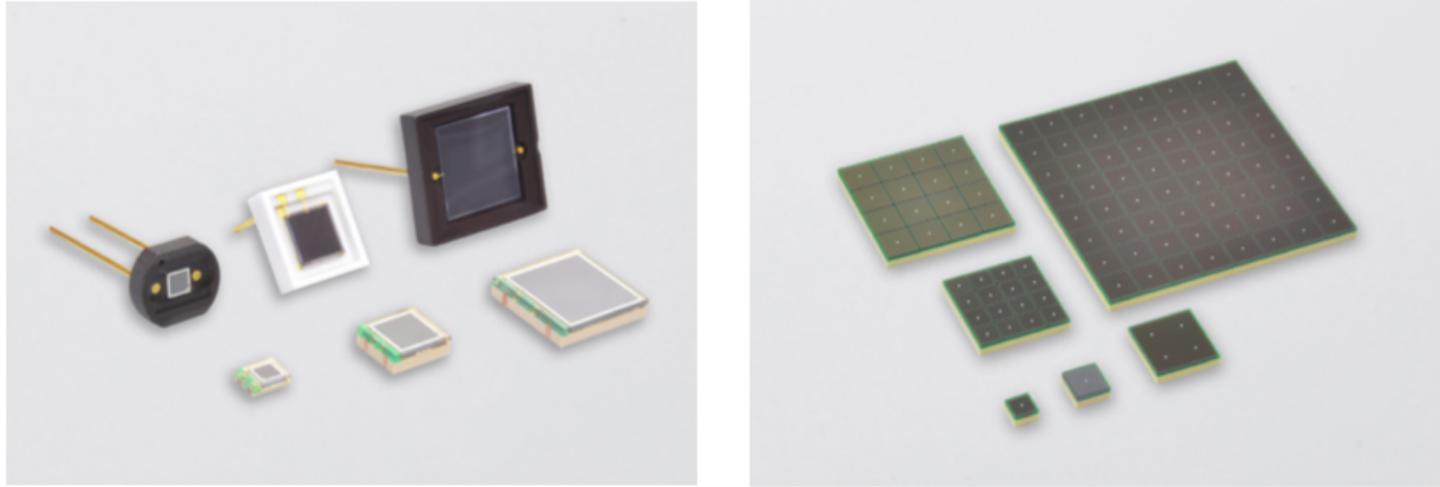
2013年ごろ

ウェハー品質, プロセス技術の改善
ダークノイズ, アフターパルス削減

2014年ごろ～

トレンチ構造の実装
ピクセル間の光学的
クロストーク削減

現行品



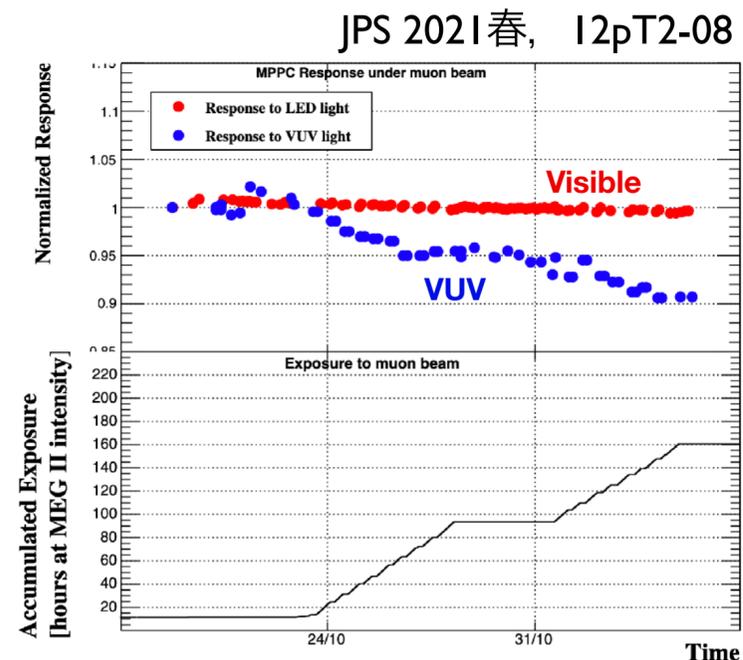
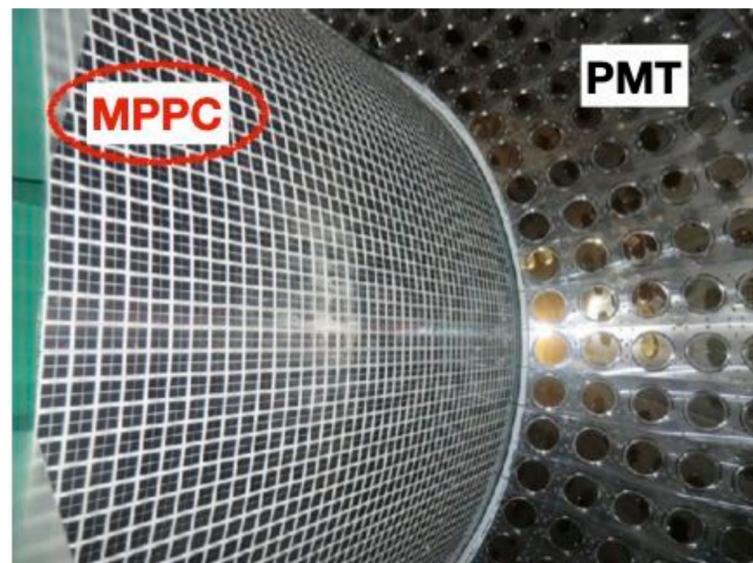
用途	学術研究	計測機器 (フローサイトメータ、 顕微鏡など)	PETスキャナ	LiDAR
計測波長				
VUV/UV	P.29 学術研究用			
VIS	P.8~ 広ダイナミックレンジ S14160シリーズ		P.11 PETスキャナ用 S14160 / S14161 シリーズ	
	P.12~ 精密計測用 S13360 / S13362シリーズ			
	P.18~ 精密計測用 (TSVタイプ) S13615 / S13360 / S13361シリーズ			
VIS~NIR		P.22~ 可視光用 S14420 / S14422 シリーズ		
NIR				P.26~ 近赤外用 S13720シリーズ

ピクセルピッチ ↔ PDE, ダイナミックレンジ
10μm, 15μm / 25μm, 50μm, 75μm

TSV (Through-Silicon Via, 貫通電極)で
不感領域を最小化したタイプも

浜松ホトニクスカタログより

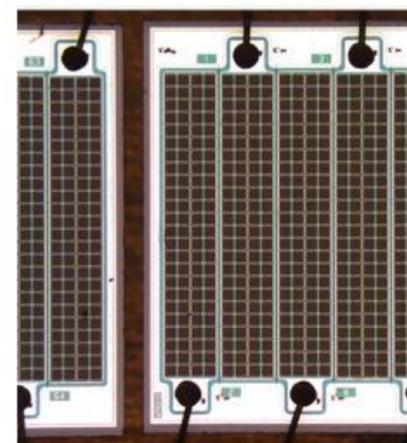
MEG II 液体Xeカロリメータ



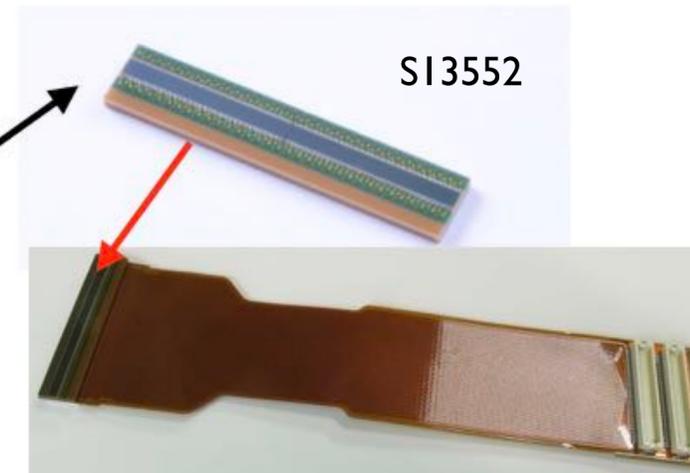
LHCb SciFi tracker

JINST 15 C08006

NSS-MIC 2017



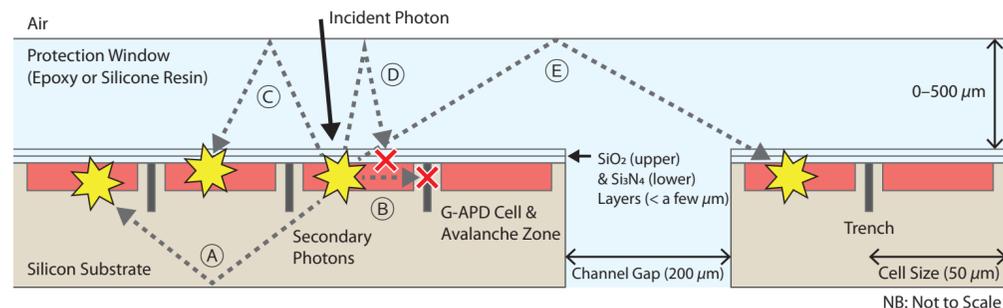
縦長 64×2
4096個使用



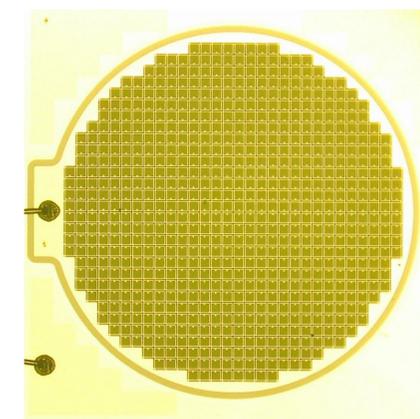
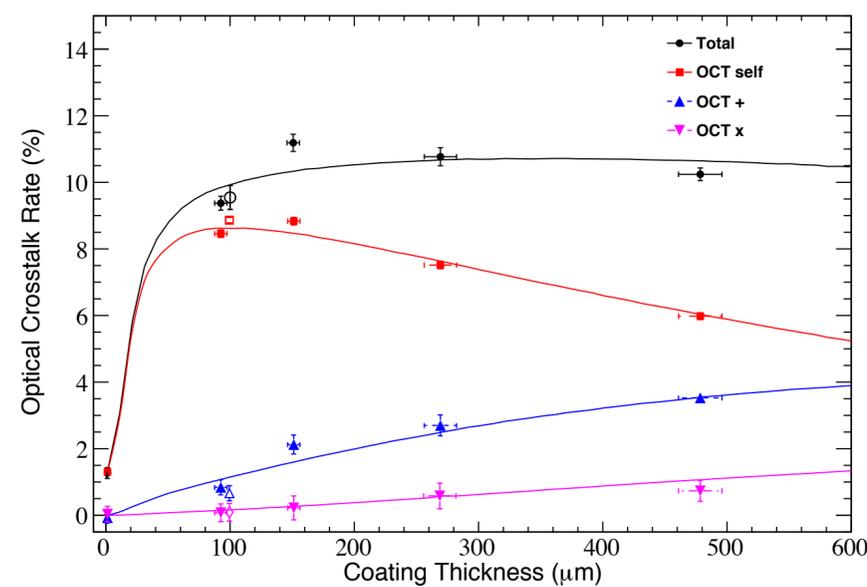
放射線でダークレート増加
-40°Cに冷却+クラスタリング
~10¹²n_{eq}/cm²でも動作可能

CTA SST (optical crosstalk 削減)

PD18, JPS Conf. Proc. 27, 011003 (2019)



表面保護の樹脂の厚みとの関係
樹脂がない場合が最も小さい



WAGASCIで使用

そういえばファイバー読み出し向けに丸型ピクセルも作ったけど、流行りませんでしたね

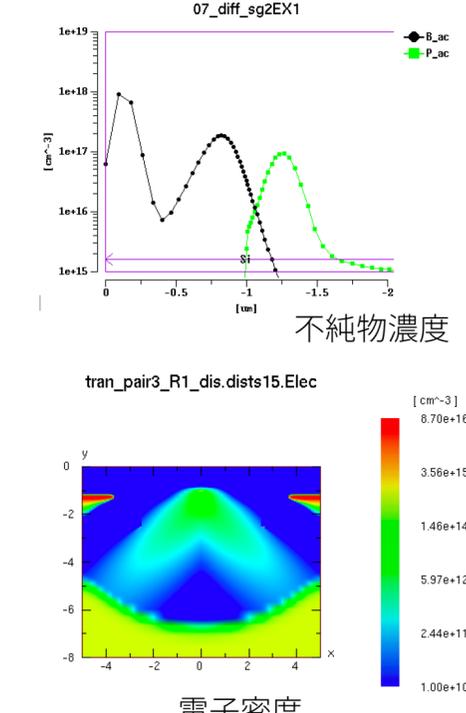
KOTO, Belle II, T2K upgrade, ILD, low BG (DM, 0νββ)...

今後？

- HPKの開発は1段落したフェーズ
- みなさん、満足ですか？
- ユーザーからの厳しい要求・共同開発の提案を待っている模様
- あるいは独自開発も
- 世の中にはもちろん浜松以外にも

TCAD Simulator

- ▶ TCADシミュレータによる開発
 - プロセスシミュレーション
 - ▶ 構造作成、イオン注入などのフロントエンドプロセスを行う
 - デバイスシミュレーション
 - ▶ 内部物理量の可視化、DC解析、過渡解析が可能
 - 半導体物性に基づいた開発が可能
 - プロセスシミュレーションでPPDの構造設計、デバイスシミュレーションで増倍率の計算を行う
- ▶ 3次元TCADのHyENEXSSを使用
 - Kioxia株式会社(旧東芝メモリ株式会社)により開発中
 - 慶応大TCADアカデミック委員会によりライセンス管理されたv8.5Kを学術用途で無償使用可能



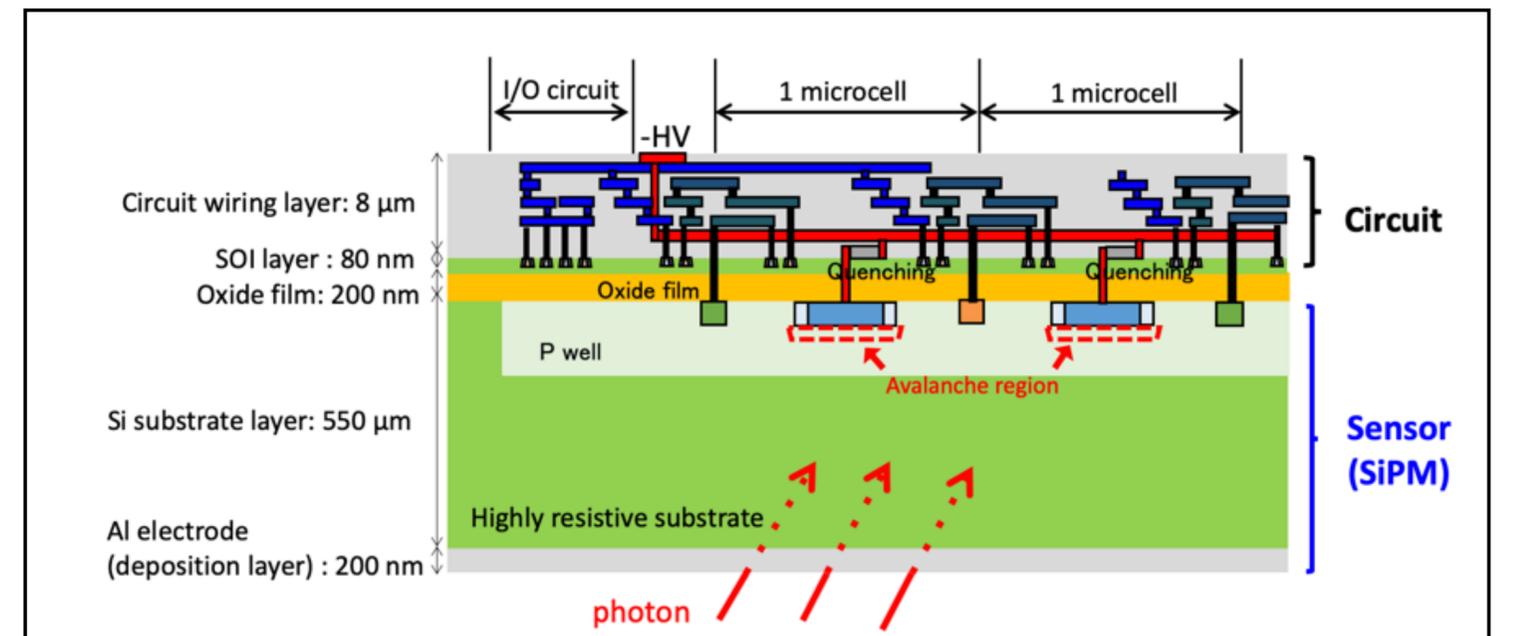
07_diff_sg2EX1

tran_pair3_R1_dis.dists15.Elec

電子密度

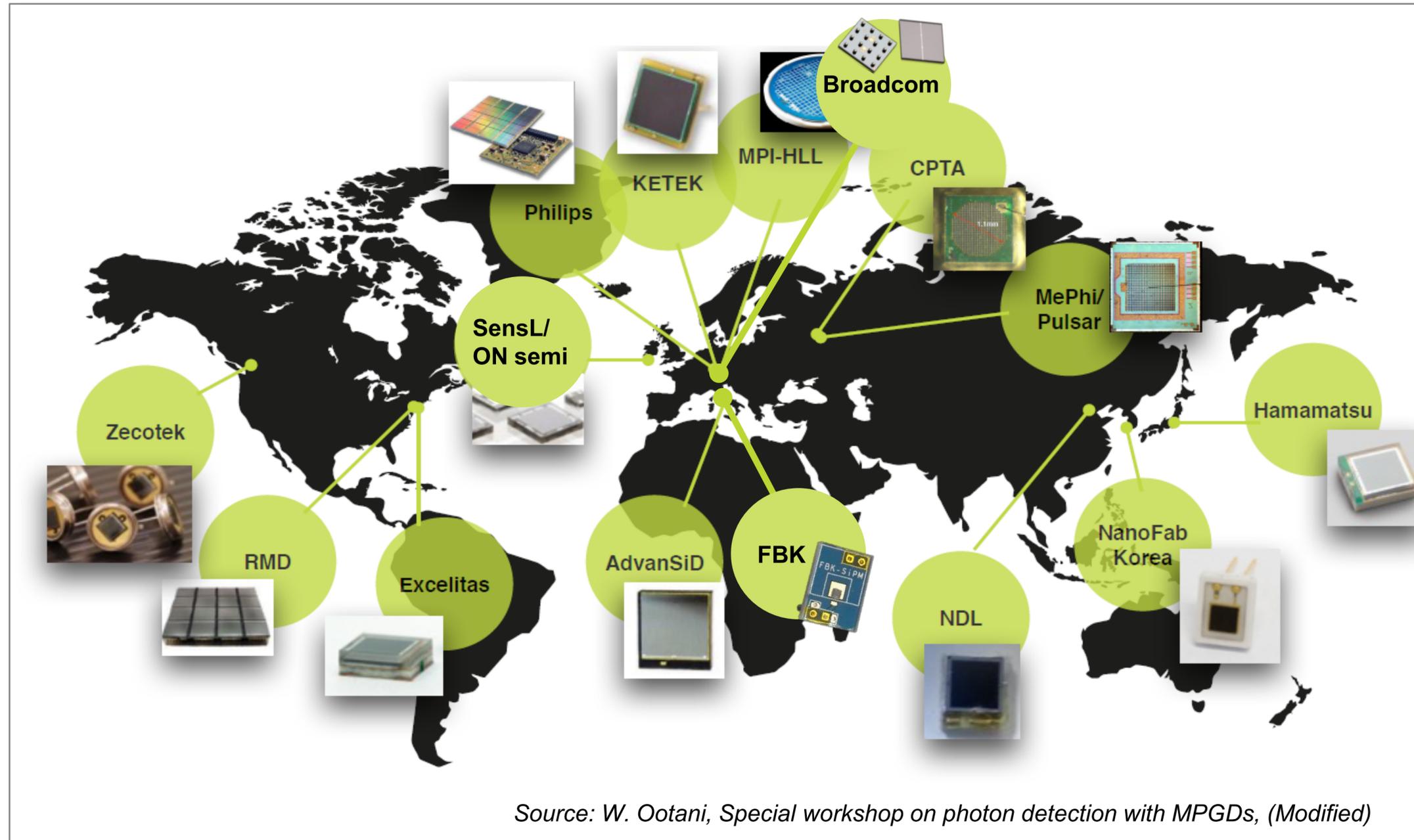
25 測定器開発プラットフォーム研究会 2019/12/23

茂木, 第1回測定器開発プラットフォームA研究会



SOI-SiPM JINST 15 C02049 (2020)

SiPM producers



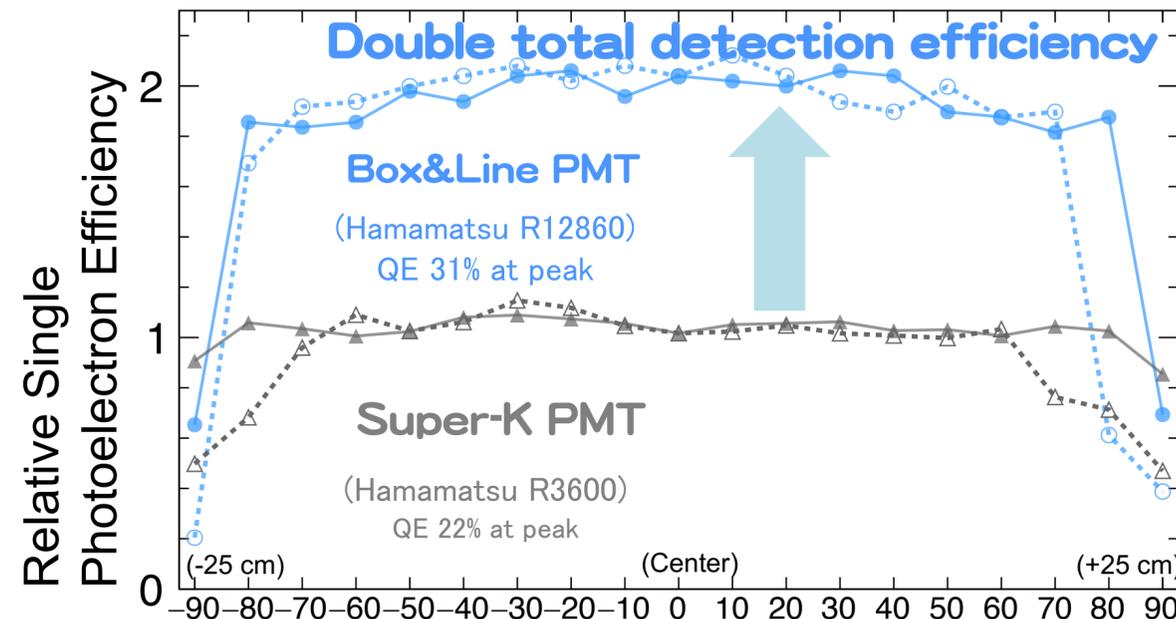
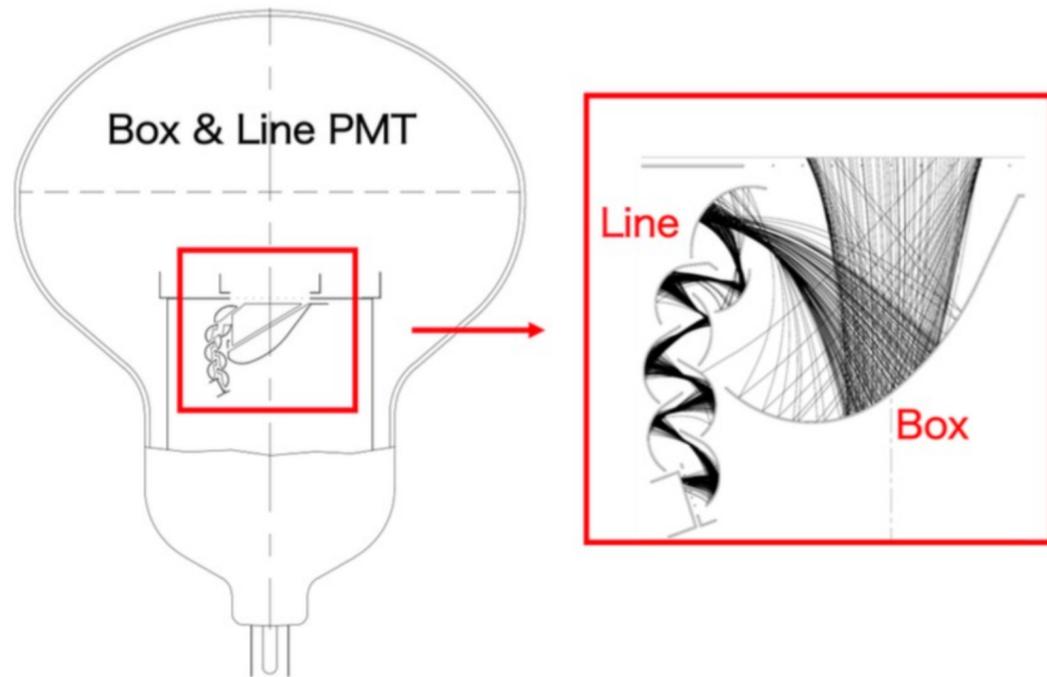
大口徑PMT

<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/R12860/index.html>



浜松ホトニクス R12860

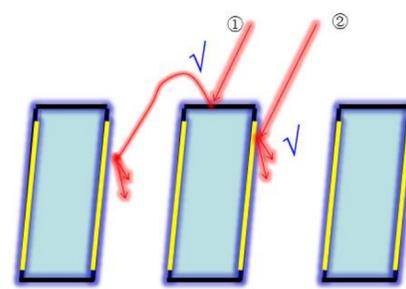
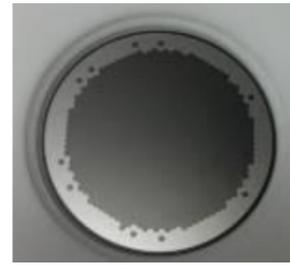
- スーパーカミオカンデ用PMTに比べて
光検出効率 2倍, 電荷分解能 2倍,
時間分解能 2倍, 耐圧向上
- 低ノイズ, 低RI



2021年3月から
~300本/月 納入中
2026年まで継続

20inch MCP-PMT in China

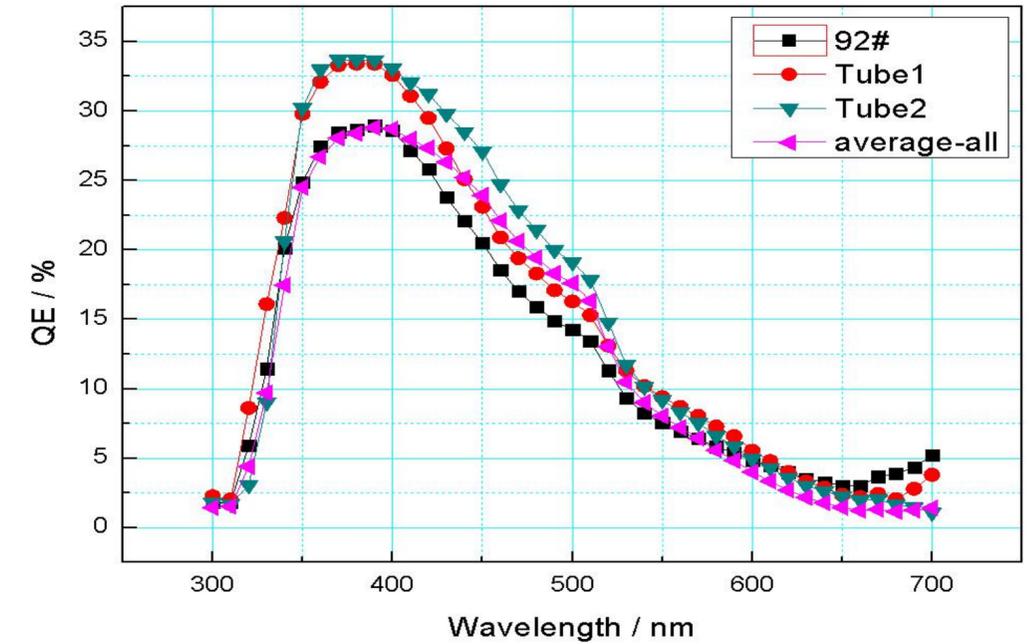
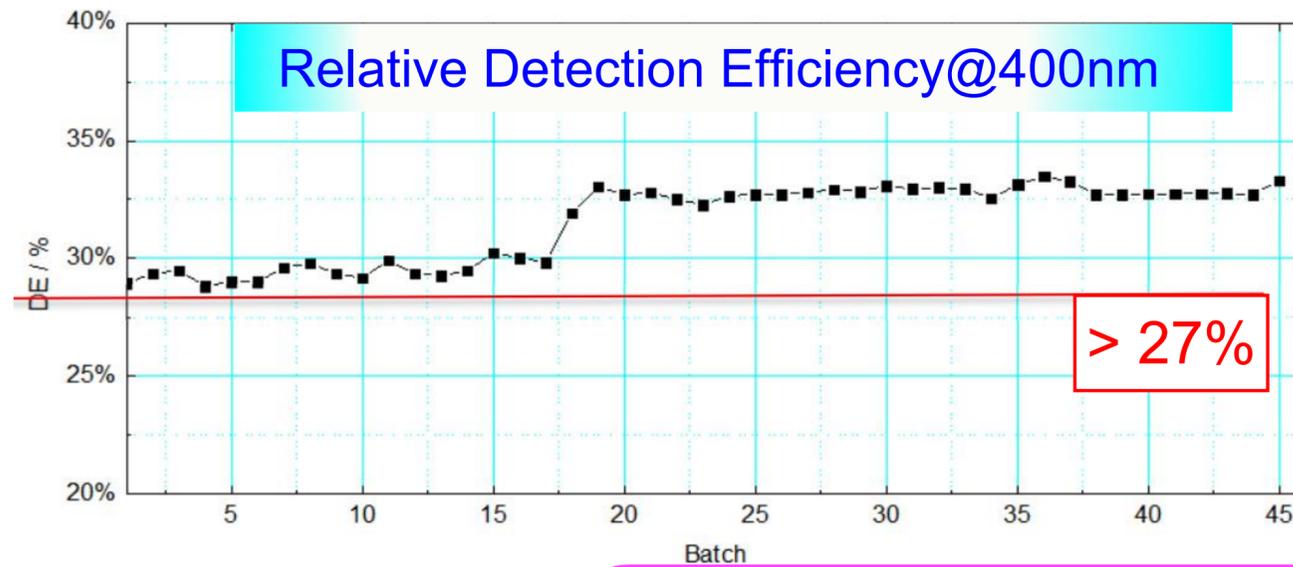
S.Qian, ICHEP2020



CE = 100%

The p.e. into the channel directly ~70%
The p.e. from the electrode indirectly ~30%

in 2018 : 30% ----> 35%



15,000本をJUNO向けに生産完了
(+5,000 Hamamatsu R12860)

時間分解能改良版をLHAASO (エアシャワー) で使用
HKでも試験 (西村, Bronnerら)

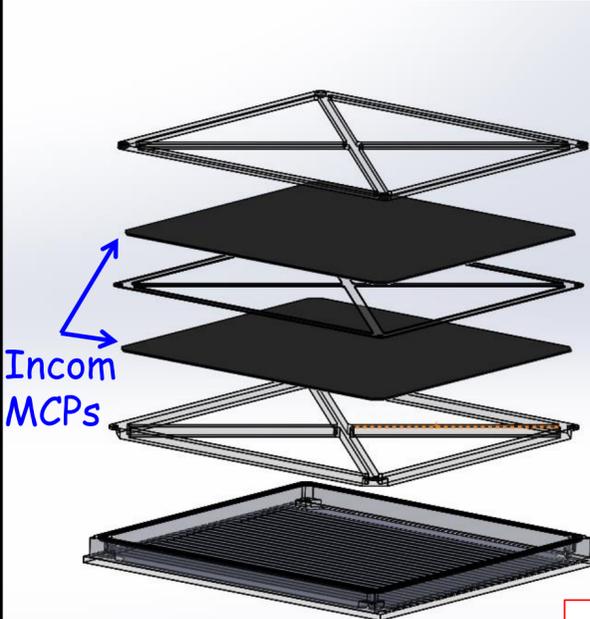
Flower-like focusing electrode



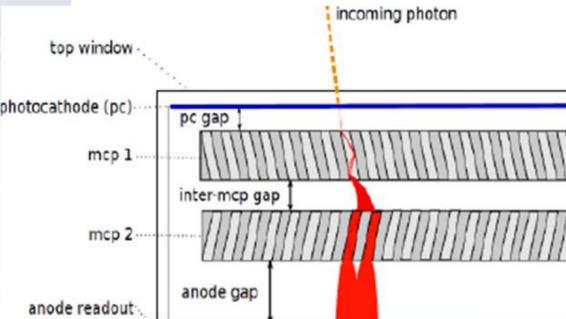
Characteristics	Normal focusing electrode	Flower-like focusing electrode
Quantum Efficiency (400nm)	~30%	~30%
Relativity Detection Efficiency	~100%	85%
P/V of SPE	~7	~5
TTS on the top point	~20ns	4.3 ns
Anode Dark Count	~40KHz	~20KHz

LAPPD (Large Area Picosecond Photo-Detector)

LAPPD features



Incom MCPs



top window
photocathode (pc)
mcp 1
mcp 2
anode readout

pc gap
inter-mcp gap
anode gap

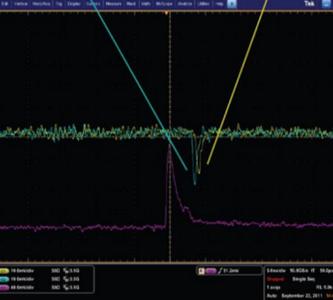
incoming photon

All inexpensive glass

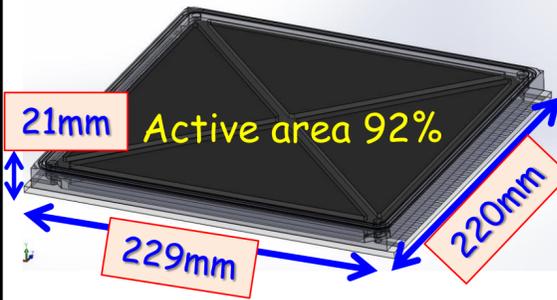
Illustration provided by Univ. of Chicago



50Ω impedance



- Glass/ceramic body
- Large Active Area: 195 x 195 mm²
- Picosecond timing resolution
- mm spatial resolution
- QE >20% w/bi-alkali photocathode
- Fused Silica/Borosilicate window
- Flat square geometry, high filling factor
- Lower Cost per Unit Area



21mm Active area 92%

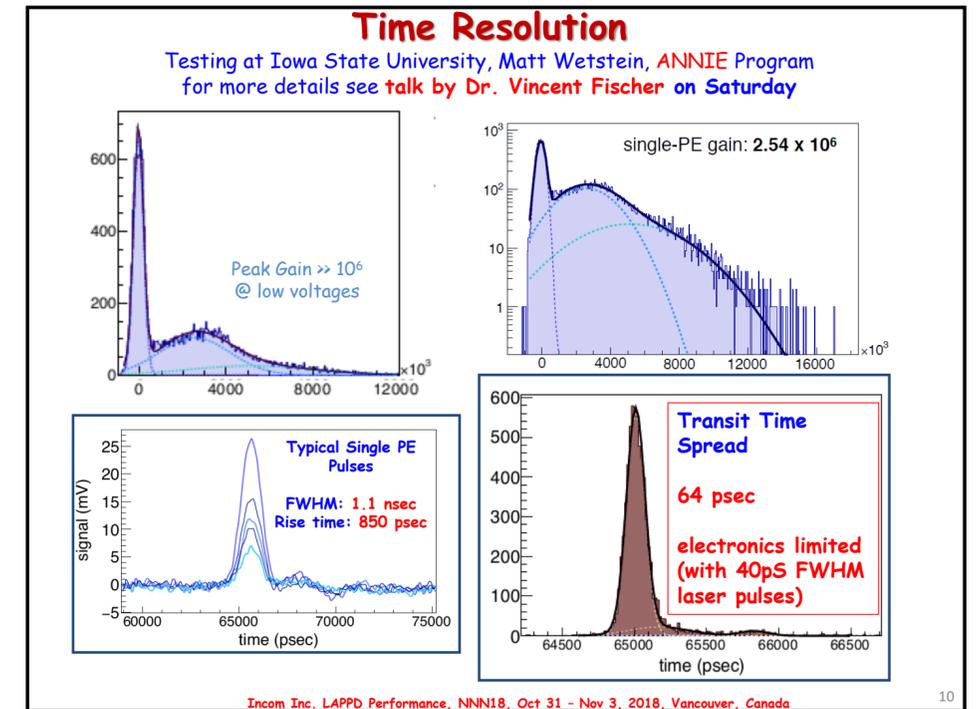
229mm

220mm

Incom Inc. LAPPD Performance, NNN18, Oct 31 - Nov 3, 2018, Vancouver, Canada

4

NNN18, <https://meetings.triumf.ca/event/27/contributions/1708/>



LAPPD Price Projections

- Current costs are driven by overhead rates, non-reimbursed R&D Costs, and low volume
- Costs drop rapidly, as demand and volume increases.
- Incom projects price to drop from current levels as follows:

Timing	Comrcl Price	DOE Price	Cum Vol.	Annual Capacity
Current	\$ 75,000	\$ 50,000	48	48
1	\$ 56,250	\$ 37,688	58	82
2	\$ 45,000	\$ 30,150	144	120
3	\$ 36,900	\$ 24,723	268	204
4	\$ 31,365	\$ 21,015	502	264
5	\$ 30,032	\$ 20,121	1,000	278

With full scale production, and cumulative volumes of product produced approaching 10,000 units, a price of \$10,000 or less, for a full size LAPPD, is entirely plausible.

Incom Inc. LAPPD Performance, NNN18, Oct 31 - Nov 3, 2018, Vancouver, Canada

23

新しいものを作る : gasPM

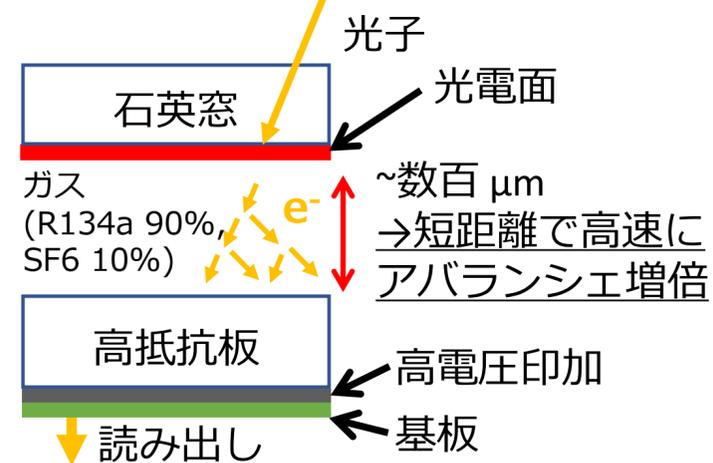
2 / 4

GasPM(Gaseous PhotoMultiplier)

GasPMは、ガス増倍を用いた新型光検出器である。

GasPMの特徴

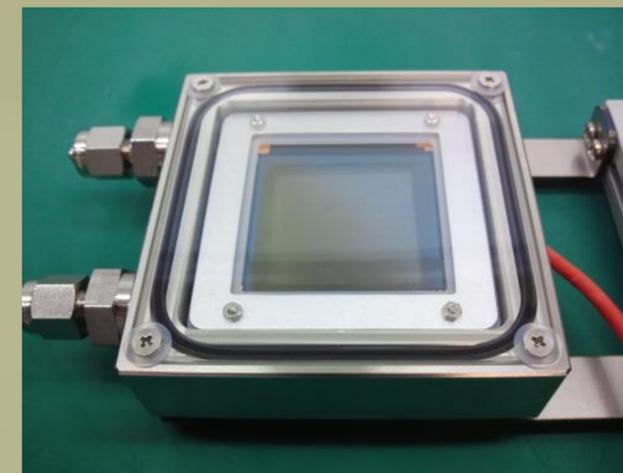
- **高時間分解能**($\sigma \approx 7.6$ ps)、**高収集効率**($\approx 92\%$)が期待される。
(第75回年次大会 17aG22-1 松岡)
- 単純な構造 → **安価**
- 一様なガス増倍 → **大型化しても時間分解能が下がらない**



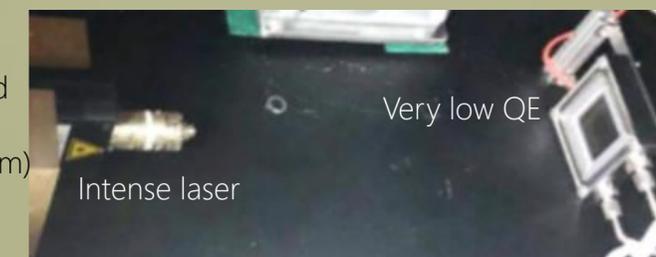
GasPMを実現すると、これまでの光検出器では不可能だった大面積かつ高時間分解能での光子検出を必要とする実験が可能になる。

16

手作りの新型光検出器試作機



- 空気中でも劣化しない LaB_6 透過型光電面を開発
 - 仕事関数 ~ 2.6 eV
 - 極低QE
- 自分で設計
- 市販の安い材料のみ
- 机の上で組み立て



測定器開発プラットフォーム第1回研究会(2019.12)

松岡さん (KEK), 名古屋大

モジュール化

IceCube Upgrade用D-Egg



arXiv:2108.05353

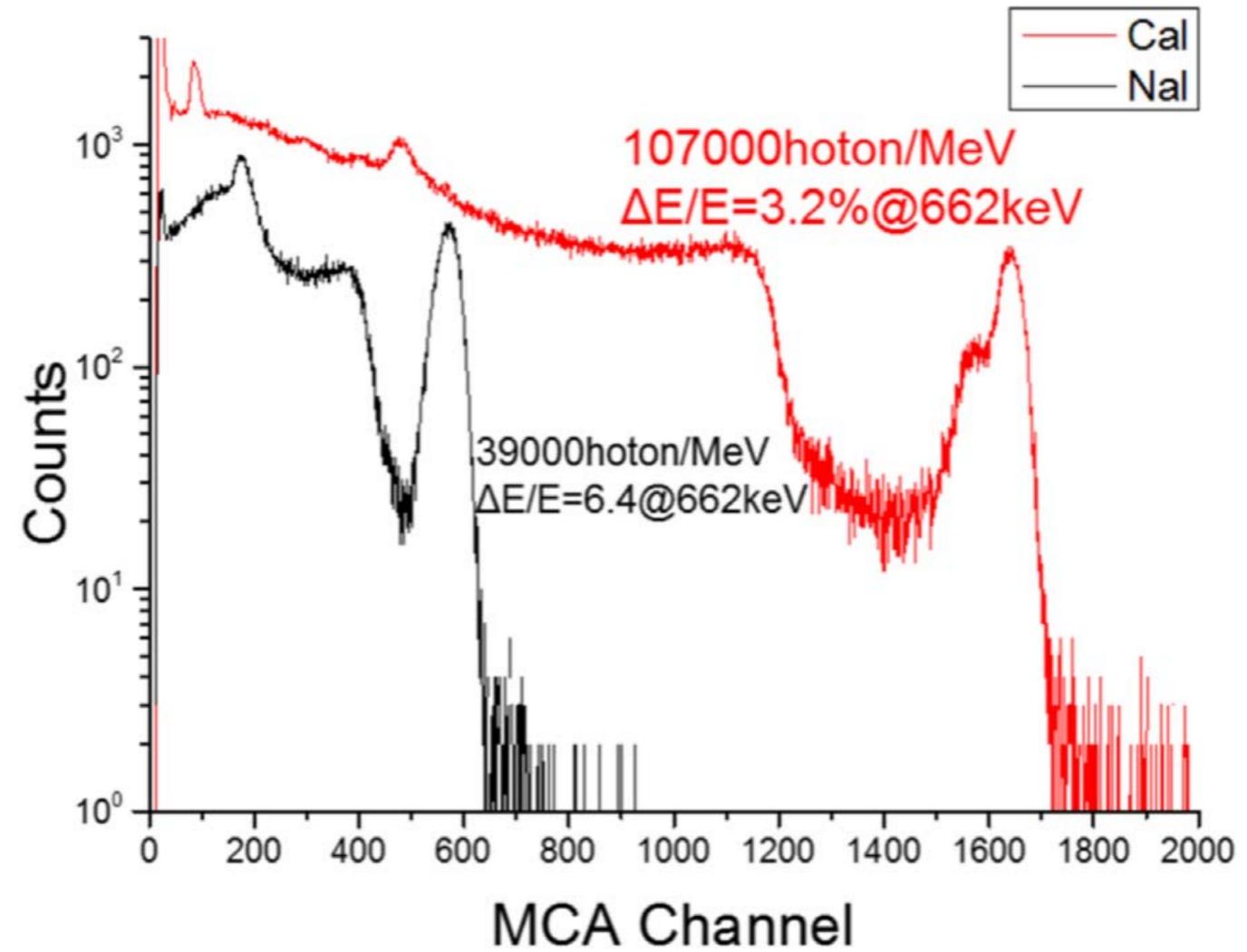
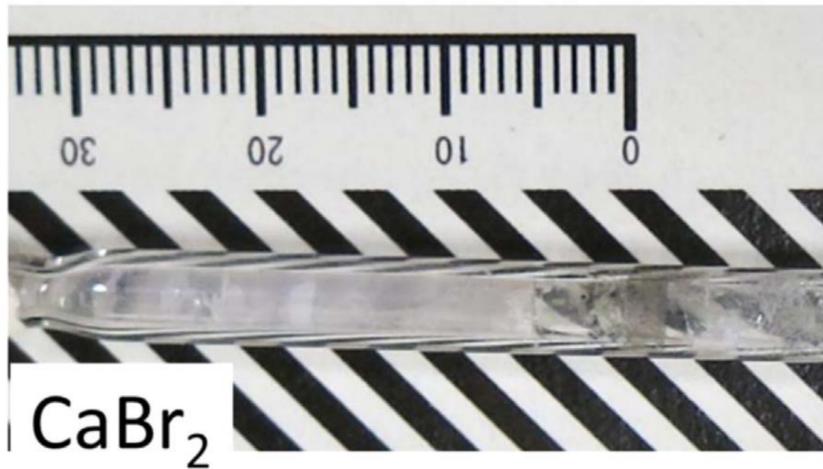
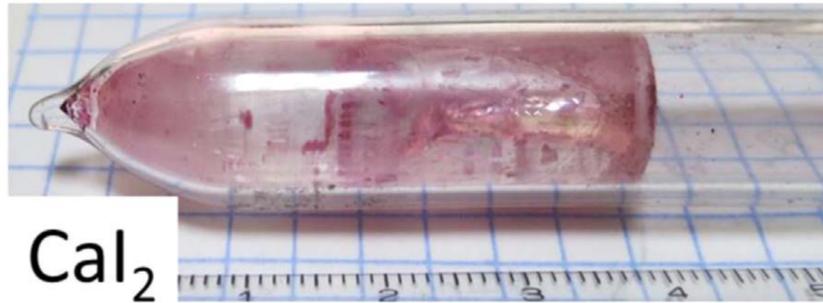
Hyper-K/IWCD(Intermediate Water Cherenkov Detector)用 multi-PMT



シンチレーター開発

筑波大：飯田さん

CaI₂



大型化に挑戦中

Ceramics International **43** (2017) S423–S427

有機無機ペロブスカイト型化合物

世界初の量子閉じ込め効果を利用したシンチレータ

有機無機層状ペロブスカイト型化合物を用いた新規シンチレータ開発

有機無機ペロブスカイト型化合物

無機層: PbX_4^{2-}
X: ハロゲン

有機層: RNH_3^+
R: 炭化水素

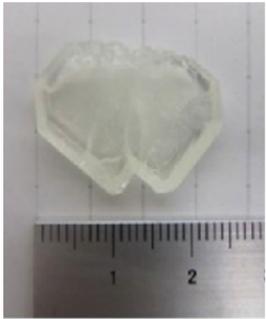
量子閉じ込め効果を受けた励起子が無機層に形成

シンチレーターに求められる高強度・高速な発光

本研究の論点

有機層を通じた構造制御 → 励起子物性制御
結晶(主に無機層の)構造と発光特性の相関

有機層にPheを用いた化合物のγ線検出特性



GSO:Ceのおよそ1.5倍の発光量
(~15,000 photons/MeV)

Kawano et al. Sci. Rep. 7 (2017) 14754.

ナノ粒子添加プラスチックシンチレータ

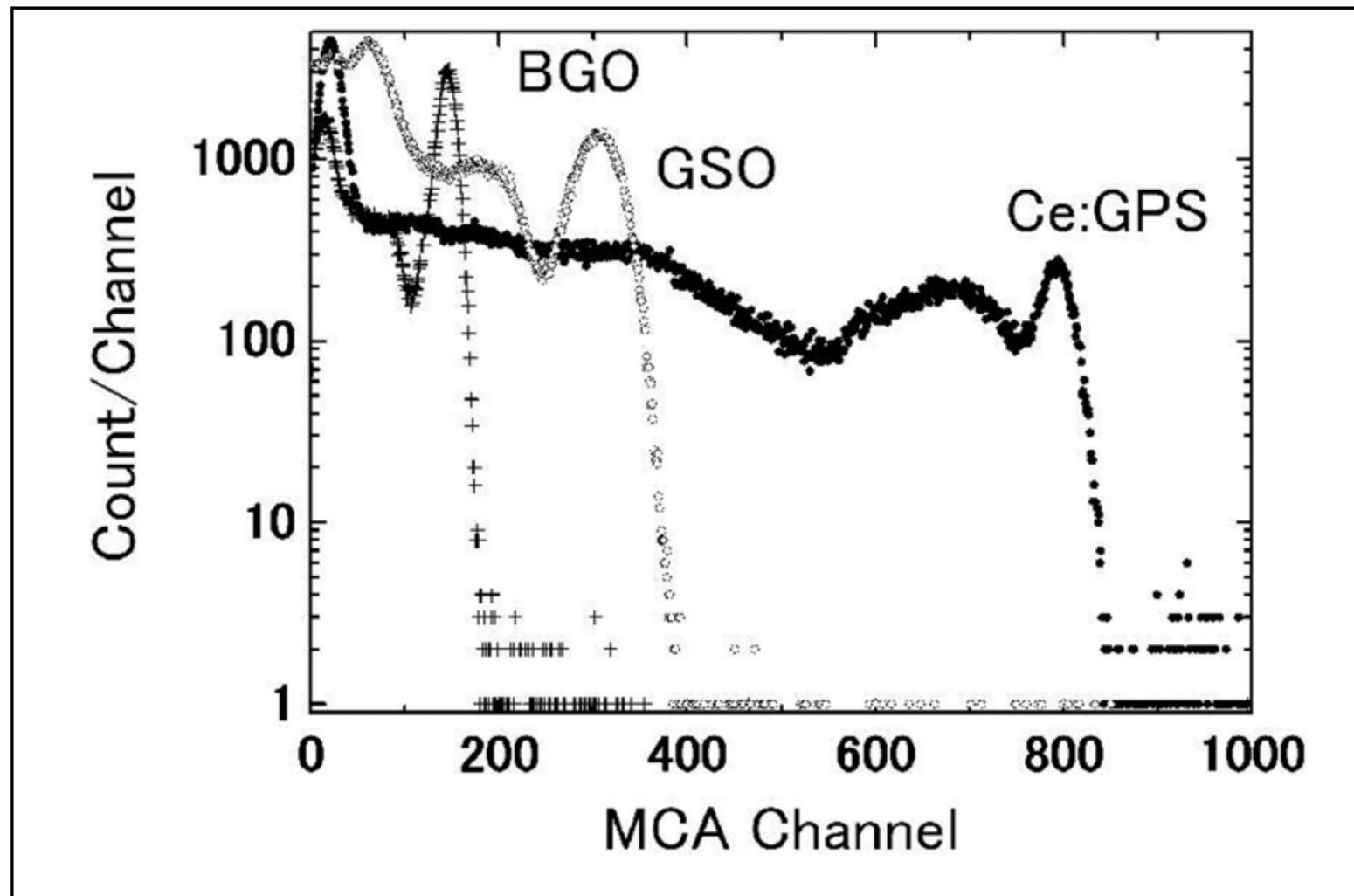
想定するシンチレーション機構

- ・プラスチックシンチレータの弱点である感度を補完
 - 高感度かつ高速応答性を有する材料の実現
- ・添加した無機物が「まとまって」存在
 - 消光を抑制



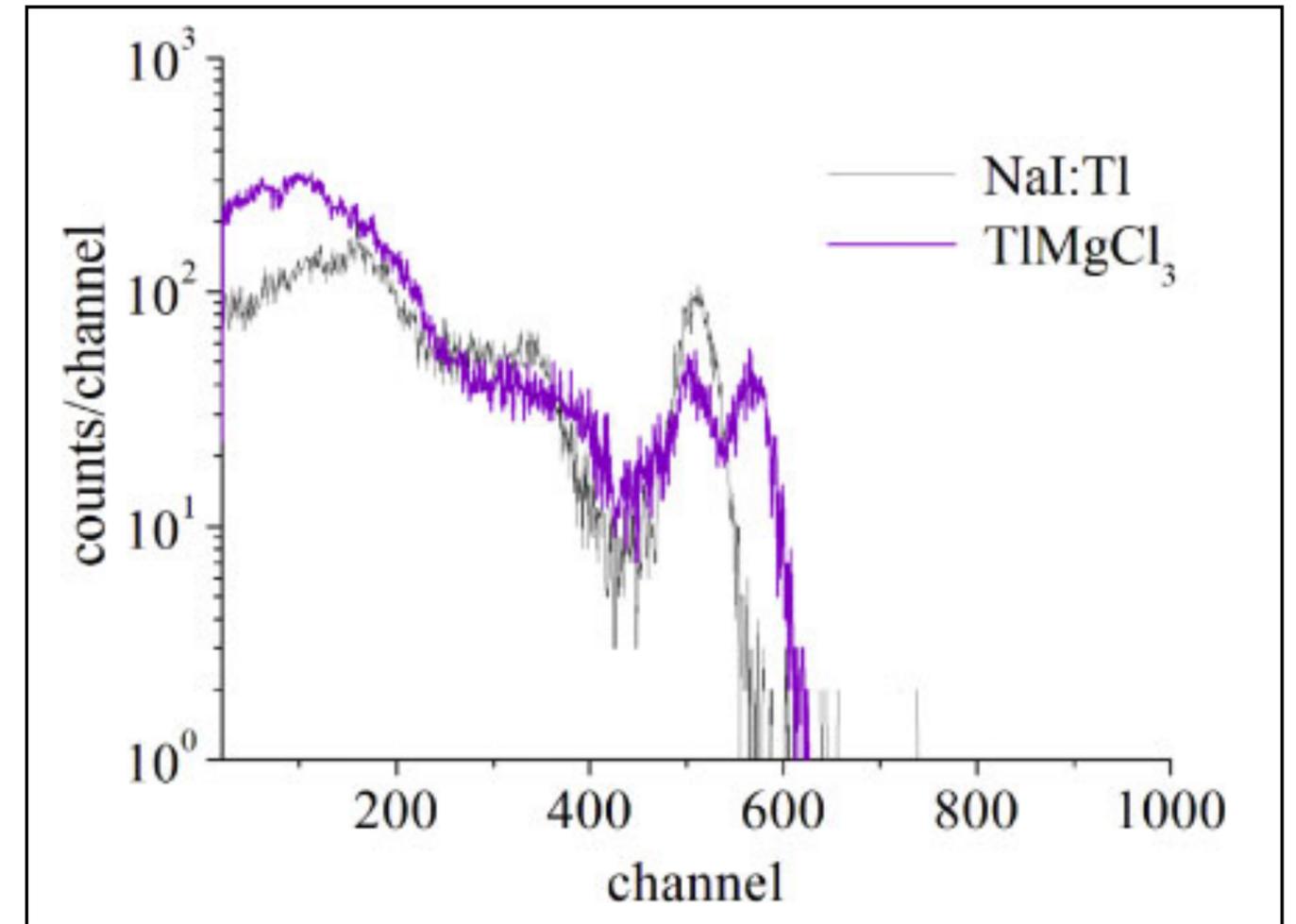
東北大：越水さん

Gadolinium PyroSilicate (GPS)



IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, 54, 1383-1386 (2007)

TlMgCl₃ ($Z_{\text{eff}}=71.6$)



Jpn. J. Appl. Phys. 55, 090301 (2016)

超低BG NaI (徳島：伏見さん, PICO-LON)
液体シンチ (KamLAND2), 水シンチ (飯田さん)
などなど...

3Dプリンタ+プラスチックシンチレーター

- Optical separationも含めて
複数素材を同時に成形の可能性
- 複雑な形状が可能に

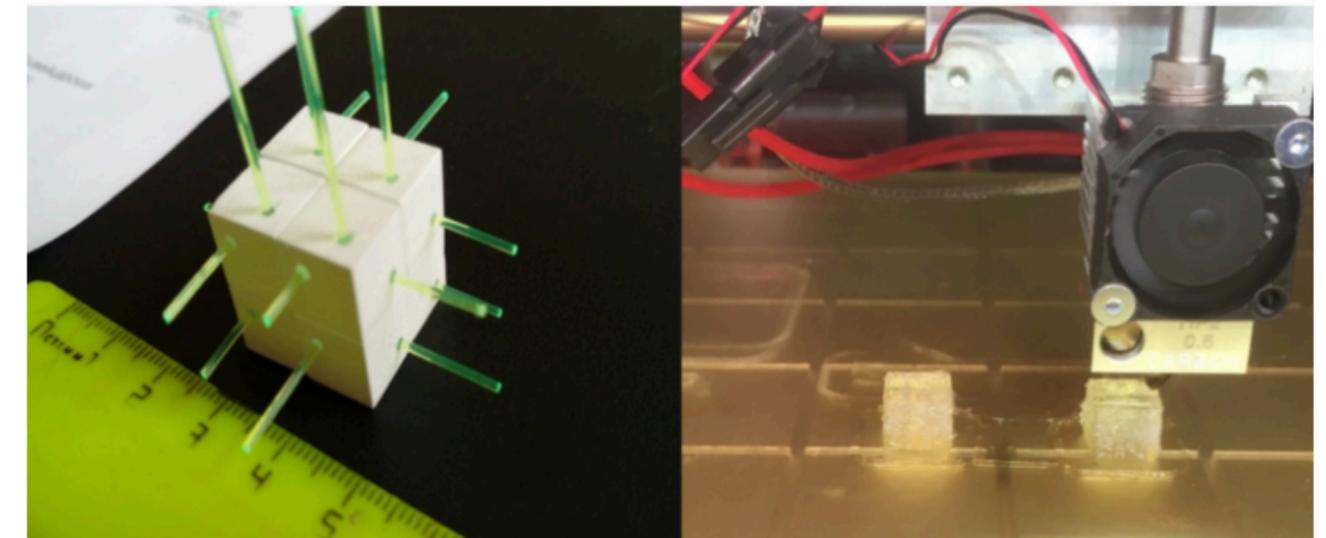
元々T2Kのアップグレードに関して
(KEK 中平さん, 松原さん)
九州大の金政浩先生と相談していた

CERNの人に話したらしばらくして →

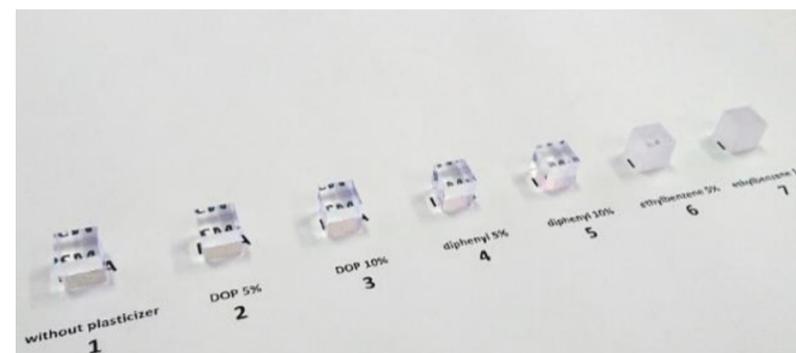
A CERN-led international collaboration develops 3D-printed neutrino detectors

A 3D-printed “super-cube” scintillator would be the first occurrence of additive manufacturing being used in particle detectors and would allow more precise data collection

22 JUNE, 2020 | By [Thomas Hortal](#)



Example of a plastic Scintillator detector (left) and a stage of its 3D-printing process (right) (Image: CERN)



arXiv:2011.09859

おわり

- 周辺どころかほんの一部の偏った紹介だけでした。すみません
- これもあるよ， という方はぜひ測定器開発プラットフォームへ

少し古いですが

- PD18ワークショップ <https://indico.ipmu.jp/event/166/>
- プラットフォーム A キックオフミーティング <https://kds.kek.jp/event/32257/>
- プラットフォーム A 第一回研究会 <https://kds.kek.jp/event/33068/>
- シンチレータ研究会SMART <https://smart20170.wixsite.com/smart2019>