

# MPGDとTPC検出器周辺の 最新状況レビュー

2021/8/27, 第13回勉強会 測定器開発フロンティア勉強会  
坂下健(KEK/J-PARC)

# Contents

- ・ MPGD/TPCとその世界的な動向
- ・ 国内の活動(プラットフォームC班の中をメインに)
- ・ まとめ

## 謝辞:

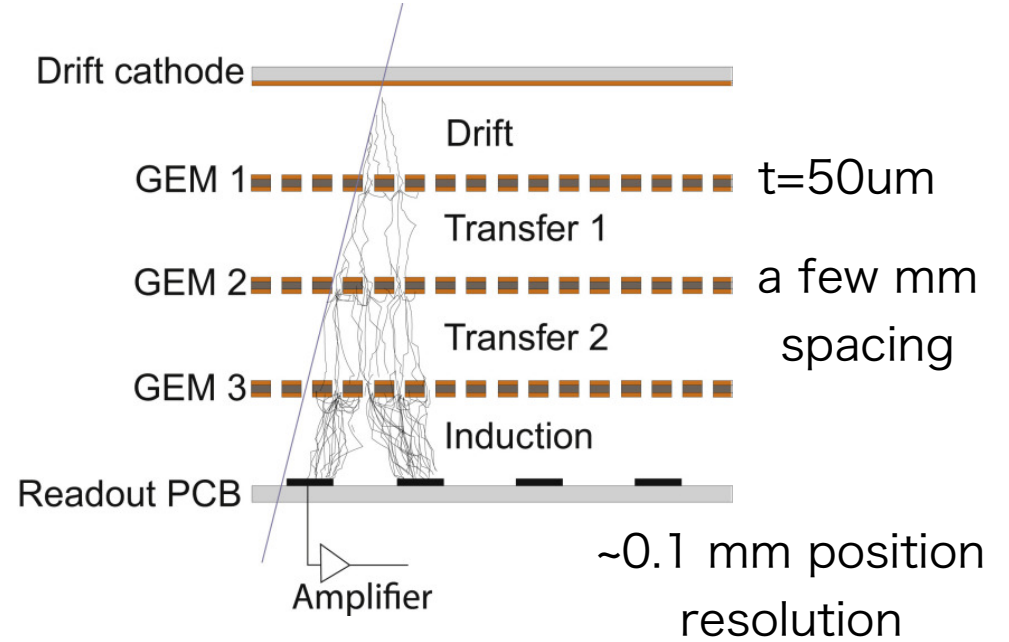
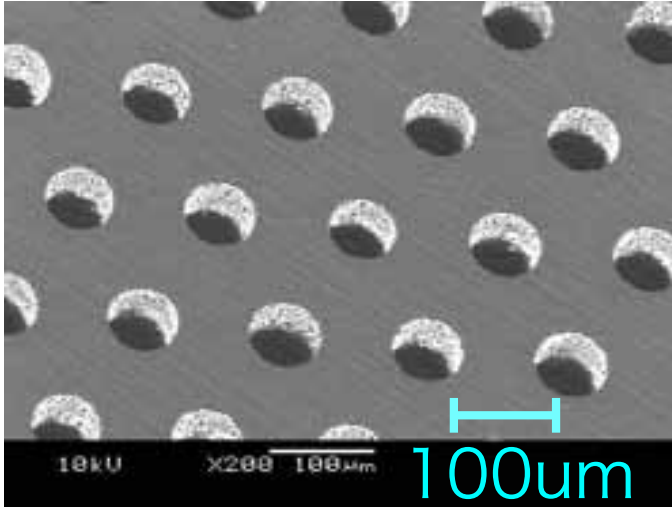
- ・ MPGDの最新情報は神戸大越智さんから頂きました。
- ・ また、このスライドの作成についてはMPGD・アクティブ媒質TPC研究会世話人の方々にご協力頂きました。

# Micro Pattern Gas Detector(MPGD)

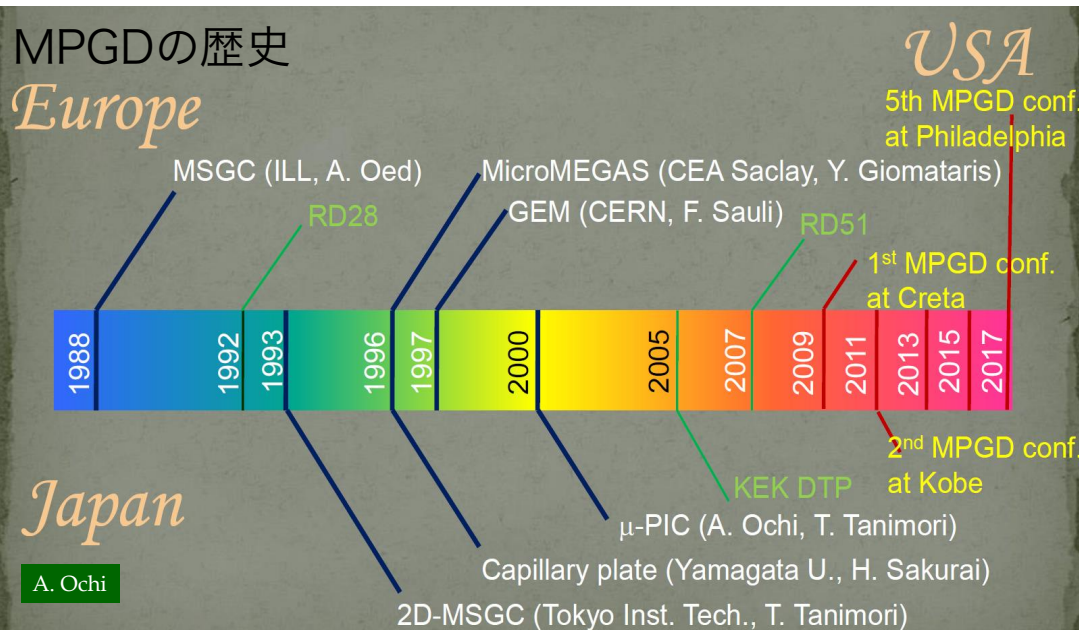
- ❖ 微細加工技術で作った微小な増幅器を用いたガス検出器。
- ❖ ワイヤー型ガス検出器に比べて、高計数率特性、2次元読み出し等の特徴がある

tracking,  
imaging

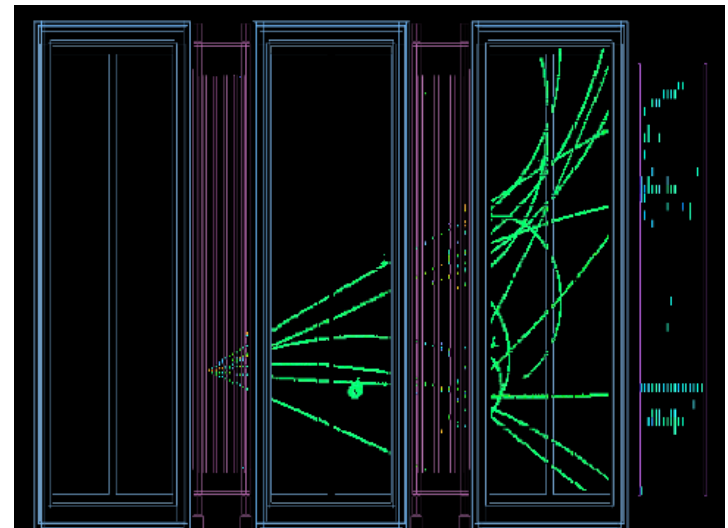
(GEMの例)



GEM以外にもMicromegas,  $\mu$ PICなど



TPCの増幅部にも応用される(T2K前置検出器TPCのイベントディスプレイ。Micromegasを応用している)

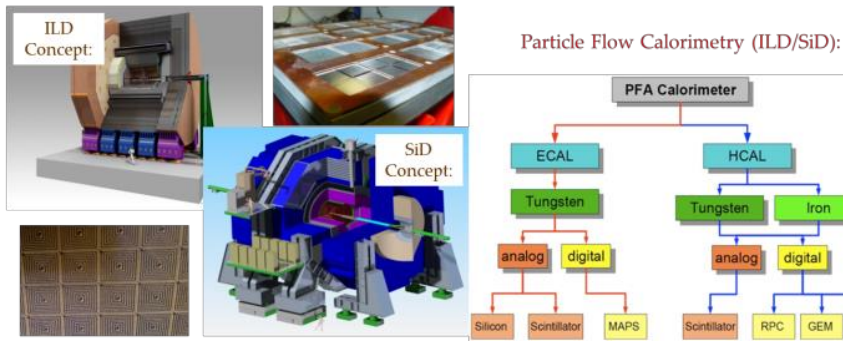


# MPGDの応用例：ものすごく多くの実験、検出器に応用されている

## MPGD Technologies for the International Linear Collider

Experiment / Timescale	Application Domain	MPGD Technology	Total detector size / Single module size	Operation Characteristics / Performance	Special Requirements / Remarks
<b>ATLAS Muon System Upgrade:</b> Start: 2019 (for 15 y)	High Energy Physics (Tracking/Triggering)	Micromegas	Total area: 1200 m <sup>2</sup> Single unit detect: (2.2x1.4m <sup>2</sup> ) - 2-3 m <sup>2</sup>	Max. rate: 15 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: <100μm Time res.: - 10 ns Rad. Hard.: - 0.5C/cm <sup>2</sup>	- Redundant tracking and triggering; Challenging constr. in mechanical precision:
<b>ATLAS Muon Tagger Upgrade:</b> Start: > 2023	High Energy Physics (Tracking/Triggering)	μ-PIC	Total area: - 2m <sup>2</sup>	Max. rate: 100kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: < 100μm	
<b>CMS Muon System Upgrade:</b> Start: > 2020	High Energy Physics (Tracking/Triggering)	GEM	Total area: - 143 m <sup>2</sup> Single unit detect: 0.3-0.4m <sup>2</sup>	Max. rate: 10 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - 100μm Time res.: - 5-7 ns Rad. Hard.: - 0.5 C/cm <sup>2</sup>	- Redundant tracking and triggering
<b>CMS Calorimetry (BE) Upgrade</b> Start > 2023	High energy Physics (Calorimetry)	Micromegas, GEM	Total area: - 100 m <sup>2</sup> Single unit detect: 0.5m <sup>2</sup>	Max. rate: 100 MHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - mm	Not main option; could be used with HGCAL (BE part)
<b>ALICE Time Projection Chamber:</b> Start: > 2020	Heavy-Ion Physics (Tracking + dE/dx)	GEM w/ TPC	Total area: - 32 m <sup>2</sup> Single unit detect: up to 0.3m <sup>2</sup>	Max. rate: 100 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - 300μm Time res.: - 100 ns dE/dx: 12% (Fe55) Rad. Hard.: 50 mC/cm <sup>2</sup>	- 50 kHz Pb-Pb rate; - Continues TPC readout - Low IBF and good energy resolution
<b>TOTEM:</b> Run: 2009-now	High Energy / Forward Physics (5.3 ≤  eta  ≤ 6.5)	GEM (semicircular shape)	Total area: - 4 m <sup>2</sup> Single unit detect: up to 0.03m <sup>2</sup>	Max. rate: 20 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - 120μm Time res.: - 12 ns Rad. Hard.: - mC/cm <sup>2</sup>	Operation in pp, pA and AA collisions.
<b>LHCb Muon System</b> Run: 2010 - now	High Energy / B-flavor physics (muon triggering)	GEM	Total area: - 0.6 m <sup>2</sup> Single unit detect: 20-24 cm <sup>2</sup>	Max. rate: 500 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - cm Time res.: - 3 ns Rad. Hard.: - C/cm <sup>2</sup>	- Redundant triggering
<b>FCC Collider</b> Start: > 2035	High Energy Physics (Tracking/Triggering/Calorimetry/Muon)	GEM, THGEM, Micromegas, μ-PIC, InGrid	Total area: 10,000 m <sup>2</sup> (for MPGDs around 1,000 m <sup>2</sup> )	Max. rate: 100 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: <100μm Time res.: - 1 ns	Maintenance free for decades

Experiment / Timescale	Application Domain	MPGD Technology	Total detector size / Single module size	Operation Characteristics / Performance	Special Requirements / Remarks
<b>ILC Time Projection Chamber for ILD:</b> Start: > 2030	High Energy Physics (tracking)	Micromegas GEM (pads) InGrid (pixels)	Total area: - 20 m <sup>2</sup> Single unit detect: - 400 cm <sup>2</sup> (pads) - 130 cm <sup>2</sup> (pixels)	Max. rate: < 1 kHz Spatial res.: <150μm Time res.: - 15 ns dE/dx: 5% (Fe55) Rad. Hard.: no	Si + TPC Momentum resolution: dp/p < 9*10 <sup>-5</sup> / GeV Power-pulsing
<b>ILC Hadronic (DHCAL) Calorimetry for ILD/SiD</b> Start > 2030	High Energy Physics (calorimetry)	GEM, THGEM, RPWELL, Micromegas	Total area: - 4000 m <sup>2</sup> Single unit detect: 0.5 - 1 m <sup>2</sup>	Max. rate: 1 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - 1 cm Time res.: - 300 ns Rad. Hard.: no	Jet Energy resolution: 3-4 % Power-pulsing, self-triggering readout



まだ一部  
このほかにも  
中性子検出器  
ニュートリノ  
暗黒物質  
X線, γ線  
実験にも応用  
されている

## Cylindrical MPGDs as Inner Trackers for Particle / Nuclear Physics

Experiment / Timescale	Application Domain	MPGD Technology	Total detector size / Single module size	Operation Characteristics / Performance	Special Requirements / Remarks
<b>KLOE-2 @ DAFNE</b> Run: 2014-2017	Particle Physics / K-flavor physics (Tracking)	Cylindrical GEM	Total area: 3.5m <sup>2</sup> 4 cylindrical layers L (length) = 700mm R (radius) = 130, 155, 180, 205 mm	Spatial res.: (r phi) = 250μm Spat. res. (z) = 350μm	- Mat. budget 2% X0 - Operation in 0.5 T
<b>BESIII Upgrade @ Beijing</b> Run: 2018-2022	Particle Physics / e-e- collider (Tracking)	Cylindrical GEM	3 cylindrical layers R ~ 20 cm	Max. rate: 10 kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: (xy) = 130μm Spat. res. (z) = 1 mm	- Material ≤ 1.5% of X <sub>0</sub> for all layers - Operation in 1T
<b>CLAS12 @ JLAB</b> Start: > 2017	Nuclear Physics / Nucleon structure (tracking)	Planar (forward) & Cylindrical (barrel) Micromegas	Total area: Forward - 0.6 m <sup>2</sup> Barrel - 3.7 m <sup>2</sup> 2 cylindrical layers R ~ 20 cm	Max. rate: - 30 MHz Spatial res.: < 200μm Time res.: - 20 ns	- Low material budget: 0.4% X0 - Remote electronics
<b>ASACUSA @ CERN</b> Run: 2014 - now	Nuclear Physics (Tracking and vertexing of pions resulting from the p-anti-p annihilation)	Cylindrical Micromegas 2D	2 cylindrical layers L = 60 cm R = 85, 95 mm	Max. trigger rate: kHz Spatial res.: - 200μm Time res.: - 10 ns Rad. Hard.: 1 C/cm <sup>2</sup>	- Large magnetic field that varies from -3 to 4T in the active area
<b>MINOS</b> Run: 2014-2016	Nuclear structure	TPC w/ cylindrical Micromegas	1 cylindrical layer L=30 cm, R = 10cm	Spatial res.: <5 mm FWHM Trigger rate up to ~1 KHz	- Low material budget
<b>CMD-3 Upgrade @ BINP</b> Start: > -2019?	Particle physics (z-chamber, tracking)	Cylindrical GEM	Total area: - 3m <sup>2</sup> 2 cylindrical layers	Spatial res.: - 100μm	



## MPGD Tracking for Heavy Ion / Nuclear Physics

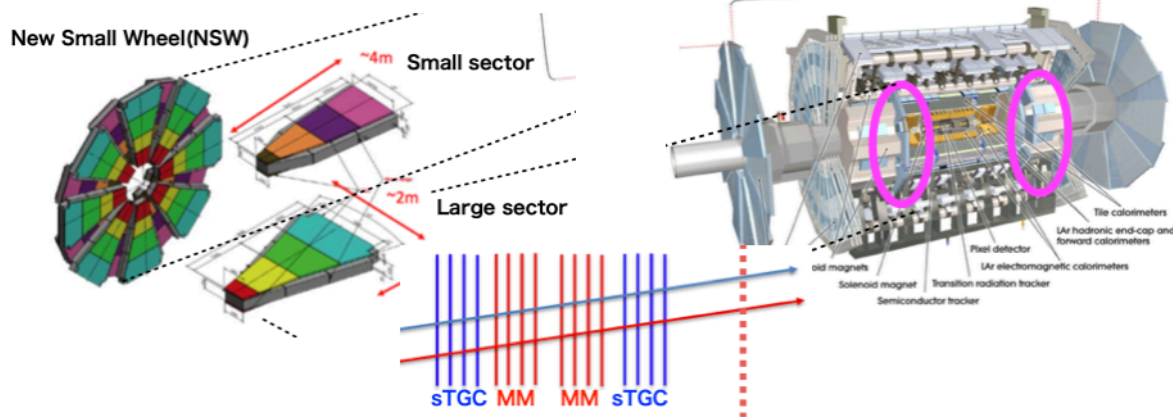
Experiment / Timescale	Application Domain	MPGD Technology	Total detector size / Single module size	Operation Characteristics / Performance	Special Requirements / Remarks
<b>STAR Forward GEM Tracker @ RHIC</b> Run: 2012-present	Heavy Ion Physics (tracking)	GEM	Total area: - 3 m <sup>2</sup> Single unit detect: - 0.4 x 0.4 m <sup>2</sup>	Spatial res.: 60-100 μm	Low material budget: < 1% X <sub>0</sub> tracking layer
<b>Nuclotron BM@N @ NICA/JINR</b> Start: > 2017	Heavy Ions Physics (tracking)	GEM	Total area: - 12 m <sup>2</sup> Single unit detect: - 0.9 m <sup>2</sup>	Max. rate: - 300 MHz Spatial res.: - 200μm	Magnetic field 0.5T orthogonal to electric field
<b>SuperFRS @ FAIR</b> Run: 2018-2022	Heavy Ion Physics (tracking/diagnostics at the In-Fly Super Fragment Separator)	TPC w/ GEMs	Total area: - few m <sup>2</sup> Single unit detect: Type I: 50 x 9 cm <sup>2</sup> Type II: 50 x 16 cm <sup>2</sup>	Max. rate: - 10 <sup>7</sup> Hz/spill Spatial res.: < 1 mm	High dynamic range Particle detection from p to Uranium
<b>PANDA @ FAIR</b> Start > 2020	Nuclear physics p - anti-p (tracking)	Micromegas/ GEMs	Total area: - 50 m <sup>2</sup> Single unit detect: - 1.5 m <sup>2</sup>	Max. rate: < 140kHz/cm <sup>2</sup> Spatial res.: - 150μm	Continuous-wave operation: 10 <sup>11</sup> interaction/s
<b>CBM @ FAIR:</b> Start: > 2020	Nuclear Physics (Muon System)	GEM	Total area: 9m <sup>2</sup> Single unit detect: 0.8x0.5m <sup>2</sup> -0.4m <sup>2</sup>	Spatial res.: < 1 mm Max. rate: 0.4 MHz/cm <sup>2</sup> Time res.: - 15ns Rad. hard.: 10 <sup>13</sup> n.eq./cm <sup>2</sup> /year	Self-triggered electronics
<b>Electron-Ion Collider (EIC)</b> Start: > 2025	Hadron Physics (tracking, RICH)	TPC w/ GEM readout Large area GEM planar tracking detectors	Total area: - 3 m <sup>2</sup> Total area: - 25 m <sup>2</sup>	Spatial res.: - 100 μm (rφ) Luminosity (e-p): 10 <sup>33</sup> Spat. res.: - 50-100 μm Max. rate: - MHz/cm <sup>2</sup>	Low material budget Low material budget



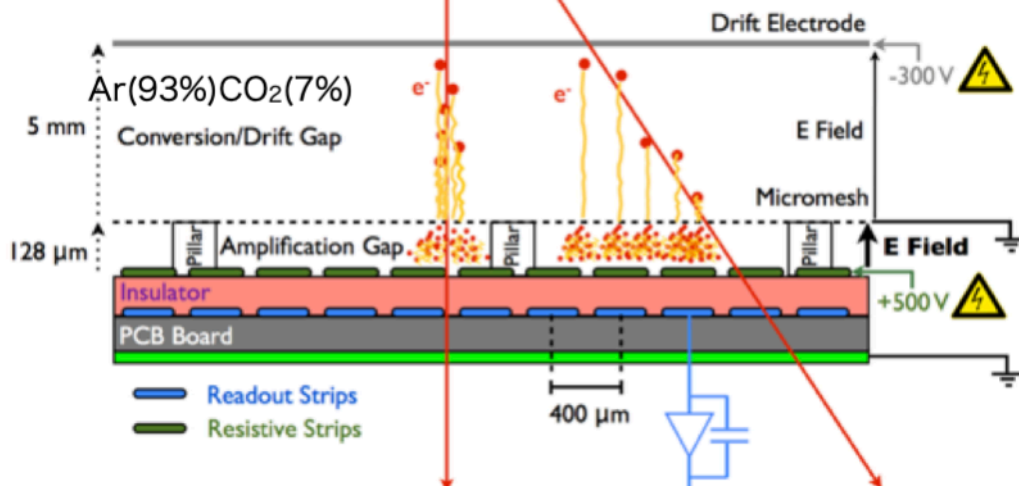
Prof. Maxim Titov (Saclay) at MGPD2017 Conference summary talk

# MPGDの応用例@World

## ATLAS End-cap muon spectrometer

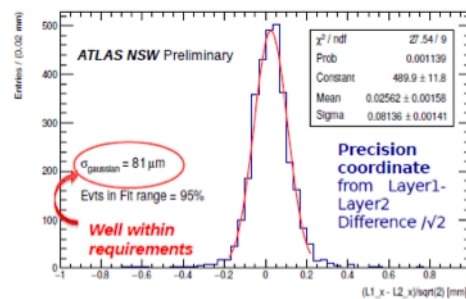


## Resistive Micro-Megas



**Max. rate:** 20 kHz/cm<sup>2</sup>  
**Spatial res.:** <100 μm  
**Time res.:** ~ 10 ns  
**Rad. Hard.:** ~ 0.5 C/cm<sup>2</sup>

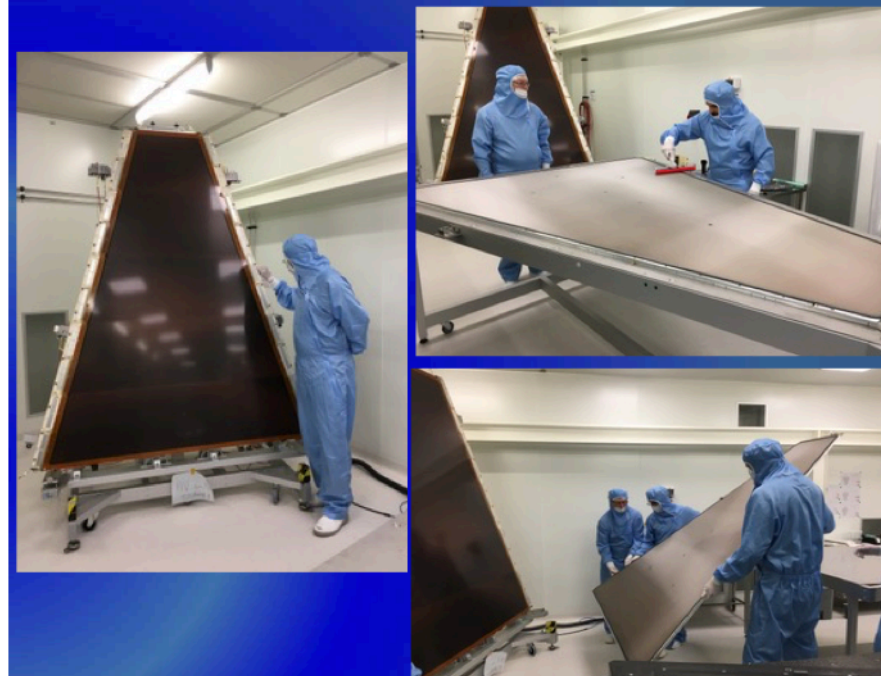
First NSW Prototypes (INFN Module 0)  
 Test-beam in June 2016



日本Gr.が高抵抗MMの  
 量産、QC/QA

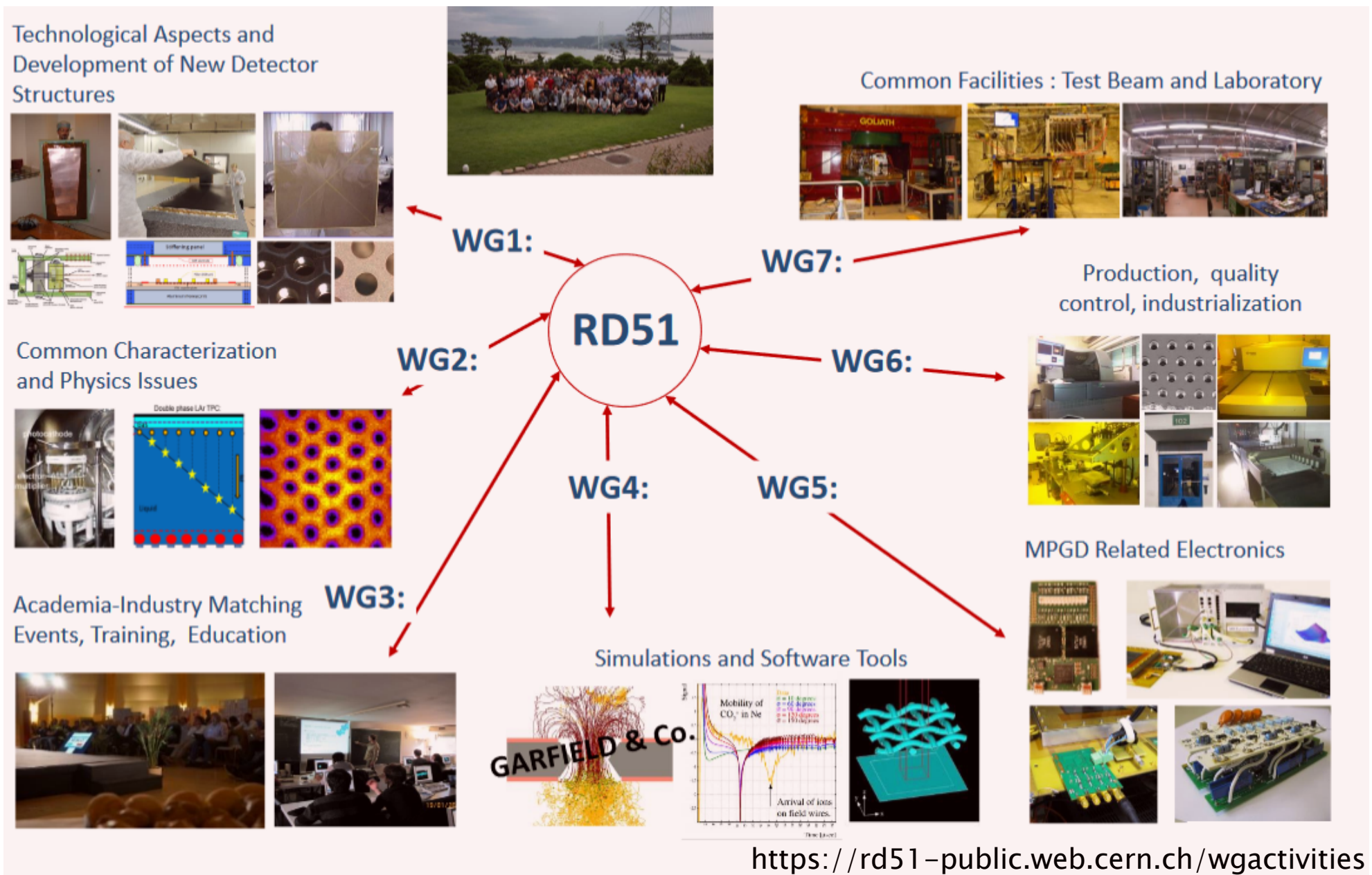
## 大型(大面積化)

Production, sector integration ongoing  
 (~1200m<sup>2</sup> resistive MM):



# CERN RD51

MPGDの国際的な開発コミュニティ

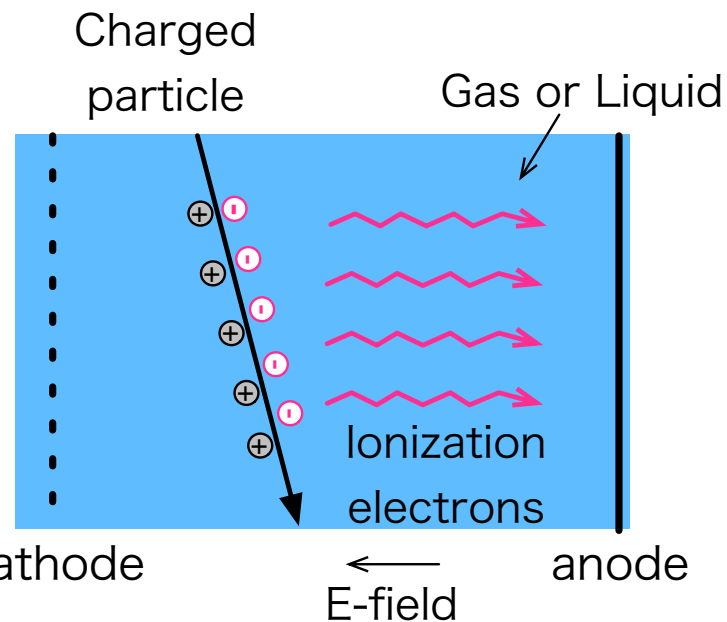


# Time Projection Chamber(TPC)

tracking, imaging, calorimeter, particle ID

- ❖ 3次元飛跡検出器としてDavid Nygrenが1974年に提案

飛跡検出器としてのGas TPC は、これまでに  
TOPAZ, ALICE実験など様々なHEP実験で応用  
(磁場中で運動量も測定)

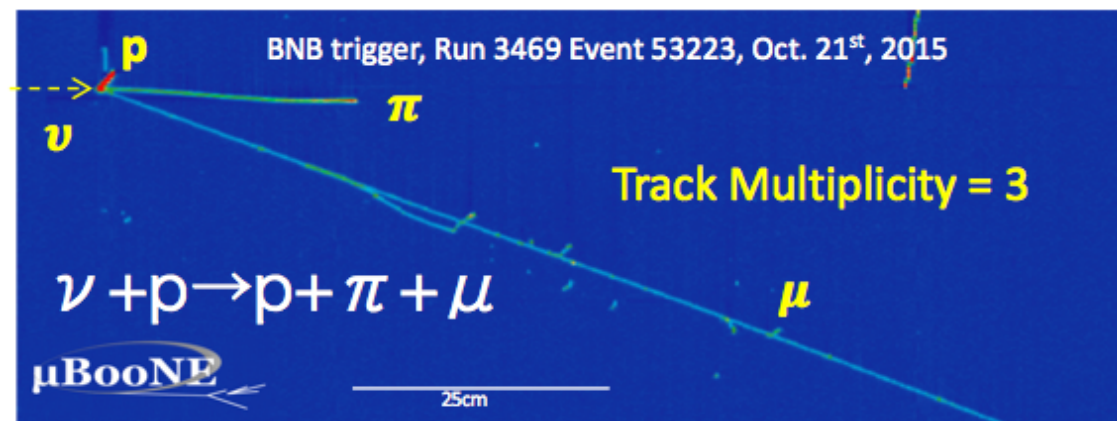


- ❖ アクティブ媒質なTPC (今日の話はこちらがメイン)

TPC内の媒質(gas or liquid)が物理事象のtargetや源

例えば、暗黒物質、 $0\nu\beta\beta$ 、ニュートリノ  
検出器など

例：FNAL microBooNE実験  
液体アルゴンTPCによるニュートリノ  
原子核反応の例



# Active媒質TPCの応用例：こちらも多くの実験・プロジェクトで応用、R&Dされている

- ・ 暗黒物質実験
  - ・ 液体希ガス検出器：XENON, PandaX, ZEPLIN, LUX, LZ, DARWIN(2相式液体キセノンTPC), WArP, ArDM, ANKOK, DarkSide, ARGO(2相式液体アルゴンTPC)
  - ・ ガス検出器：DRIFT, NEWAGE, DMTPC, CYGNUS(TPC+MPGD)
- ・  $0\nu\beta\beta$  実験
  - ・ 高圧ガスTPC：NEXT, AXEL, PandaX-III
  - ・ 液体希ガス検出器：EXO
- ・ ニュートリノ検出器
  - ・ 液体希ガス検出器：ICARUS T600, MicroBooNE, SBND, LArIAT, DUNE-SP, ProtoDUNE-SP, ArgonCube, Vertical Drift(1相式), DUNE-DP, ProtoDUNE-DP, WA105, ARAIDNE, LArTPC@KEK (2相式)
  - ・ 高圧ガスTPC：DUNE NearDetector(MPD)
- ・ X線、 $\gamma$ 線検出器
  - ・ ガス検出器：HARPO, SMILE-II

たぶん抜けてる実験が多くあると思います。

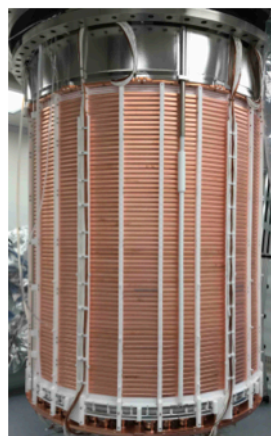
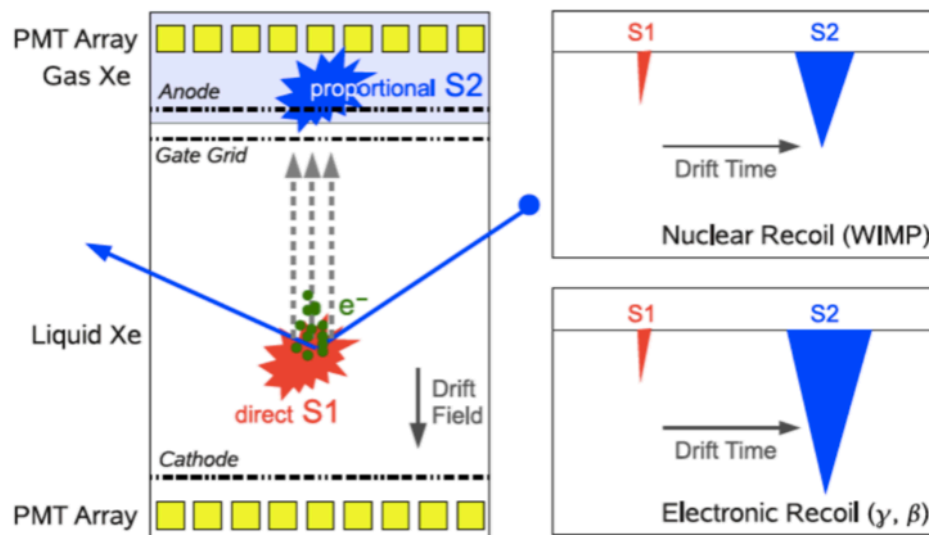
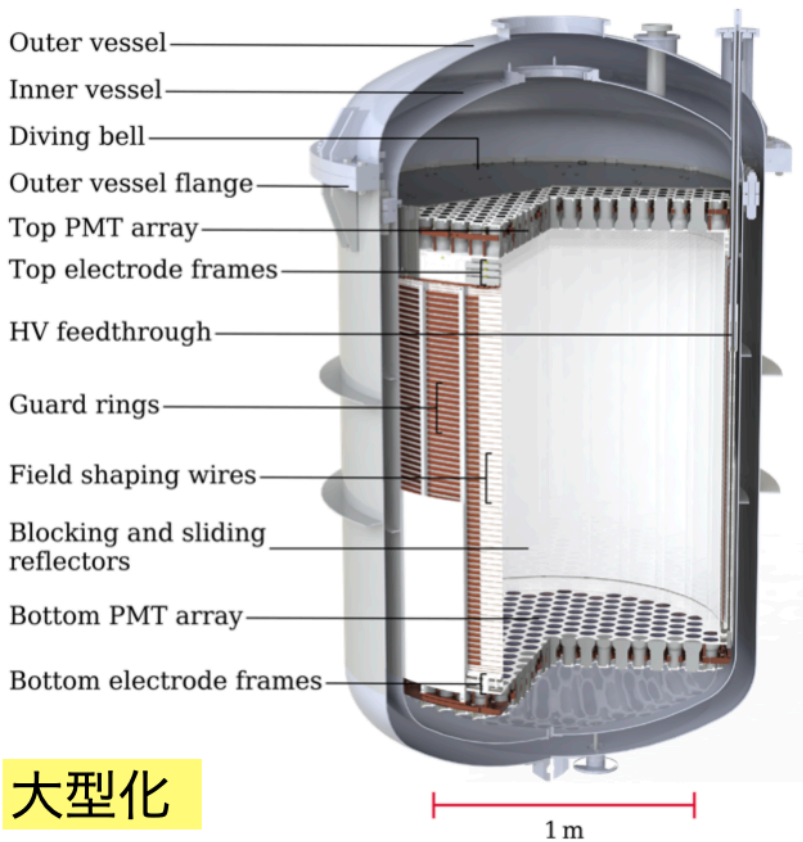
その他にも中性子イメージング検出器など



# Active媒質TPCの応用例@World : XENONnT

ドリフト時間から発生点の再構成(TPC)  
S1,S2比などからNR,ERの区別

## 暗黒物質探索実験の2相式液体キセノン検出器

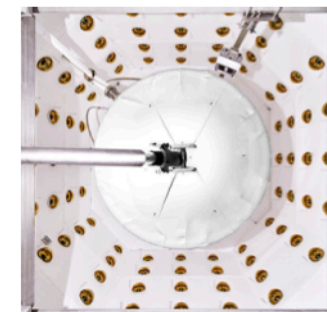


TPC (5.9 t LXe, 4 t fiducial), 1.3 m diameter, 1.5 m tall

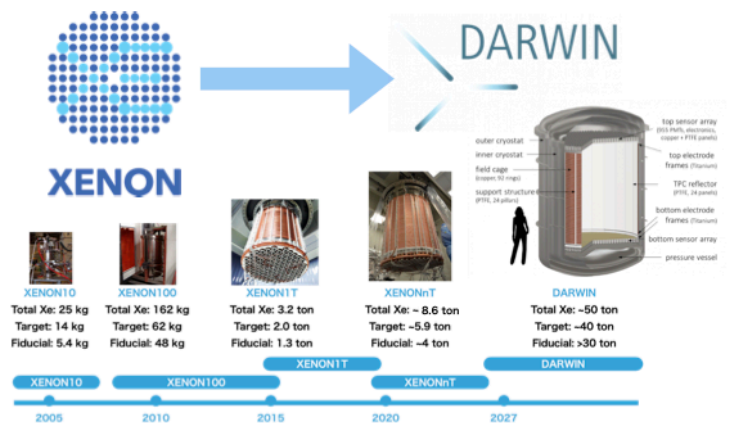


PMT array (494 PMTs in total, in 2 arrays)

Neutron Veto: Kamioka technology:  
Gd loaded Water Cherenkov detector



## 大型化



LXe purification system (5 L/min LXe, faster cleaning; 2500 slpm)



Contributions from JP group

Rn distillation column (reduce  $^{222}\text{Rn}$  - hence also  $^{214}\text{Bi}$  - from pipes, cables, cryogenic system)



# 国内の活動

- ・ MPGD、TPC開発は以前から国内でも開発研究が活発
  - ・ MPGD研究会 2004年から開催
  - ・ KEK DTPではMPGDグループやLiqTPCグループの活動も
  - ・ 近年ではアクティブ媒質TPC座談会の開催(2015年から)
- ・ MPGD+アクティブ媒質TPC合同研究会を2019年、2020年開催

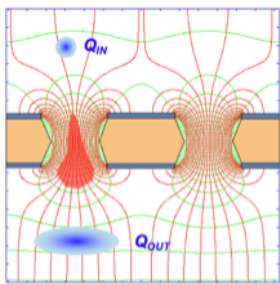
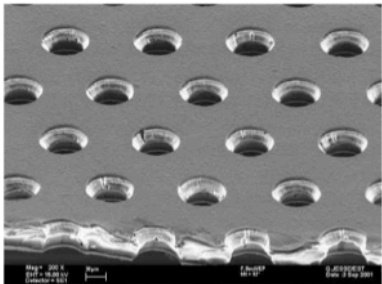
最近の国内の活動として、主に過去3回の研究会のスライドから紹介します

2019.03 @神戸 アクティブ媒質TPC開発座談会 <https://conference-indico.kek.jp/event/66/>

2019.12 @RIKEN MPGD&アクティブ媒質TPC2019研究会 <https://indico2.riken.jp/event/3144/>

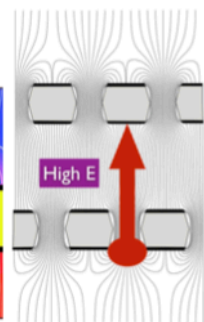
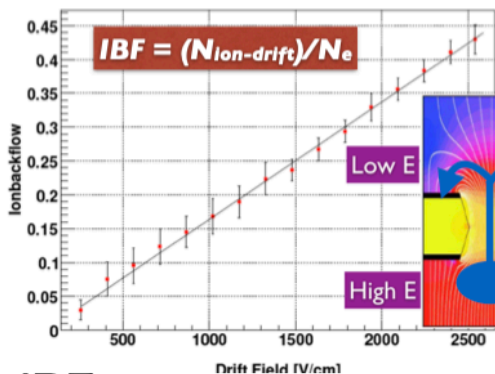
2020.12 @神戸 MPGD&アクティブ媒質TPC2020研究会 <https://conference-indico.kek.jp/event/120/>

# CERN ALICE実験のTPC



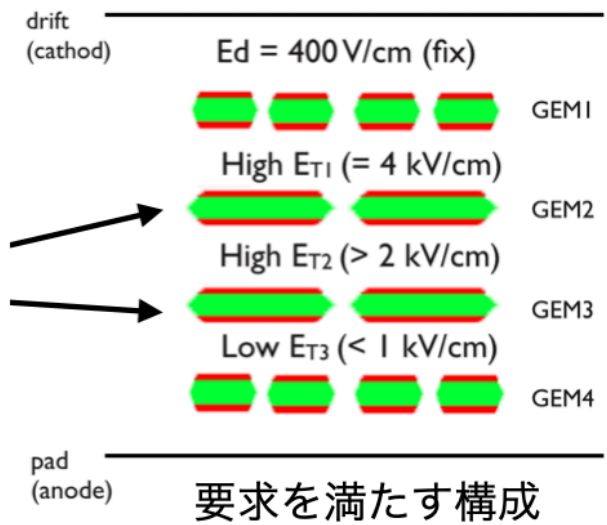
- high rate capability ( $< 1 \text{ MHz/mm}^2$ )
- ion backflow suppression
- fast signal
- safer operation by stacking GEMs
- Less ExB effect
- ...

Standard GEM : 50um insulator (Kapton)+5um copper layers on both sides,  $\phi \sim 70\text{um}$ , pitch  $\sim 140\text{um}$



If IBF is good under 50 kHz Pb-Pb, TPC can run continuously without any gating.

Goal: @Gain=2000  
IBF < 1%  
 $\sigma(dE/dx) < 12\%$  for  $^{55}\text{Fe}$

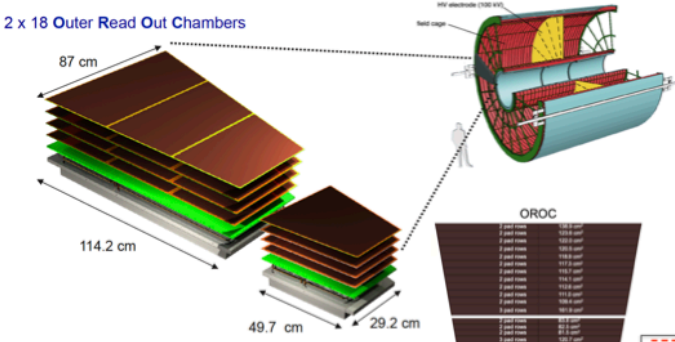


ALICE

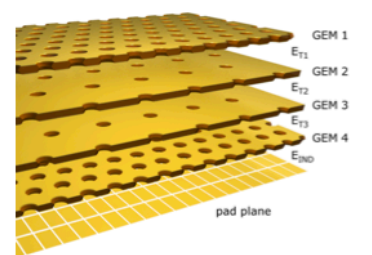
郡司(東大)  
et. al.

IBF = ions from escaping into drift space (= "ion backflow")

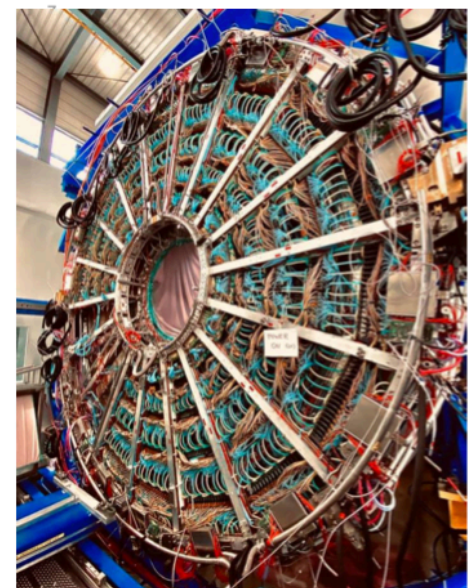
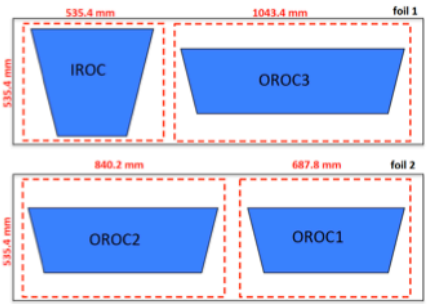
## GEM mass production



ALICE



OROC	
1. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
2. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
3. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
4. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
5. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
6. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
7. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
8. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
9. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
10. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
11. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
12. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
13. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
14. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
15. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
16. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
17. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
18. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
19. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
20. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
21. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
22. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
23. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
24. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
25. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
26. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
27. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
28. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
29. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
30. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
31. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
32. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
33. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
34. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
35. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
36. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
37. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
38. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
39. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
40. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
41. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
42. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
43. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
44. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
45. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
46. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
47. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
48. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
49. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
50. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
51. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
52. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
53. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
54. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
55. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
56. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
57. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
58. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
59. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
60. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
61. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
62. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
63. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
64. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
65. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
66. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
67. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
68. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
69. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
70. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
71. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
72. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
73. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
74. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
75. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
76. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
77. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
78. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
79. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
80. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
81. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
82. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
83. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
84. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
85. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
86. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
87. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
88. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
89. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
90. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
91. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
92. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
93. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
94. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
95. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
96. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
97. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
98. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
99. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>
100. pad plane	120.0 cm <sup>2</sup>



Completion of GEM and FEC installation in 2019

- 40xIROC, 40xOROC
- 640x GEMs + 10 % spares
- GEM foil production at CERN PCB workshop
- GEMs are produced on sheets containing 2 GEMs of different size
- GEMs are segmented in one side.

TPC内に溜まるイオンによる電場の歪みの補正を機械学習で行うR&Dも進行中

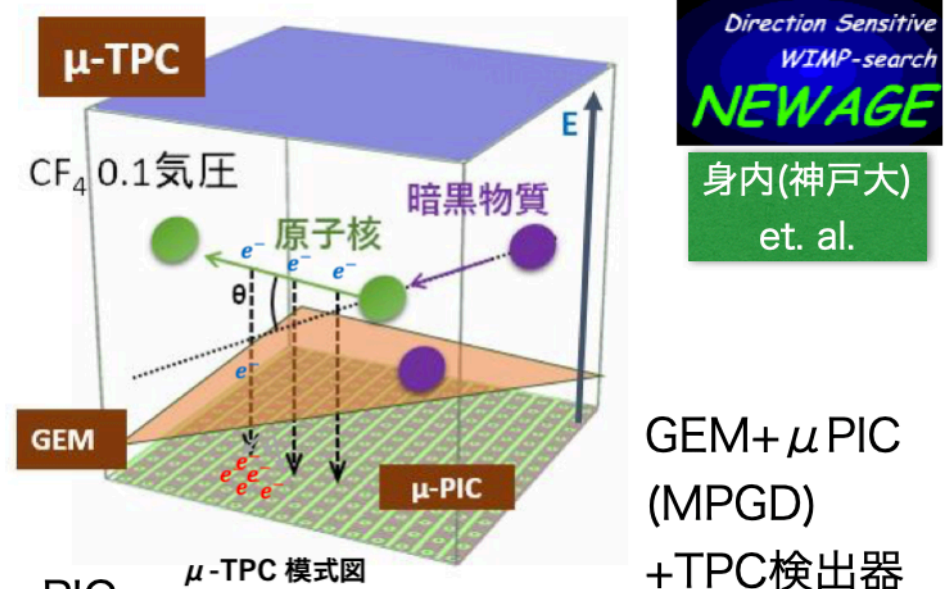
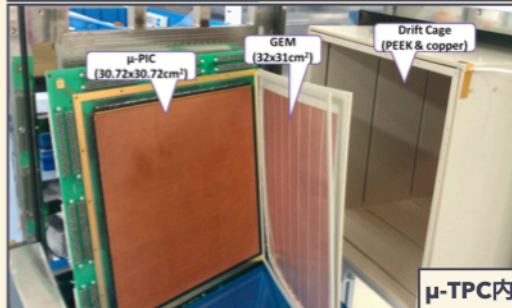
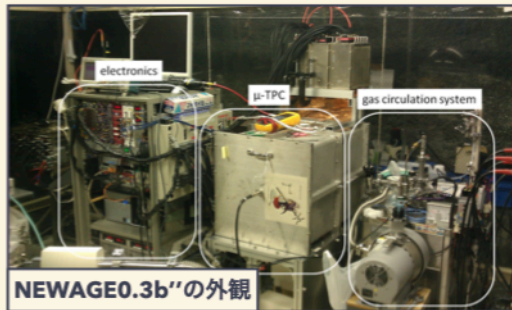
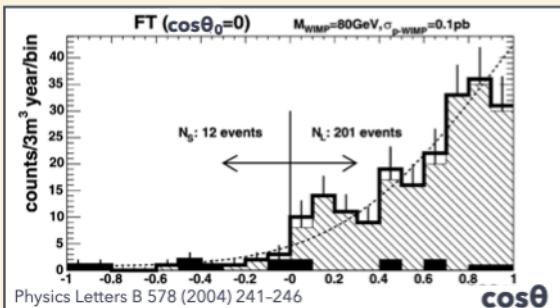
# INRODUCTION -NEWAGE実験-

- NEWAGE : 方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験
  - 場所 : 神岡地下研究施設
  - 検出容量 :  $31 \times 31 \times 41 \text{ cm}^3$
  - ガス :  $\text{CF}_4$  76Torr

μ-PICとμ-TPCを用いて  
暗黒物質の到来方向異方性の観測を目指す

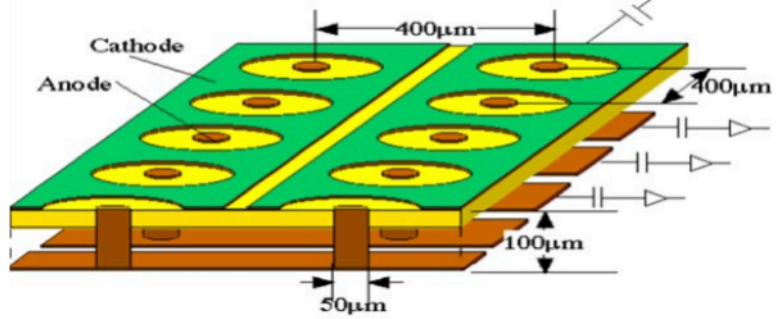


到来方向異方性は暗黒物質の強い証拠



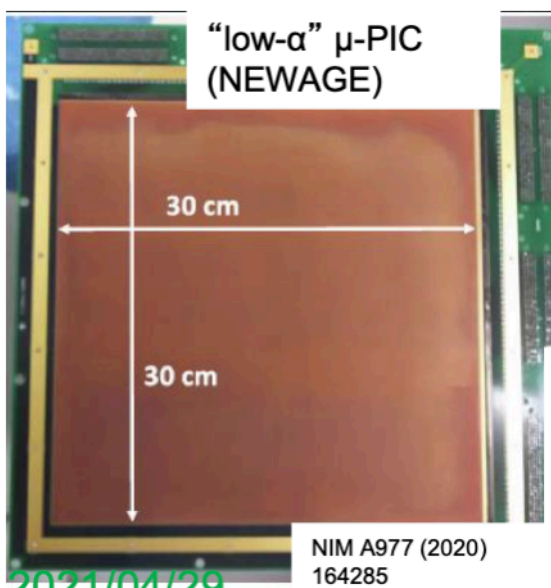
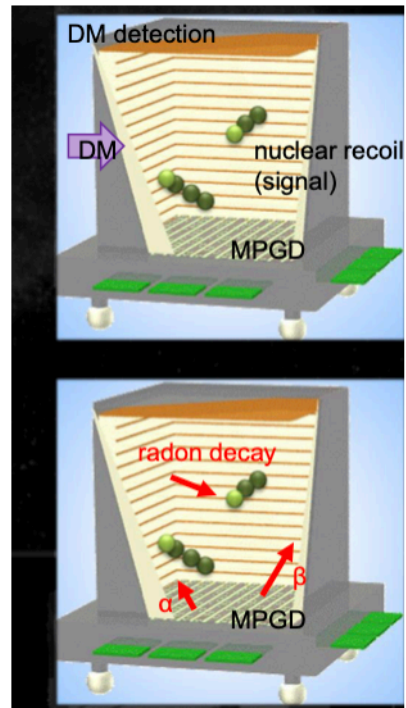
## μPIC

- 特徴:
- 個々のpixelでガス増幅
  - 大きな増幅率: max ~1500
  - 高い位置分解能: RMS ~120um
  - 一様な応答性
  - 1ヶ月以上の連続安定(@gain ~6000)



現在の主な背景事象の1つがμPIC表面からの放射線 → 低BGのμPICの開発

Sample	$4.8 \text{ MeV} < E < 5.8 \text{ MeV}$	$2.5 \text{ MeV} < E$
Standard μ-PIC	$(1.62 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 0.3(\text{sys.})) \times 10^{-2}$	$(1.27 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.2(\text{sys.})) \times 10^{-1}$
Low-α μ-PIC	$(2.1 \pm 0.5(\text{stat.})) \times 10^{-4}$	$(5.5 \pm 0.7(\text{stat.})) \times 10^{-4}$



clean material

clean environment  
for fabrication, storage

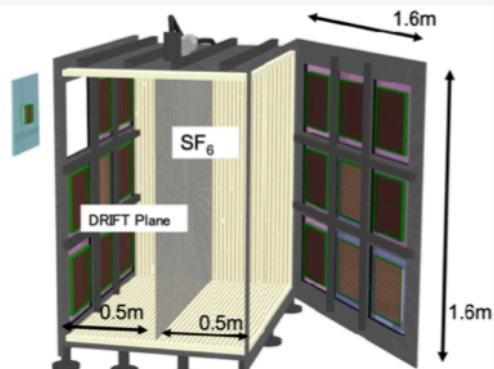
# 大型化

## 次世代実験：CYGNUS-KM / NEWAGE

• ~1.0 m<sup>3</sup> サイズの大型ガスチェンバーを神岡に設置する計画

→ 読み出しモジュールを18個実装可

→ ターゲットの物質質量を増やして感度向上を狙う



CYGNUS/NEWAGE vessel  
40cm modules



## 高抵抗シートを用いたフィールドケージ



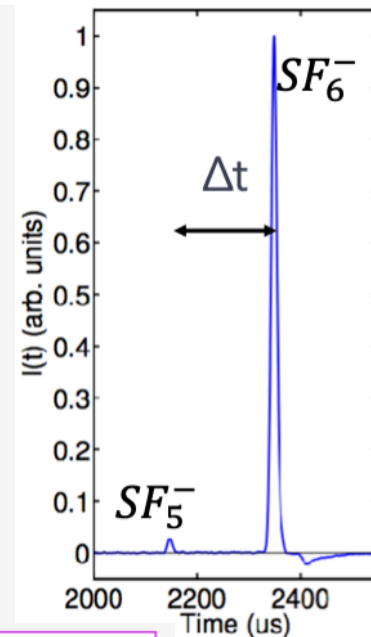
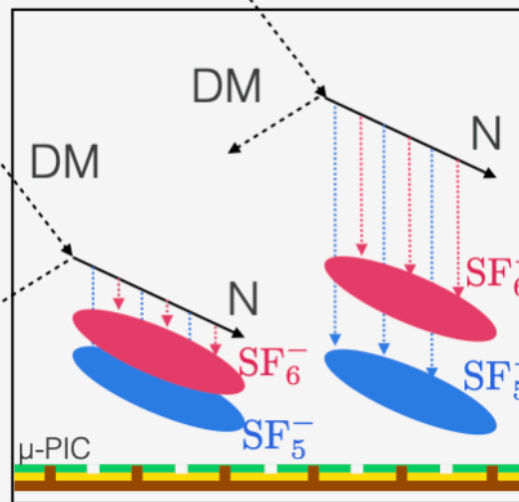
Table 1 List of candidates for the field-cage material of the SRμ-TPC.

product name	material	size (shipped) [m <sup>2</sup> ]	thickness [mm]	sheet resistivity	
				[×10 <sup>10</sup> Ω/□]	trend
Semitron Esd	Polyacetal	0.3×0.6	6	1 ~ 10 (along 0.6 m)	
Antistatic film	Polyolefin	1×200	0.05	1 ~ 100	
Antistatic PVC sheet	PVC	1.37 ×30	0.3	2.0 ± 0.2	15%/m
Achilles-Vynilas	PVC	1×10	0.2	3.3 ± 0.3	< 1%/m
DPF-arutoron	PVC	1.83×50	0.1	> 100	

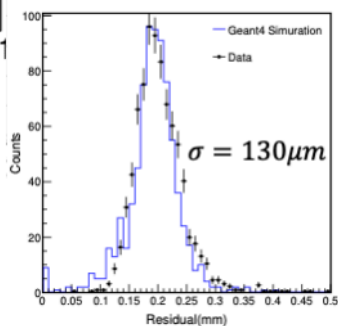
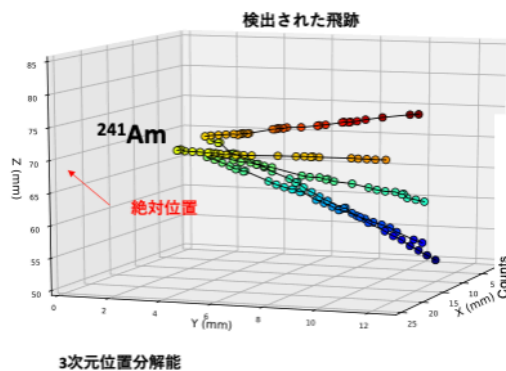
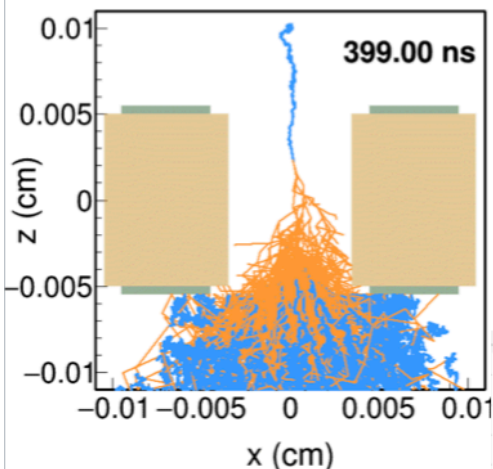
PTEP 2019 (2019) 6, 063H01

## 陰イオンガスTPC

時間差を見ればドリフト方向の絶対位置測定可、かつ低拡散

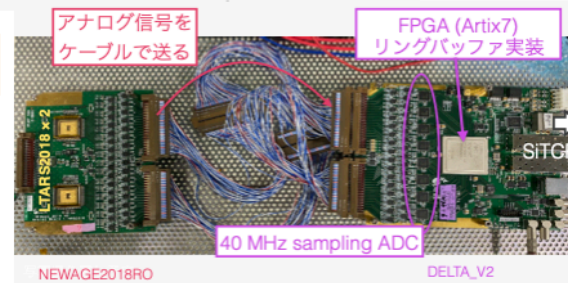


## Garfield++, 実測による陰イオンガス+MPGD動作の理解

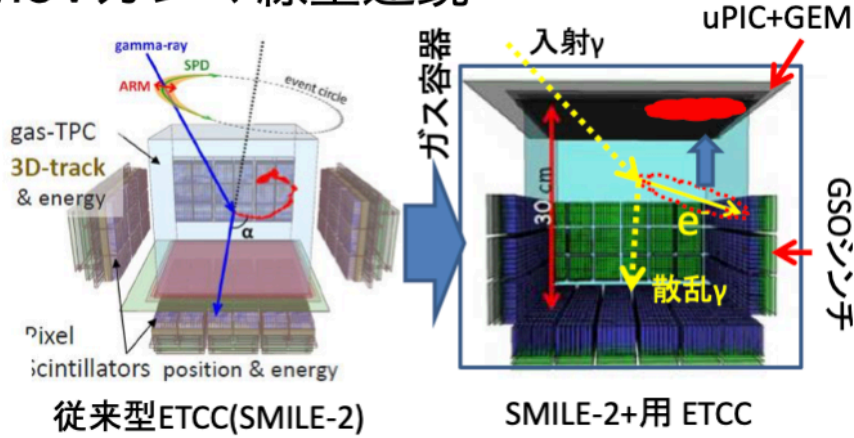


- 電子のAttachから陰イオンを生成
- 陰イオンのドリフト
  - 電子より遅い (~10cm/ms)
  - 電場により異なる速度
    - 初期イオン徐々に速度が上がっている
  - 陰イオンの拡散
- Detachmentによる電子生成
- GEMでのガス増幅
- 再Attachmentで陰イオンを生成

## 読み出しエレキ開発



# MeVガンマ線望遠鏡



## μ-PIC応用

- ✓ MeVガンマ線望遠鏡  
Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)  
μ-PIC + 位置検出型シンチレータアレイ
- [要求①] 電子飛跡決定精度の向上
- [要求②] μ-PIC単体でのMIP粒子検出  
(GEMなし):ゲイン~15,000
- ✓ 中性子イメージング検出器  
[要求] 位置分解能 < 90 μm



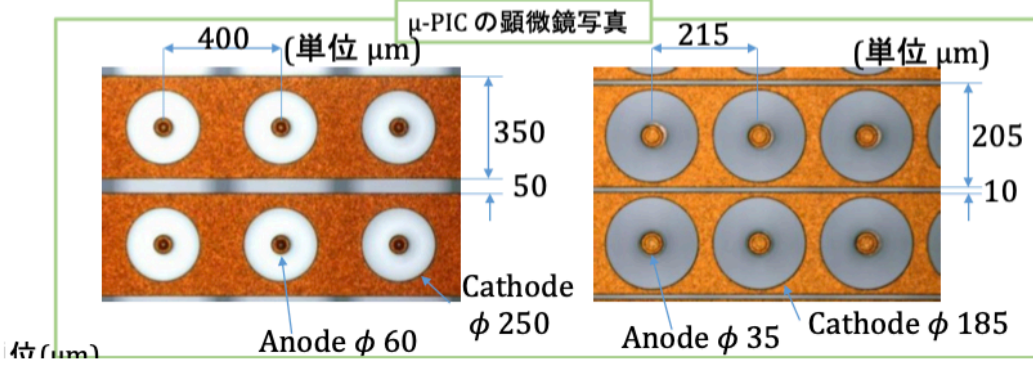
谷森(京大)  
et. al.

福島原発の放射線  
モニタリングにも  
応用

## 高ゲイン化に向けた開発

### ガラス基板を使ったμ-PIC(TGV μ-PIC)

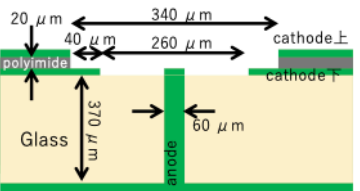
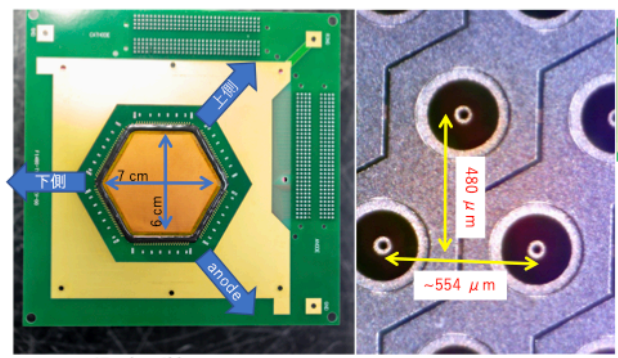
- ・大日本印刷と共同で開発
- ・TGV(Through Glass Via)技術により高アスペクト比のAnode形成が可能
- ・ピッチ間隔400 μm(5 cm角)、215 μm(3 cm角)の2種類の素子を製作



## 高位置分解能に向けた開発

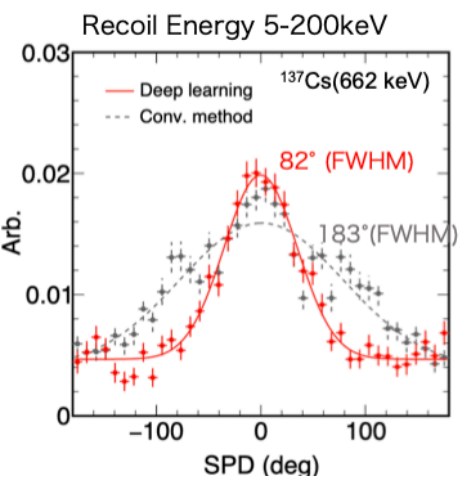
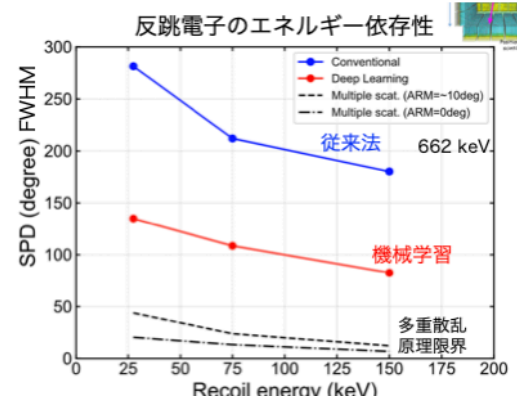
### 製作した3軸 μ-PIC

大日本印刷との共同研究による開発



- TGV(Through Glass via) μ-PIC
- 各軸のなす角は120°
- 各軸に128 strip
- Strip電極のpitch : 480 μm
- Pixel間距離 : ~554 μm

## 機械学習による 点源分解能向上



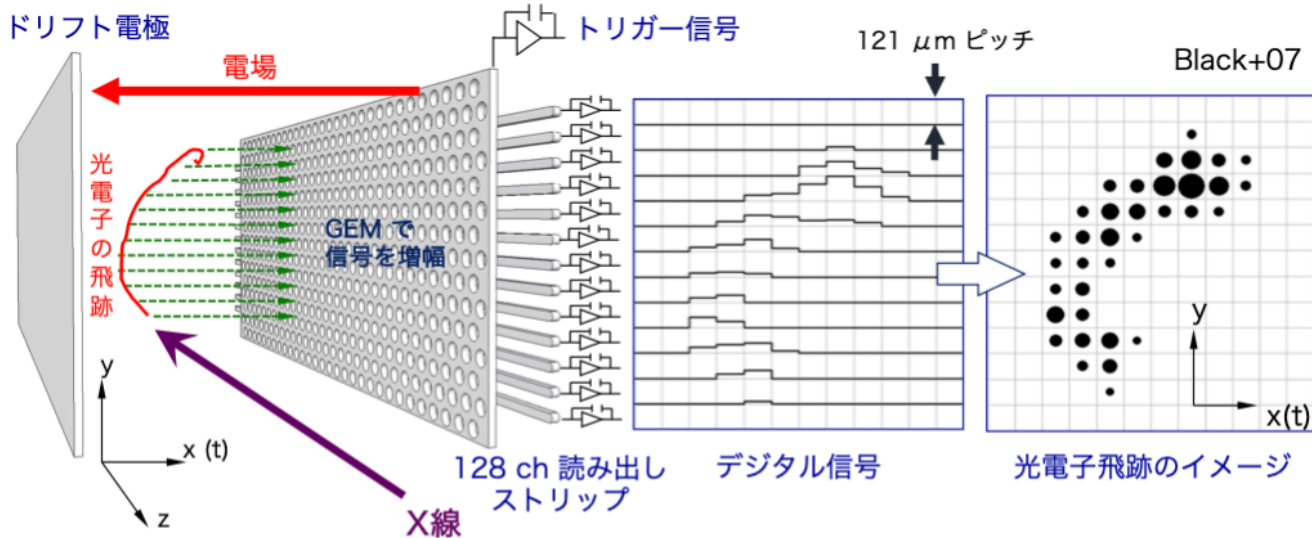
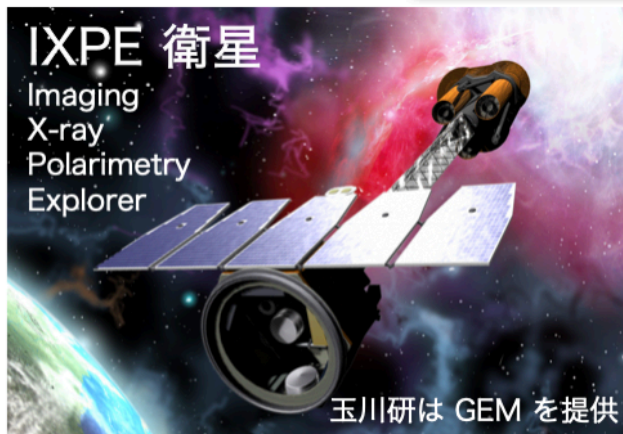
662keVガンマ線のSPD(FWHM)

	シミュレーション	実験
従来法	258°	183°
機械学習	94°	82°

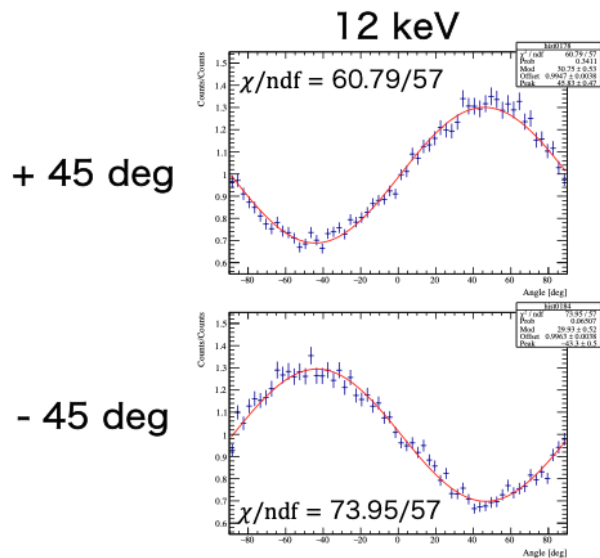
- ✓ 実験でもシミュレーションと同程度のSPD=82度を達成
- ✓ シミュレーションが実験をうまく再現していることを示唆
- SMILE2+検出器のデータでも、CNNを使った解析は有効な手段

# TPC X線偏光計

玉川(理研)  
et. al.

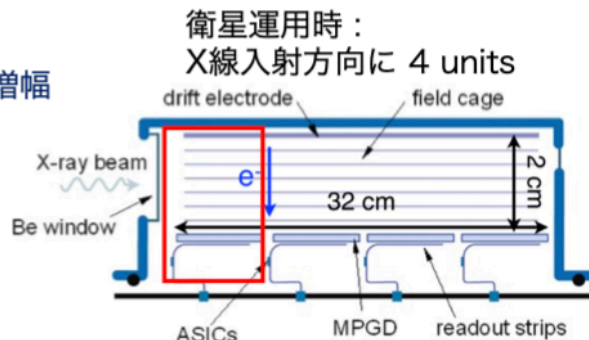


## ビームテストの結果



12 keV		
変調因子	+ 45 deg	34.2 +/- 0.6 %
	- 45 deg	33.2 +/- 0.6 %

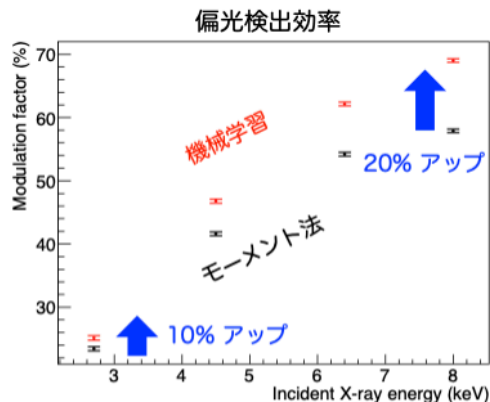
- 光電子の飛跡に沿って一次電子が生成 > GEM で増幅
- 信号を 128 ch のストリップで 1次元読み出し
- トリガーは GEM カソード信号から生成
- TPC 技術を利用により、2次元の飛跡画像を取得
- 飛跡画像から光電子放出方向を推定



我々は 1 unit を製作

4

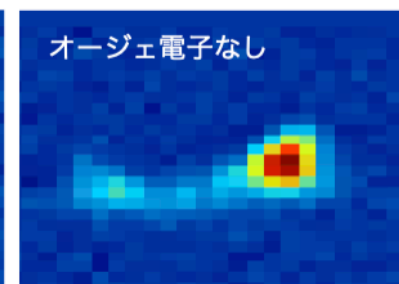
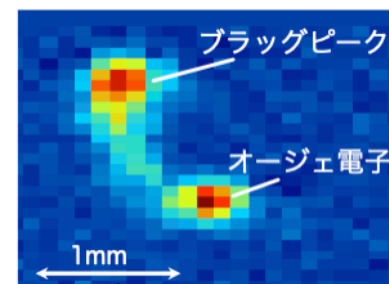
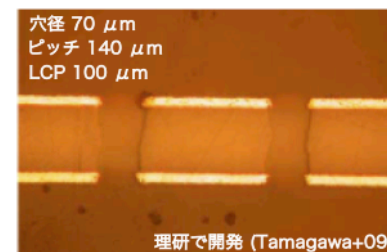
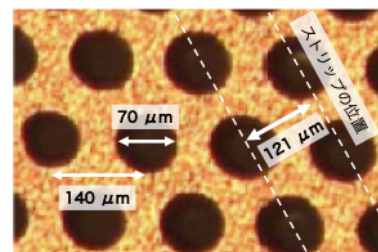
## 機械学習による改善



偏光検出効率  $\mu \times 10-20\%$  向上

1 週間の観測時間が 5 日に短縮可

## LCP-GEM

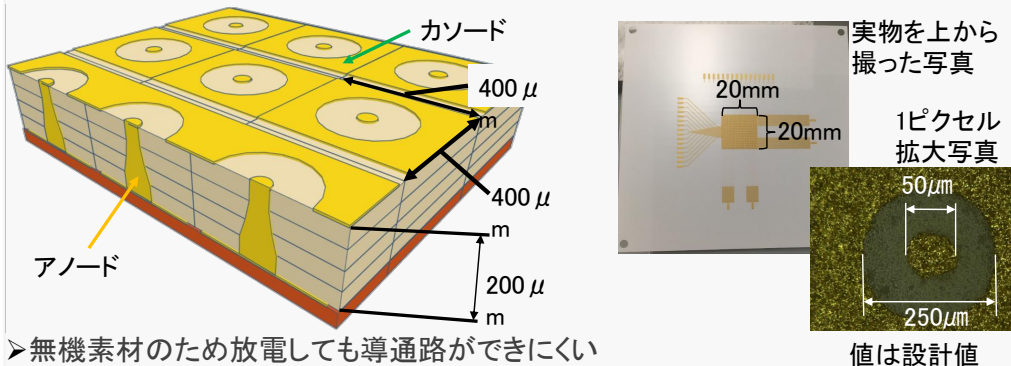


偏光計が高エネルギーX線の偏光に感度を持つこと確認

# LTCC $\mu$ -PICとは

➢MPGDの一種である $\mu$ -PICにLTCCという素材を用いた

➢LTCC-Low Temperature Co-fired Ceramics-(低温焼結セラミックス)は1000°C以下で焼成できて焼結前の加工が簡単



➢無機素材のため放電しても導通路ができにくい

➢小型の試作機を開発し、試験中

➢ポリイミドを使用した従来のものに比べ、放電に対する耐久性の向上が期待

2019/12/7

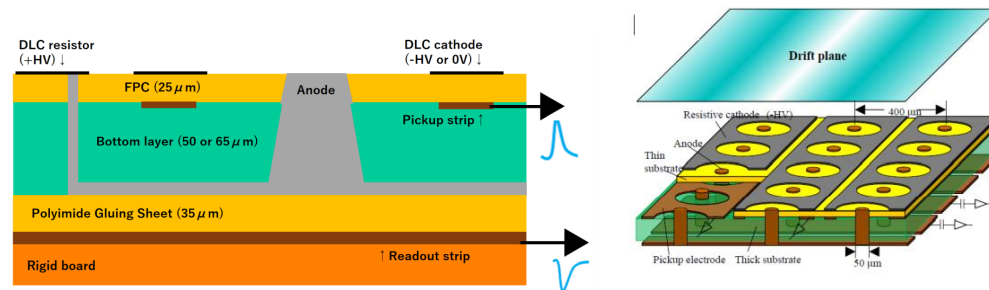
MPGD & TPC 合同研究会 説田

3

# DLC $\mu$ -PIC

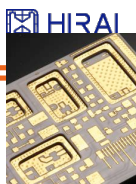
➢ 陰極にDiamond Like Carbon(DLC)を用いた $\mu$ -PIC

- 電極間で放電が発生した際に、陰極の抵抗でオームの法則に従い、電圧降下が発生し、ゲインを下げ、発生電子数をさげ放電を抑える→放電抑制

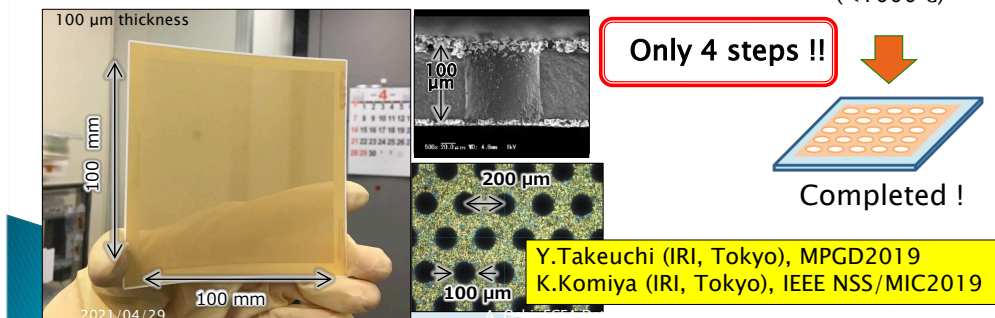
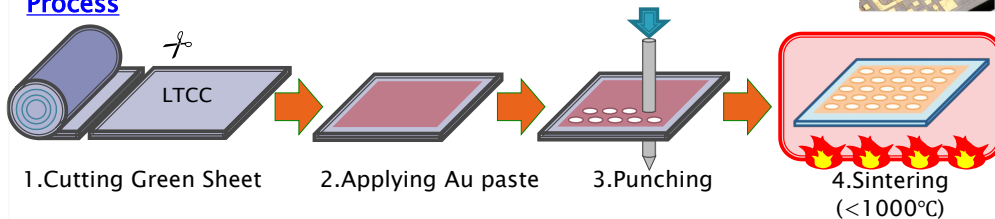


# Fabrication process of LTCC-GEM

- Manufactured by Hirai Seimitsu Kogyo Corporation, Japan
- Used for highly integrated circuits which embed electric parts



## Process



Y.Takeuchi (IRI, Tokyo), MPGD2019  
K.Komiya (IRI, Tokyo), IEEE NSS/MIC2019

MPGDの性能向上にむけて  
様々な素材の開発も行われている



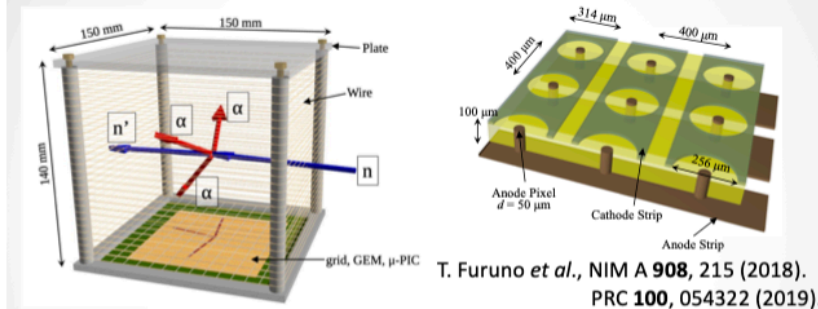
# 様々なMPGD検出器の応用、新しいアイデア、開発研究も

## $^{12}\text{C}$ と中性子の散乱断面積測定

古野(阪大)  
et. al.

### MAIKoアクティブ標的

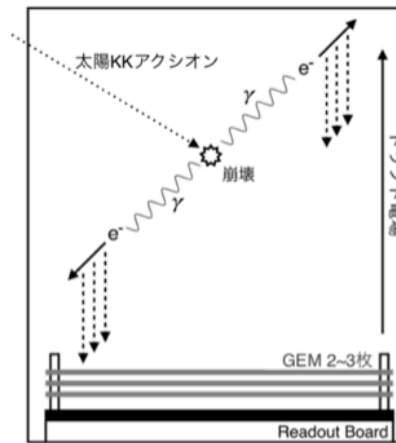
TPCの検出ガス =  $^{12}\text{C}$ 標的



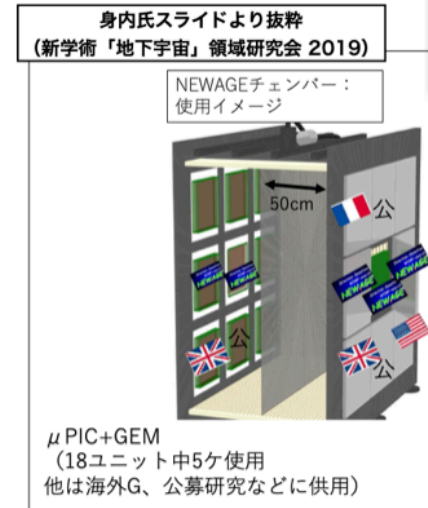
- ◆ 崩壊 $3\alpha$ をTPC内で検出。標的を厚くすることが可能。
- ◆  $\alpha$ 粒子のrangeからエネルギーを決定。
- ◆ 低圧ガス動作:  $\text{CH}_4$  50 hPa /  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (10%) +  $\text{H}_2$ (90%) 100 hPa
- ◆  $\mu\text{-PIC} + \text{GEM}$ による増幅
  - $\mu\text{-PIC}$  (gain $\sim$ 1000): 2次元ストリップ読み出し (400  $\mu\text{m}$  pitch).  
256A+256C = 512 ch.
  - GEM (gain $\sim$ 30): 140  $\mu\text{m}$  pitch,  $d=70 \mu\text{m}$ ,  $t=100 \mu\text{m}$  (thick GEM)

## 低圧ガスTPCによる太陽KKアクシオン探索

細川(東北大)  
et. al.



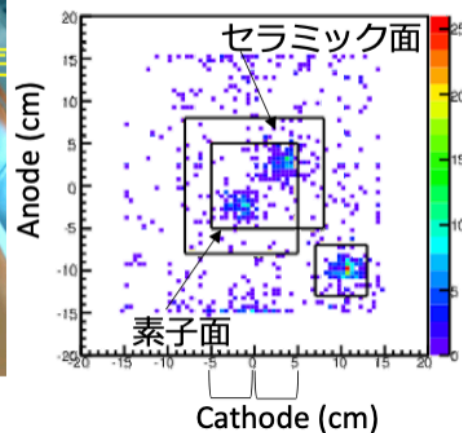
KKアクシオン探索に  
非常に適している！！



## 表面アルファ線イメージ分析

伊藤(理科大)  
et. al.

AXELグループからMPPC(故障品)を測ってみた



- ・ 大強度重イオンビーム照射用低圧ガスアクティブ標的 CAT
- ・ 超小型衛星搭載用GEM X線検出器
- ・ 中性子イメージング検出器
- ・ ミグダル観測への応用

backupスライドも参照して下さい 17

# AXEL実験



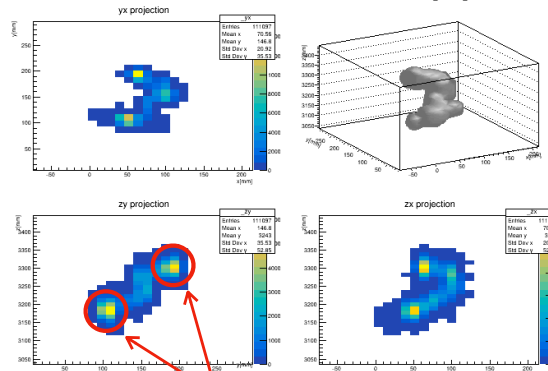
市川(東北大)  
et. al.

● 高圧キセノンガスTPC

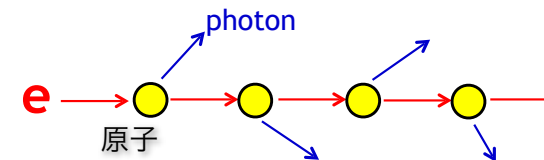
● 特徴

- 高圧キセノンガス → 安価に大型化が可能
- 高エネルギー分解能 → 背景事象の除去に有効
- 飛跡再構成

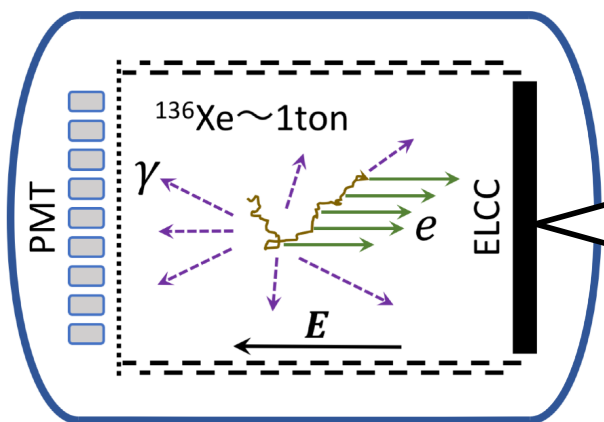
シミュレーションで得られた $0\nu\beta\beta$ の飛跡



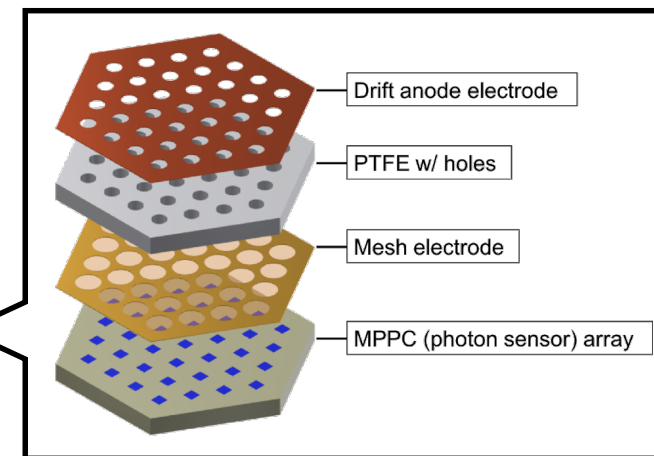
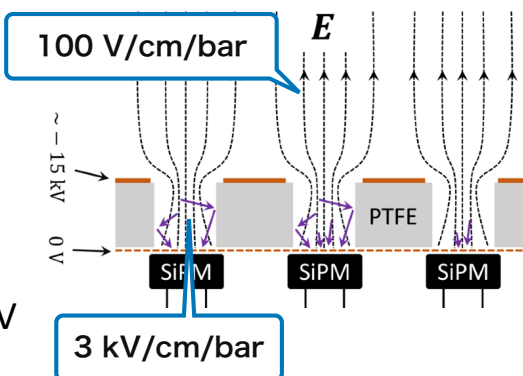
$0\nu\beta\beta$ の飛跡には2個のblobがある(終端が2個あるため)



✓ Xe1トン &&  $\Delta E=0.5\%$  (FWHM)@Q値を目指している



## ELCC (Electroluminescence Light Collection Cell)

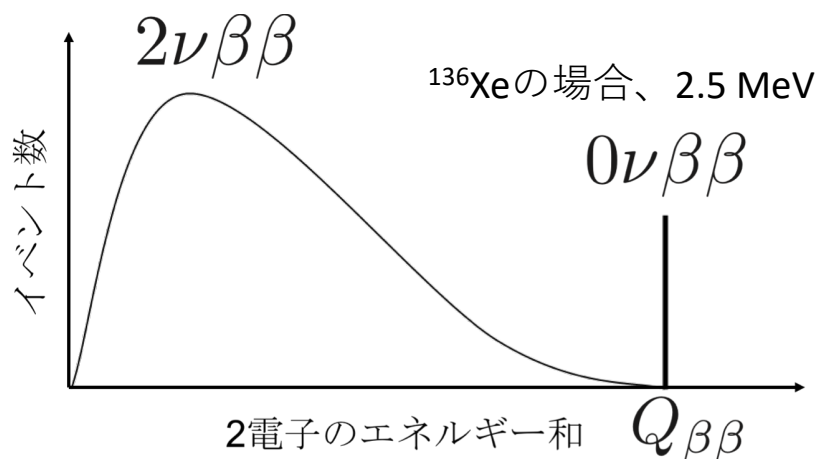


● EL過程を応用

- なたれ増幅をともなわない比例蛍光過程
- 分解能を保ったまま電離電子を光子に変換・増幅が可能

● モジュール構造

- 大型化が容易
- 堅牢な構造のため、位置依存性が生じにくい



# 大型化にむけた180L試作機でのR&D



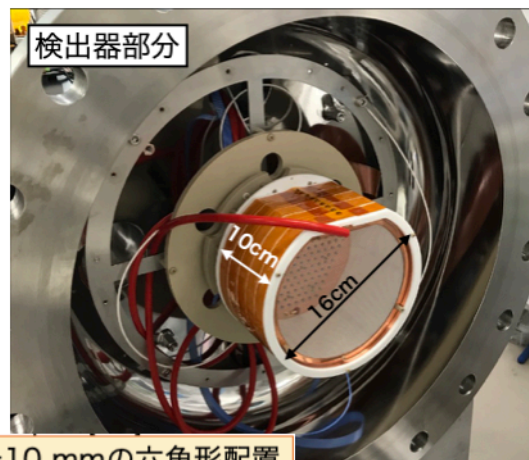
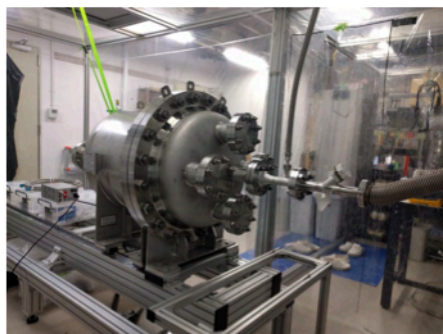
## 10-L prototype

2014-2018

- ~0.05 kg @8 bar
- ELCCの原理検証
- 分解能評価 $\leq 356$  keV



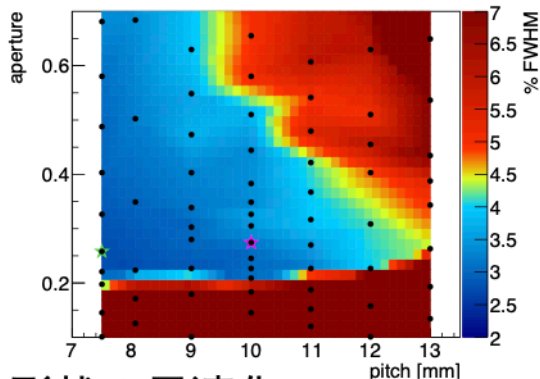
## 180L試作機



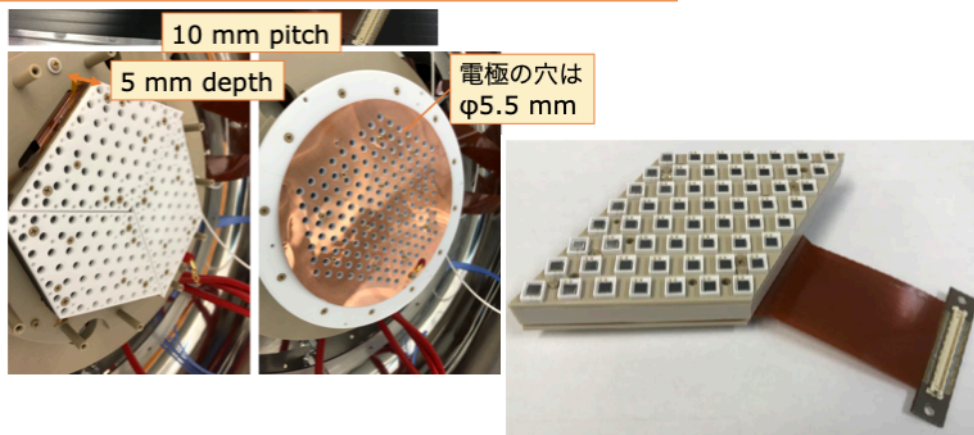
深さ 5 mm, 穴径 5.5 mm, ピッチ10 mmの六角形配置

## ELCC開発

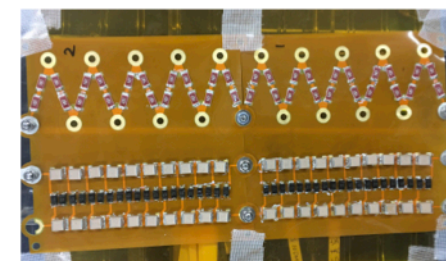
Simulated energy resolution for 30keV e-



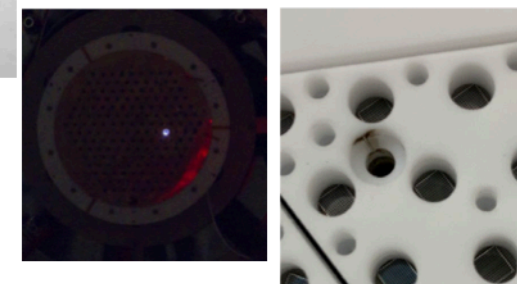
## 形状の最適化



- 各種要素技術開発
- フィールドケージ
- CW高電圧生成
- Readout elec.
- Gas循環・純化系

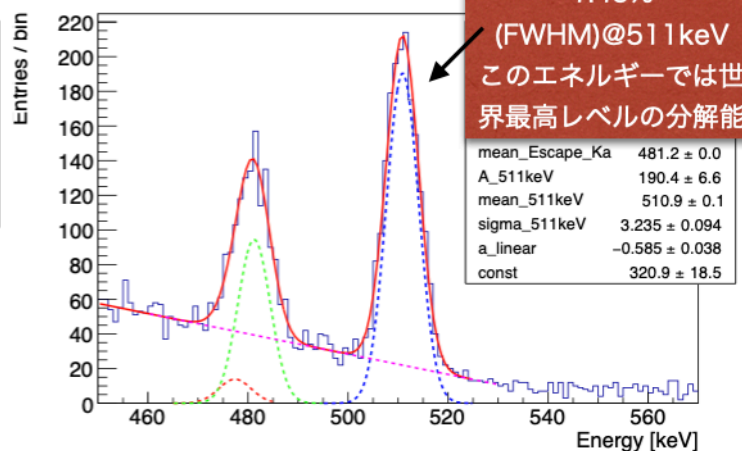
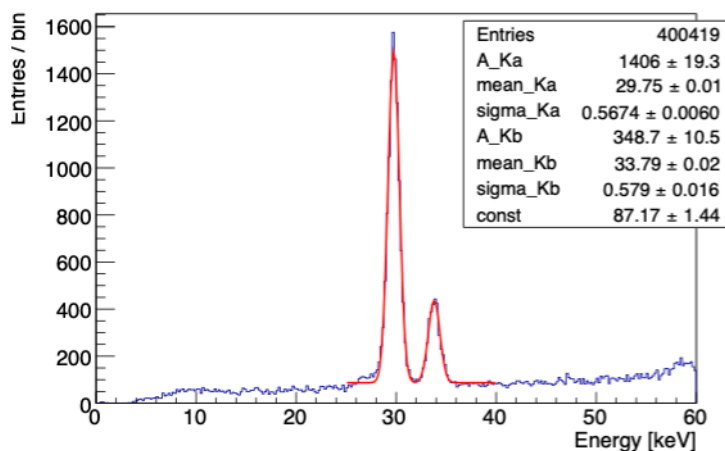


## 放電との戦い



→原因特定、改良

## 180Lでの性能評価：Q値でのエネルギー分解能:0.68%(FWHM)



背景事象0に向けた開発  
Baイオン読み出し

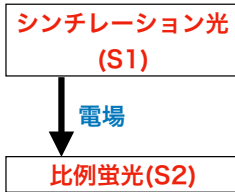
# 1相型液体キセノンTPCの球状化

関谷(東大)  
et. al.

## テストセットアップ でS2信号確認

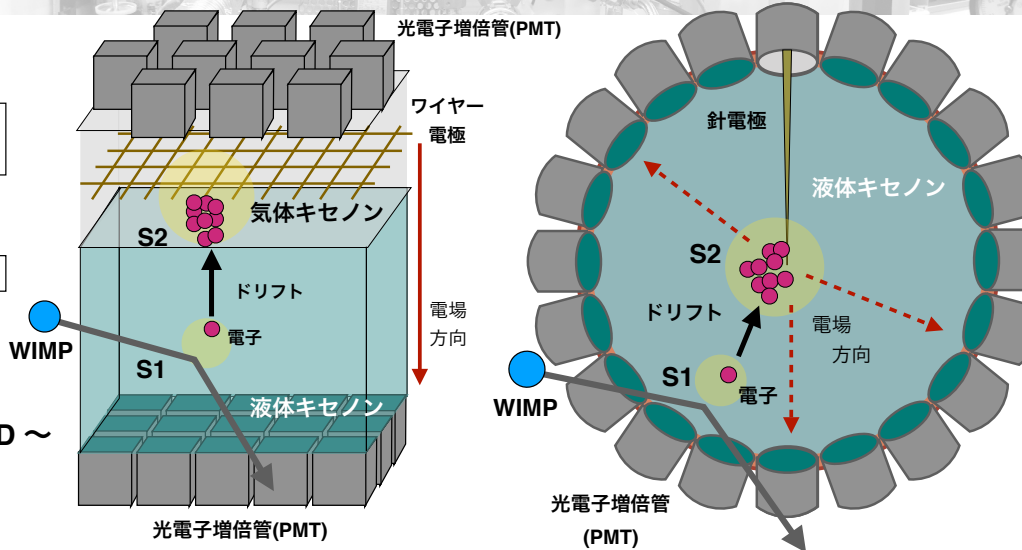
### 1相式 / 2相式 液体キセノン Time Projection Chamber

～TPCの原理～



～ S2/S1によるPID～

- $\alpha < n$  (原子核反跳)
- $< \gamma$  (電子反跳)



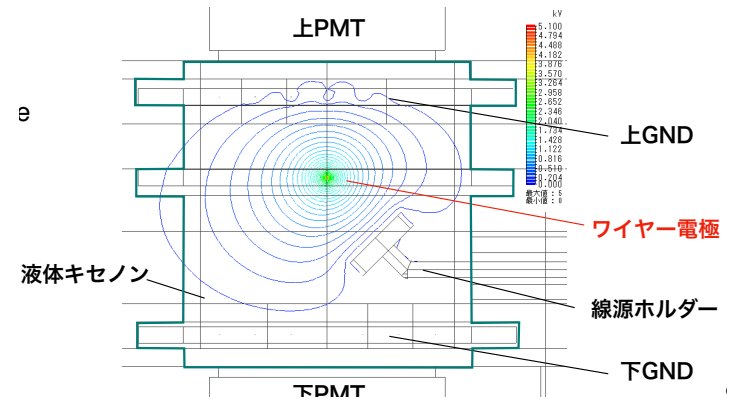
#### 2相式(液相+気相)TPC検出器

- 気相でのS2は約10 kV/cm
- 検出器の形状の自由度が低い
- XENON実験, LUX実験

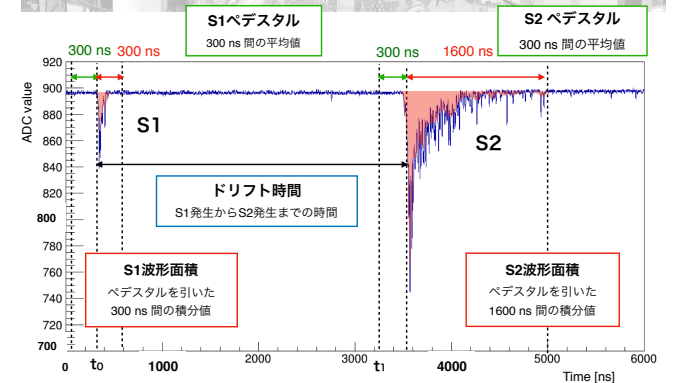
#### 1相式(液相)TPC検出器

- PMTで検出器を覆える検出器の設計が可能  
→ S1の観測できるエネルギー下限を下げられる
- 液相でのS2には約400 kV/cm以上
- 1相式TPCを用いた暗黒物質探索実験は無い

ワイヤー電極 5 kV印加時の電場シミュレーション結果

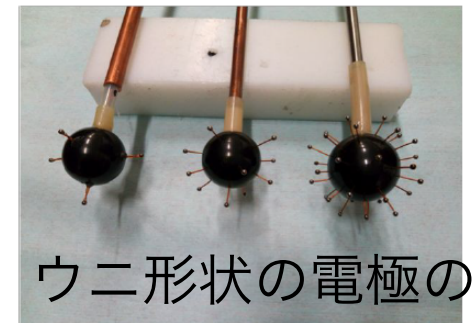
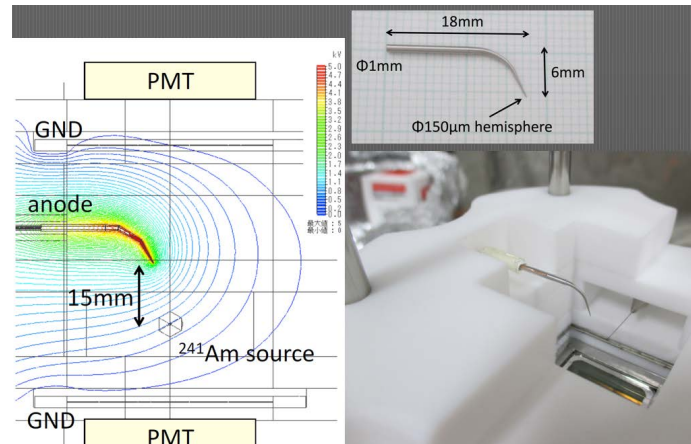
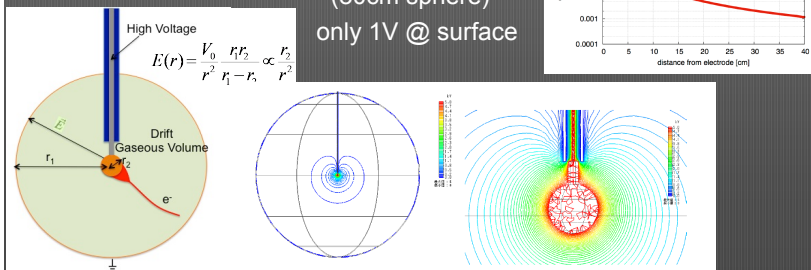


#### 実際の波形



#### Large Liquid spherical detector

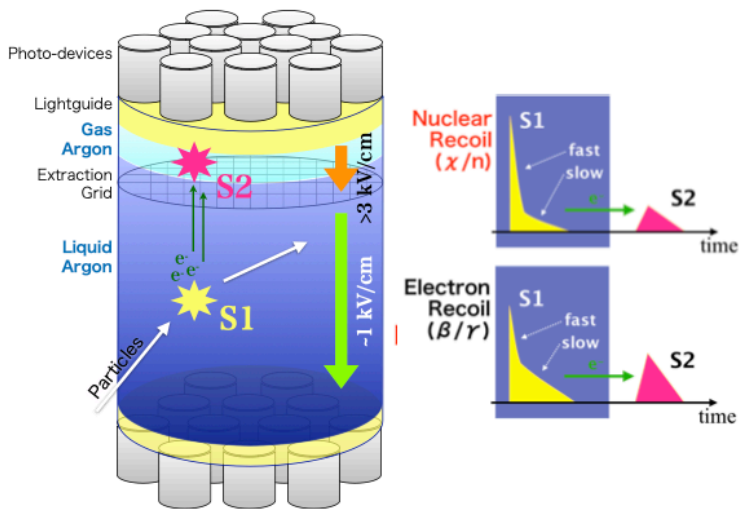
- 問題: low voltage @ surface  
- Simulation: 5kV 5mm ball in XMASS (80cm sphere) only 1V @ surface



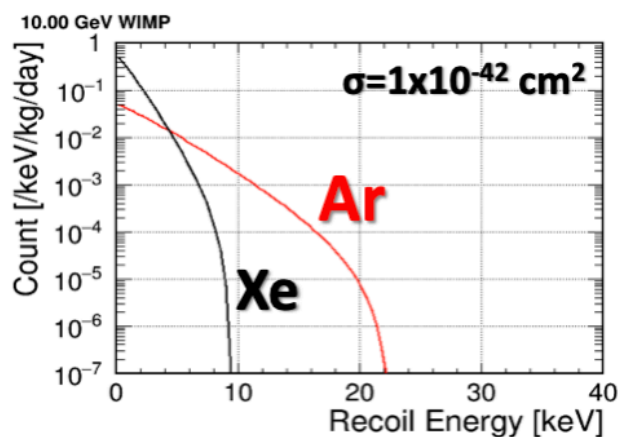
ウニ形状の電極の可能性

可能性

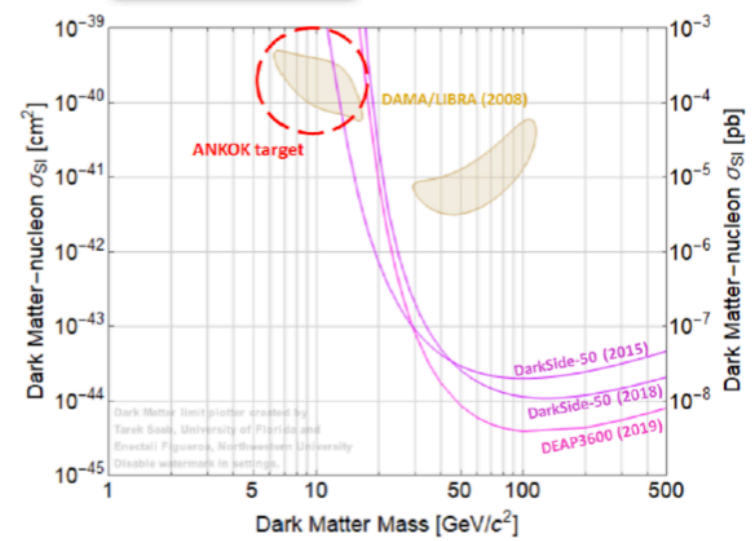
# ANKOK実験：気液2相型Ar光検出器



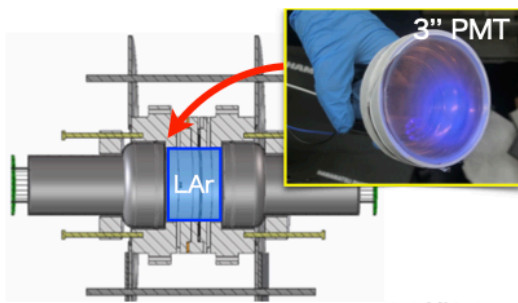
Arは低エネルギー事象に対して大きな信号量(~a few tens p.e./keVee)



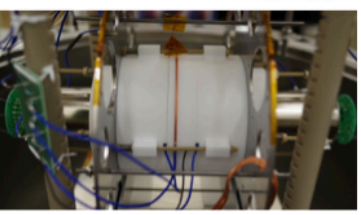
寄田(早大)  
et. al.



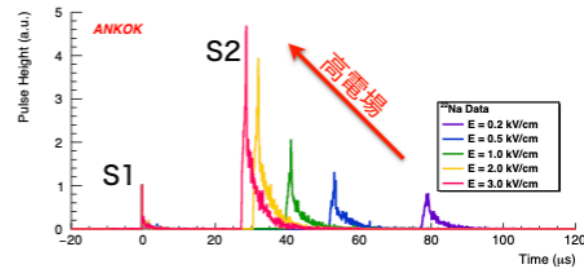
## 低エネルギー領域に特化した研究



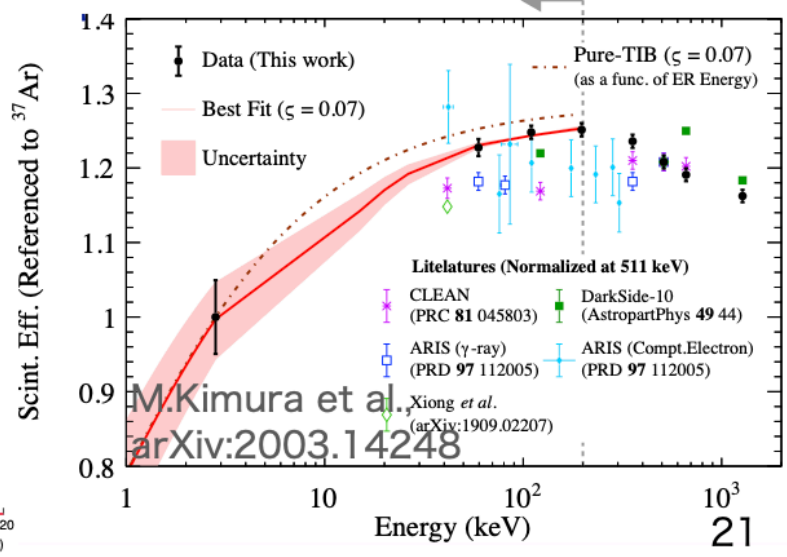
- 真空紫外光 (128 nm) の高効率検出 @ 極低温
  - 光検出器窓面や検出器内壁 (反射材) へ波長変換材 (TPB) を真空蒸着
  - 13 p.e./keV (PMT), ~25 p.e./keV (MPPC) を実証 (c.f. XMASS ~ 15 p.e./keV)



- 電離電子生成量の向上と電離信号検出効率の最大化
  - 高ドリフト電場の形成 (最大3 kV/cm)
  - 電離電子検出効率 ~100%
  - S2増幅率 >10 photon/e-



- 高感度アルゴン検出器による低エネルギー応答測定
  - 光量に特化した1相検出器 (電場なし) により, 10keV以下のシンチレーション応答を初めて測定
  - エネルギー依存性を関数化

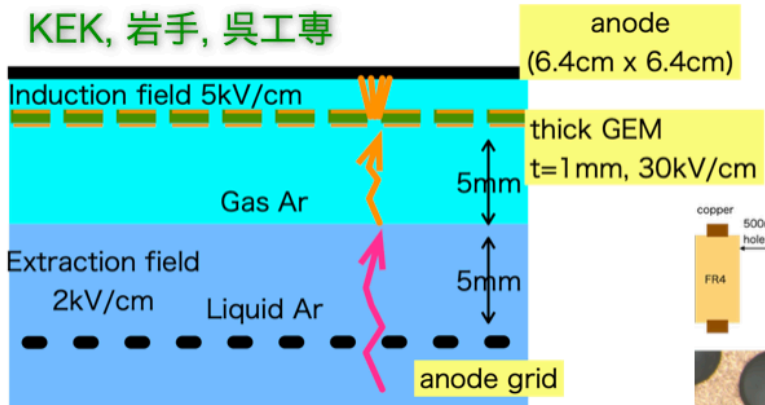


# 気液2相型液体アルゴンTPC開発

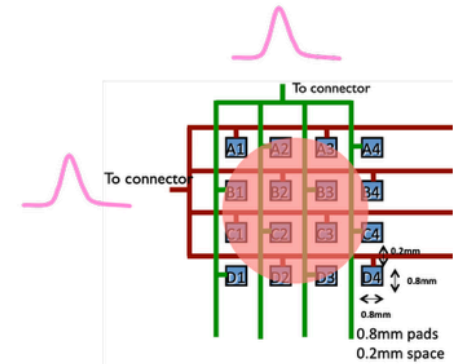
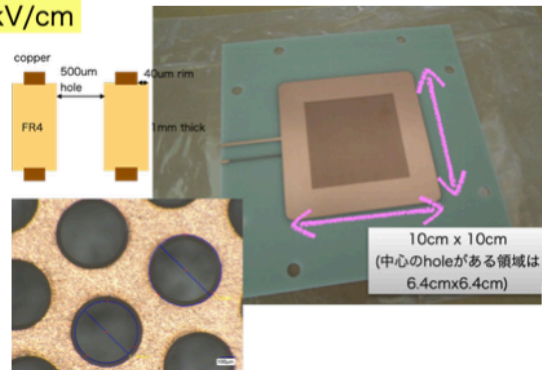
大型ニュートリノ検出器に向けた開発

液体TPC + THGEMによる信号増幅  
電離電子の電荷測定 → 3次元飛跡測定

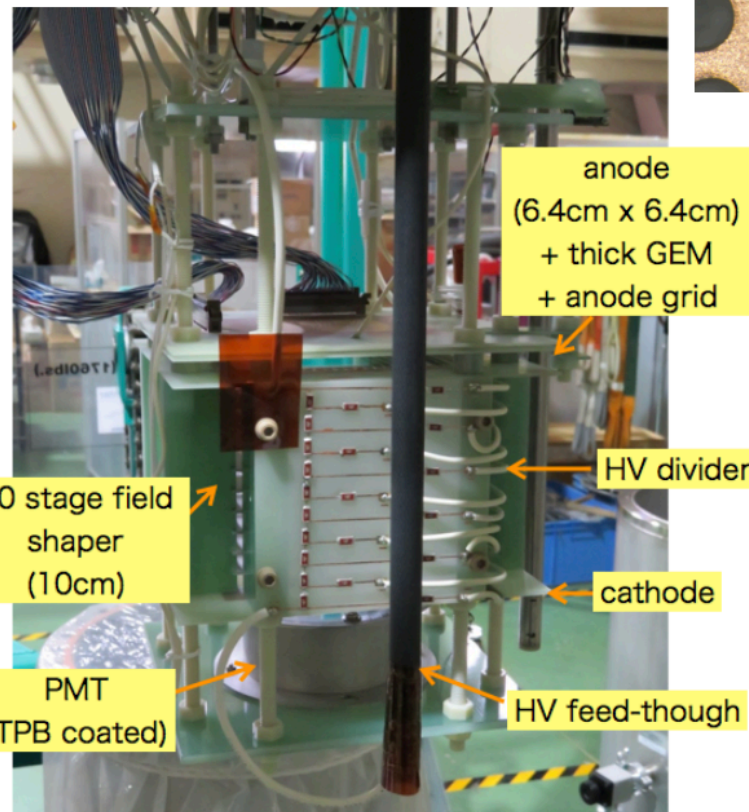
KEK, 岩手, 呉工専



t=1mmのTHGEM



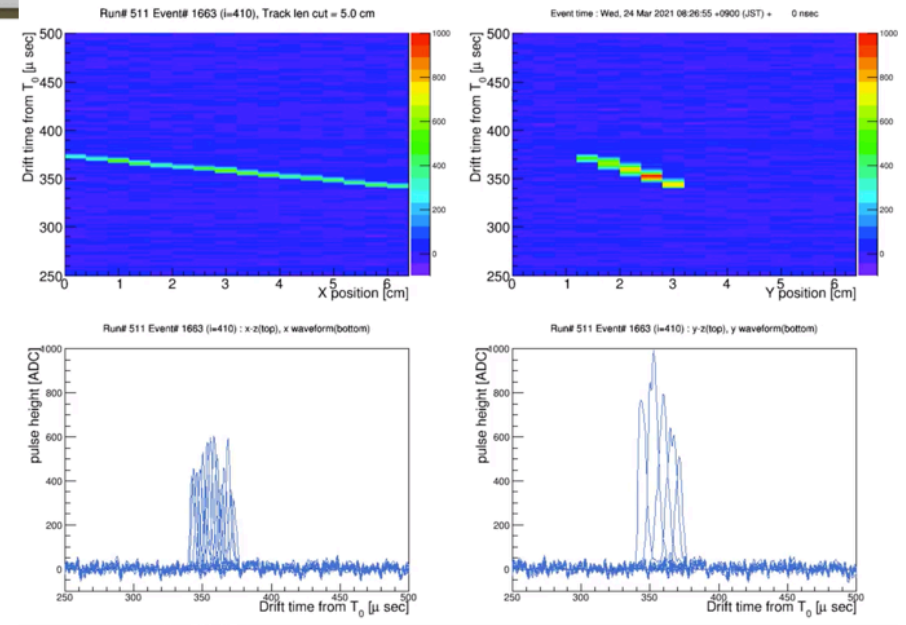
多層PCB 2次元strip読み出し



気液2相型での  
信号増幅を確認  
(GEM 33kV/cm)

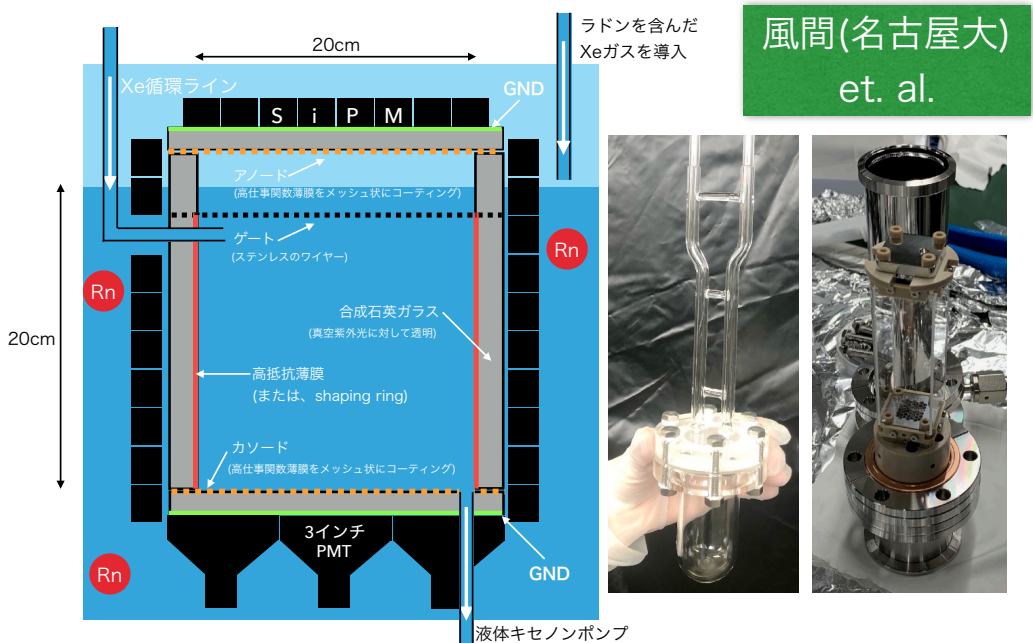
現在の課題：

- ・ GEM charge-upによるgain低下 → どのくらいでgainが低下するか理解
- ・ 大型化すると放電による損壊が問題に → 高抵抗GEM等の開発

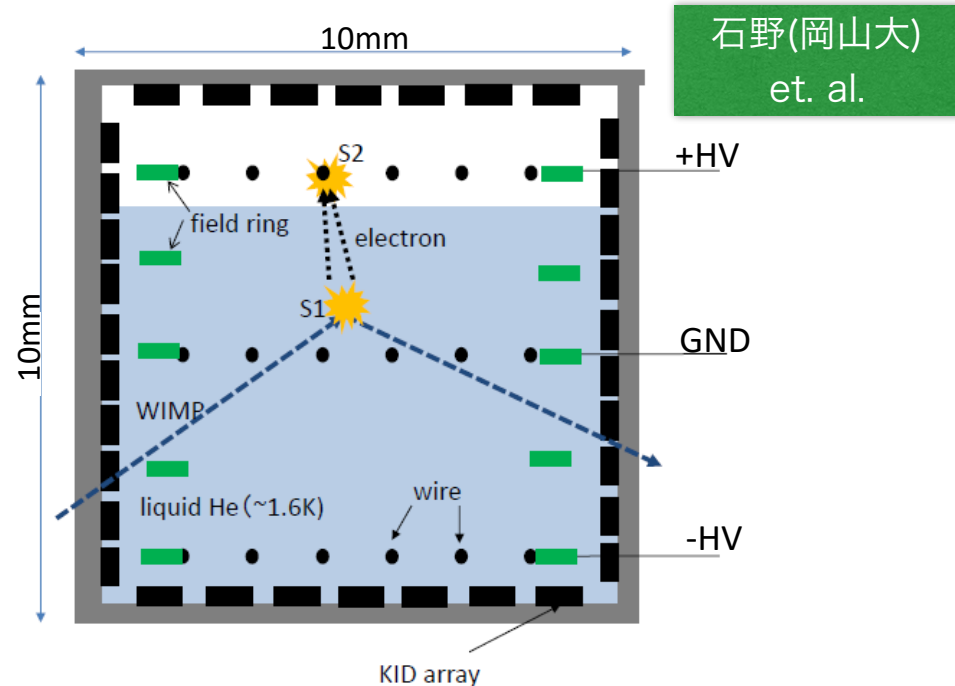


# Active媒質TPCも様々な応用、新しいアイデア、開発研究

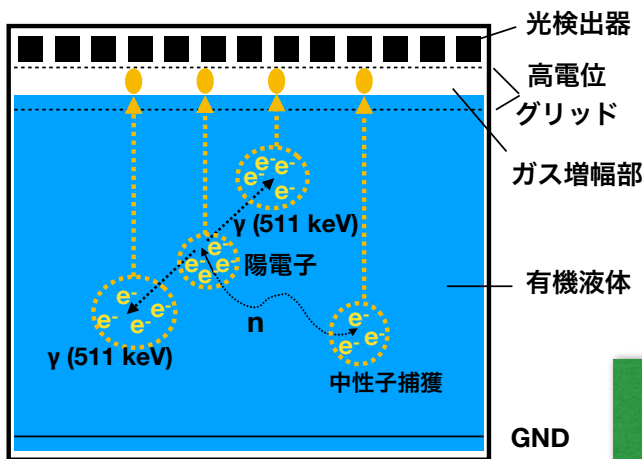
## 分離2相型液体キセノンTPC開発



## 液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索

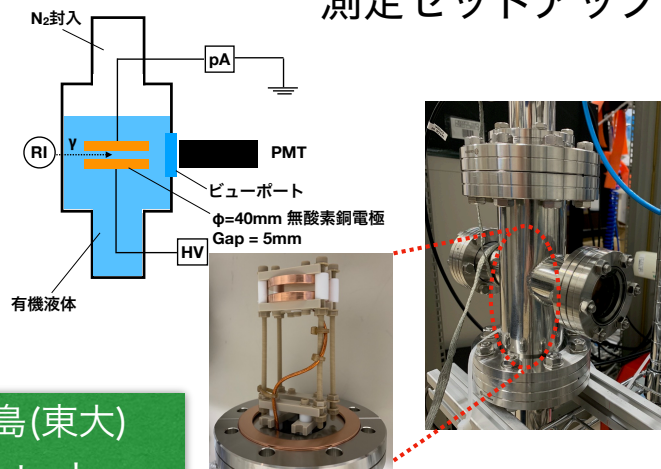


## 有機液体TPC開発



2,2,4-トリメチルペンタンでの実証試験

測定セットアップ



ぜひbackupスライドも参照して下さい

# KEK測定器開発プラットフォームC

共通な要素技術がたくさん!



ガス検出器+アクティブ媒質TPCの開発についてKEK DTPプラットフォームCの活動があります

- ・ 新規参加者をまだまだ募集中
- ・ 主な活動内容：
  - ・ 共通備品の整備（貸し出しも可能です）、KEKでの共通開発スペース
  - ・ 講習会・セミナーの開催 など
  - ・ 共通の技術課題に対する開発
  - ・ 外部資金の獲得

web page

Confluence スペース 作成 検索 ログイン

RD Platform C

ページ ツリー

- ・ 参加登録
- ・ 研究会

RD Platform C Home Page

作成者: Operator Admin 最終編集者: SAKASHITA Ken 1分以内

測定器開発プラットフォームCグループのホームページです。

- ・ 目的 Cグループでは、ガス検出器及びアクティブ媒質TPCに関して以下の活動を進めています。
  - ・ 共通な測定器技術の情報交流、情報の蓄積
  - ・ 研究会や講習会等の開催
  - ・ 共通の技術的課題に対する開発
  - ・ KEK内の設備の利用など
  - ・ 外部資金の獲得
- ・ プラットフォーム関係の研究での成果には、以下の謝辞をおねがいします。
  - ・ この研究はKEK測定器開発プラットフォームの支援を受けました。  
This work was partially supported by the KEK Detector R&D Platform.
- ・ メンバー
  - ・ 現在、39人の方が参加しています。参加希望者リスト(要パスワード)
  - ・ 参加を希望されるかたは、こちらからお願いします。
- ・ 共用物品
  - ・ RD Platform共通の備用品が以下の通りあります。
  - ・ 現在使用方法について準備中ですが、早急に希望があれば世話人までご連絡下さい。  
<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=127273152>
- ・ 研究会
  - ・ これまでの研究会はこちらです。
  - ・ ミーティングのindicolは、こちらです。(まずこちらから、KDSへのパスワードを取得して下さい)

ラベルなし

<https://wiki.kek.jp/display/rdptpc/RD+Platform+C+Home+Page>

ぜひ活用してください!

興味のある方は、坂下(KEK)・身内(神戸大)までご連絡ください



# まとめ

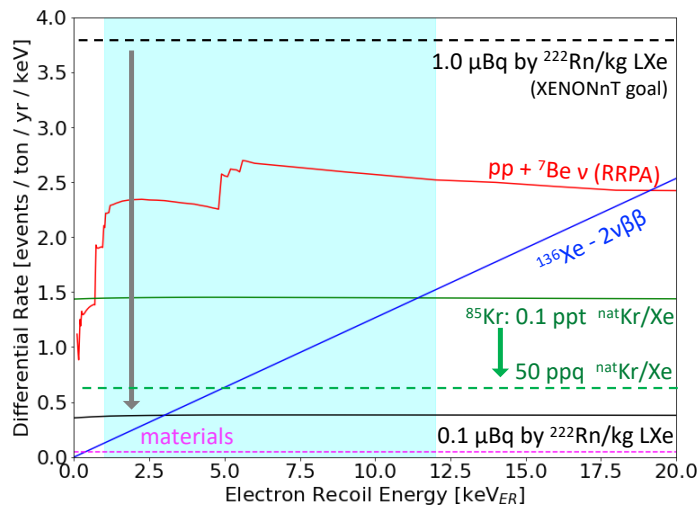
- ・ MPGDやTPCは、コライダー実験、暗黒物質探索、ニュートリノ実験、X線 $\gamma$ 線観測実験、中性子実験など非常に幅広い分野で応用されている
  - ・ また新しいアイデアで応用分野が広がっている
- ・ 国内でも開発研究が活発
- ・ 共通な要素技術が多く存在

今年も12月にMPGD+アクティブ媒質TPC研究会@岡山を予定しています。皆様の参加をお待ちしています。

backup

# 分離2相型液体キセノンTPC開発

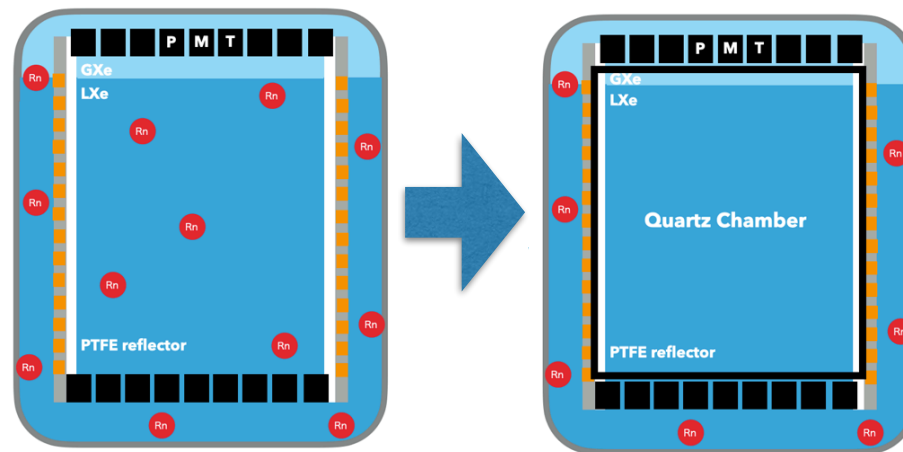
風間(名古屋大)  
et. al.



検出器物質からのラドン等のbackgroundを極限まで減らす必要がある

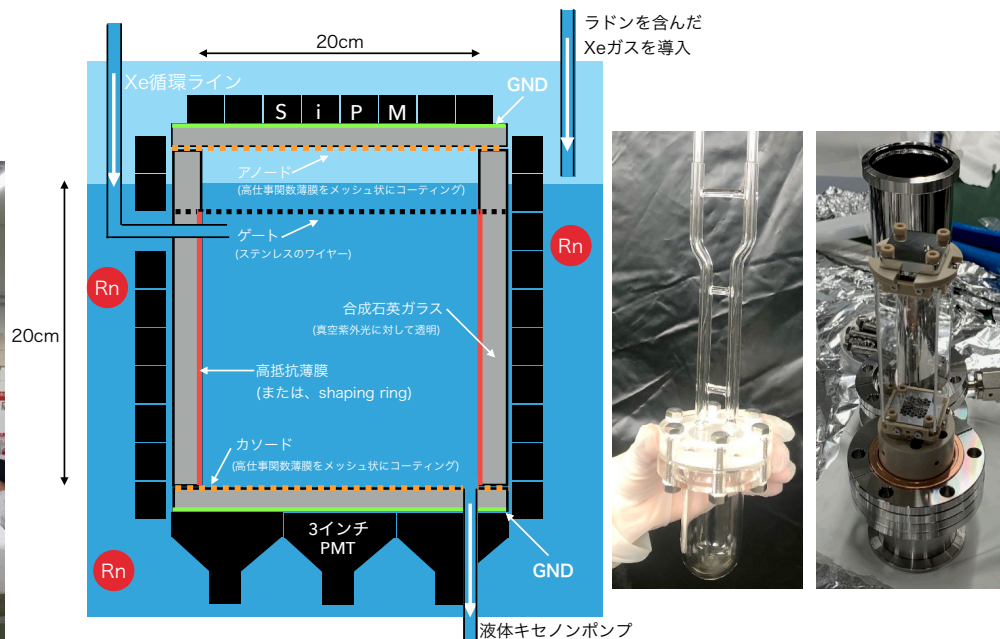
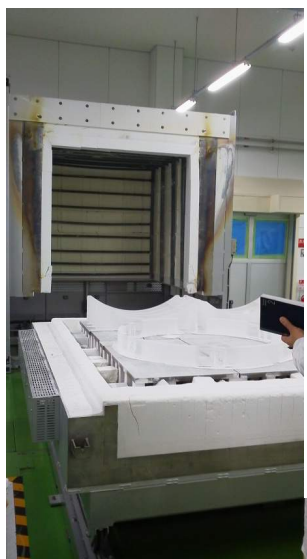
XENONnT Goal: 1  $\mu$ Bq/kg  
DARWIN Goal: 0.1  $\mu$ Bq/kg

## 密閉型液体Xe検出器の開発



FAQ:  
大きな石英チェンバーは作れるか

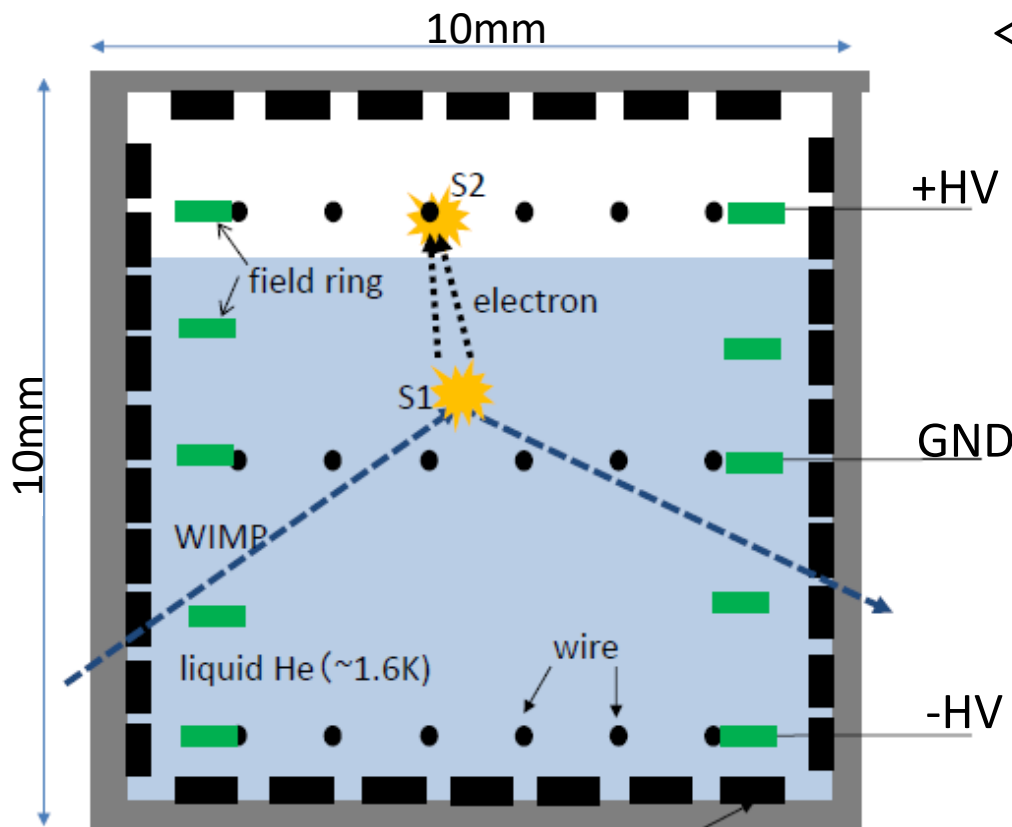
- 最大1500 mm $\phi$ , 高さ1500 mmが入る炉がある
- 透過率(材料)、平面度の検討は必要。



Rn sealing のテスト, 分離部分の光透過性などのR&Dが進行中 27

# 液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索

石野(岡山大)  
et. al.



## <10GeV/c<sup>2</sup>の軽い暗黒物質の探索に むけた液体ヘリウムTPCの開発

液体ヘリウムを用いた軽い暗黒物質探索の提案  
W. Guo and D.N. McKinsey, PRD 87, 15001 (2013)

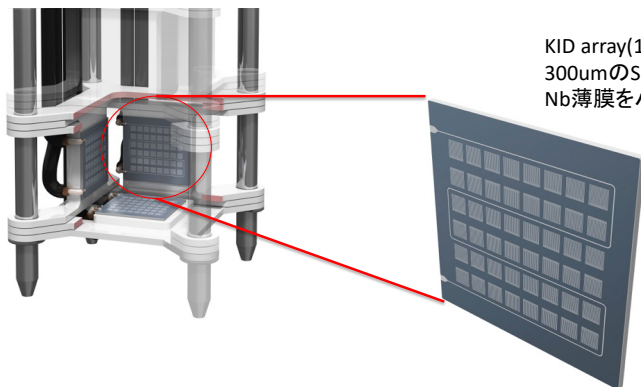
技術的課題：

- ・ 16eV光子に感度を持つ検出器の開発
- ・ 10kV/cm電場の形成
- ・ 液面制御
- ・ etc.

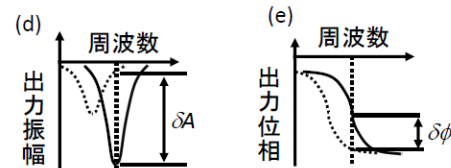
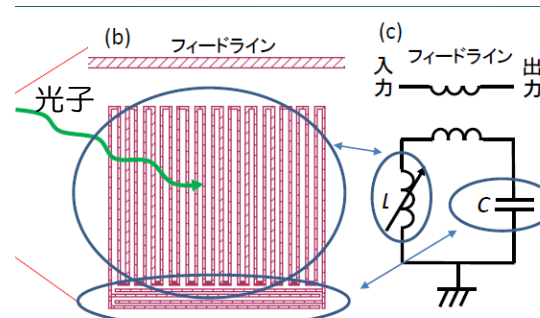
## KIDの応用

超伝導光検出器を使用  
Nbの量子効率~80%

KID array

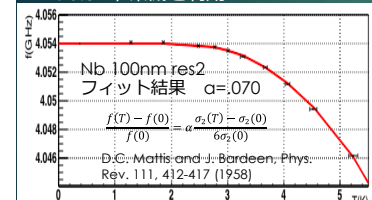
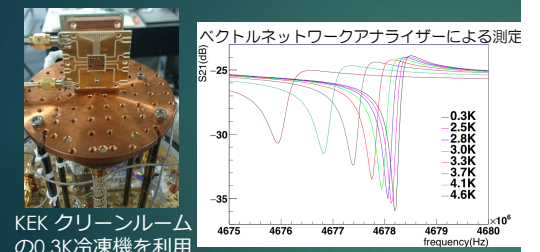


KID array(10×10mm<sup>2</sup>)  
300umのSi基板に  
Nb薄膜をパターンニング



## αの測定

共振周波数の温度依存性から測定。

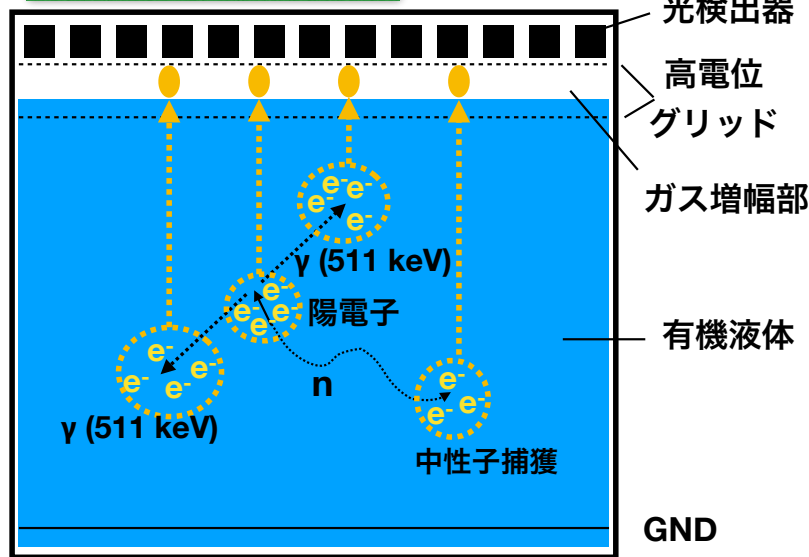


それぞれの共振周波数の温度依存性をフィットしてαを求める。

# 有機液体TPC開発

中島(東大) et. al.

0(1)-O(10)MeVの反電子 $\nu$ の高精度観測に向けた開発

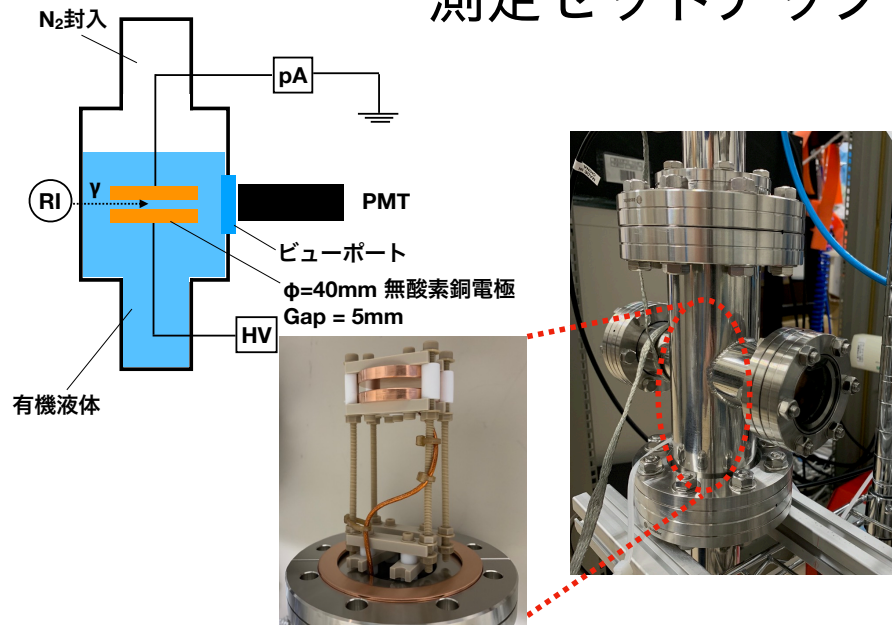


有機液体の利点

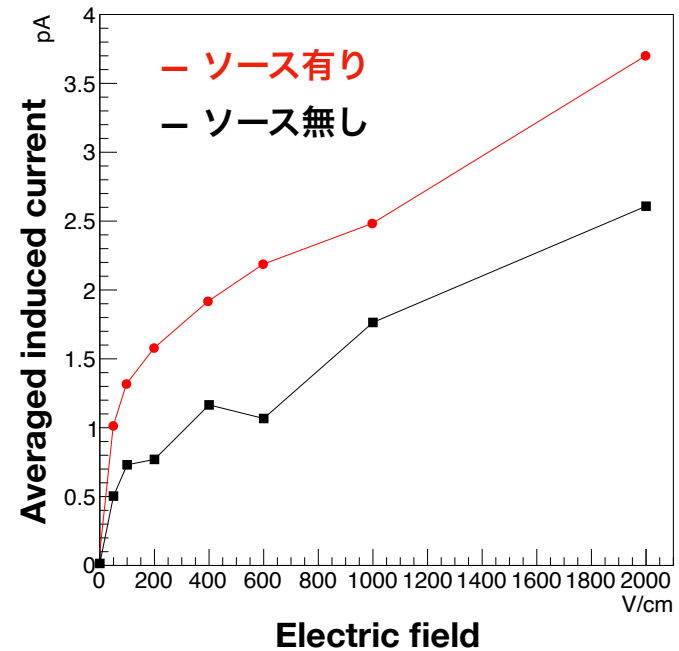
- ・ 逆 $\beta$ 崩壊のターゲットになるfree protonが豊富に存在
- ・ 無極性な媒体を使えば電離電子のドリフトが可能
- ・ 逆 $\beta$ 崩壊からの陽電子等を空間的に分離して測定可能
- ・ 室温・大気圧で運用可能

高いエネルギー分解能、Backgroundフリーな超新星背景ニュートリノ測定が可能に

## 2,2,4-トリメチルペンタンでの実証試験 測定セットアップ

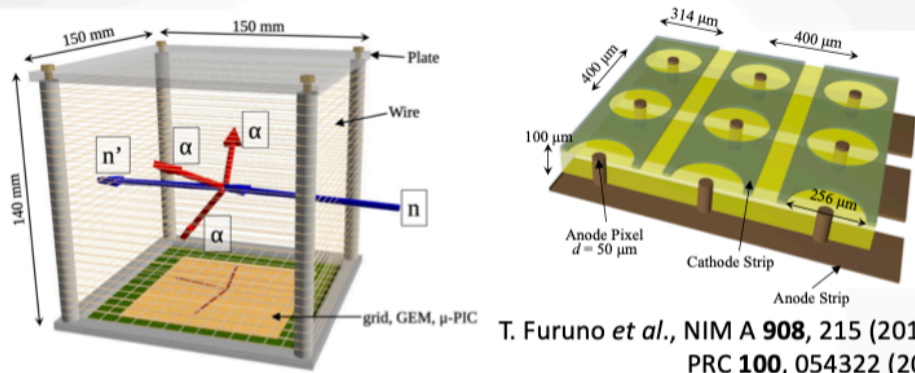


## RIソースによるイオン化の信号の確認



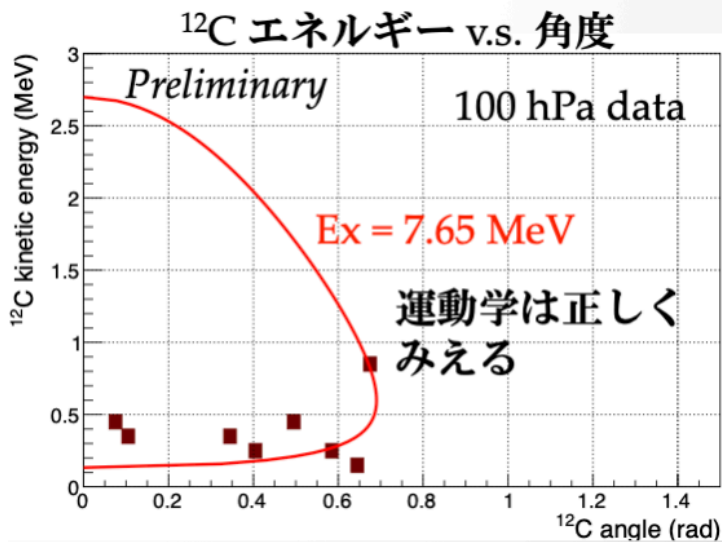
# MAIKoアクティブ標的

TPCの検出ガス =  $^{12}\text{C}$ 標的

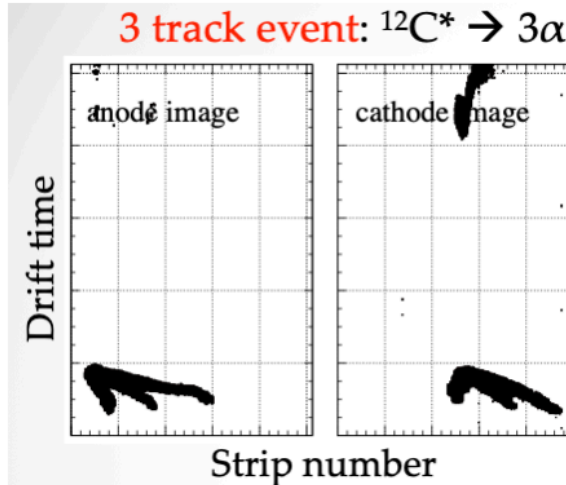


T. Furuno *et al.*, NIM A **908**, 215 (2018).  
PRC **100**, 054322 (2019).

- ◆ 崩壊 $3\alpha$ をTPC内で検出。標的を厚くすることが可能。
- ◆  $\alpha$ 粒子のrangeからエネルギーを決定。
- ◆ 低圧ガス動作:  $\text{CH}_4$  50 hPa /  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (10%) +  $\text{H}_2$ (90%) 100 hPa
- ◆  $\mu\text{-PIC} + \text{GEM}$ による増幅
  - $\mu\text{-PIC}$  (gain $\sim$ 1000): 2次元ストリップ読み出し (400  $\mu\text{m}$  pitch).  
256A+256C = 512 ch.
  - GEM (gain $\sim$ 30): 140  $\mu\text{m}$  pitch,  $d=70 \mu\text{m}$ ,  $t=100 \mu\text{m}$  (thick GEM)



$\sigma = 5.7 \pm 2.0$  (stat.) [mb]



$^{12}\text{C}$ と中性子の散乱断面積測定  
→ 宇宙における $^{12}\text{C}$ の合成率の理解

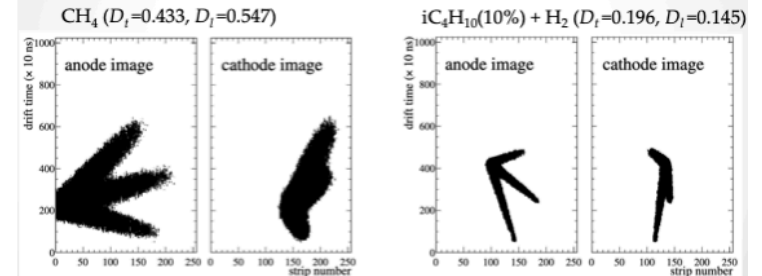
古野(阪大)  
et. al.

中性子ビームによって $^{12}\text{C}$ 励起状態を作り、  
そこから $3\alpha$ 崩壊をTPCで測定  
”アクティブ標的TPC”

見たい物理事象の測定を最適にするために、  
ガス選定

拡散係数が大きいと、取得した飛跡の幅が太くなってしまふ。  
 $3\alpha$ の識別は難しくなる。

Simulationによる $3\alpha$ 飛跡の比較



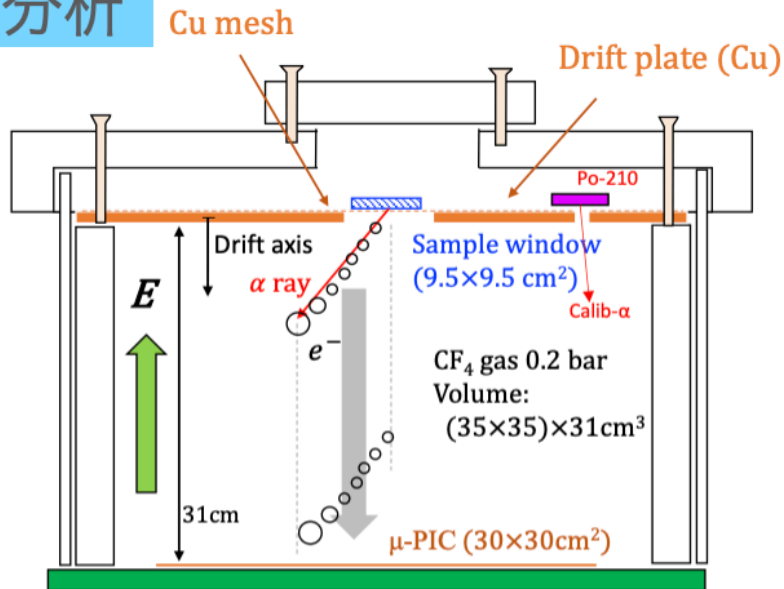
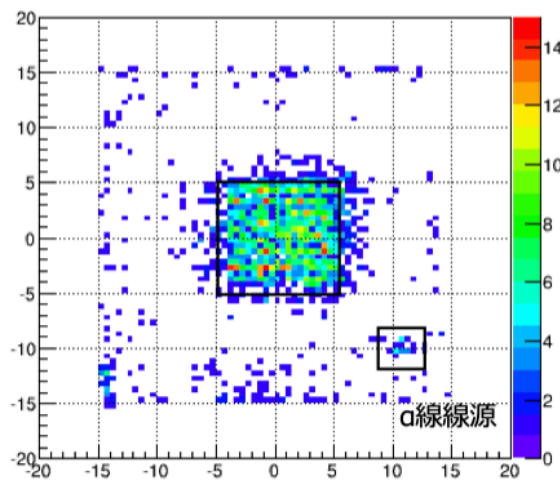
$i\text{C}_4\text{H}_{10}$ (10%) +  $\text{H}_2$ (90%) @100 hPaで測定する。

大阪大OKTAVIAN施設で  
14MeV単色中性子源を  
使って実験

本実験に向けて大型化  
(30cm x 30cm)を行う

Alpha-ray Imaging Chamber (AICHAM)  
NIM A 953 (2020) 163050.

Po-210線源銅板 α線汚染分布



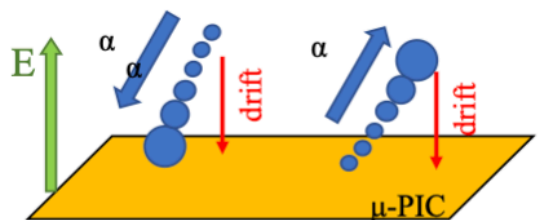
極限まで少ない放射性不純物が要求される実験では試料表面の汚染の理解が重要。

表面α線分析はGe分析とは独立的な重要な役割

- α線の発生点をplotすると穴の形が現れる。
- 試料由来のα線汚染分布を得られることを実証した。
- 端に線源を取り付ければサンプル測定と同時にガス状態をモニターできる

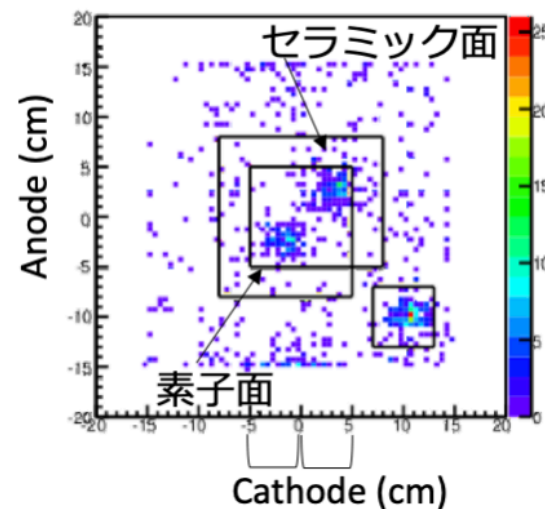
性能

- 位置分解能 7mm、有効面積 10cm×10cm
- エネルギー分解能~7% @5.3 MeV
- 感度  $1 \times 10^{-3} \alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$  @1ヶ月

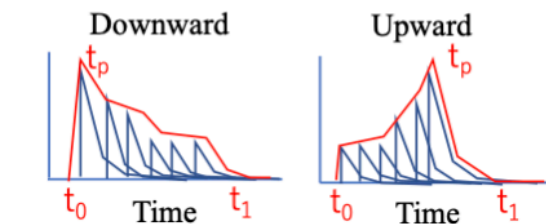


SiPMのα線汚染の確認

>3.5MeV

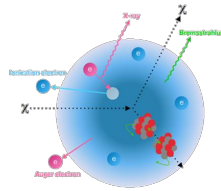


AXELグループからMPPC(故障品)を測ってみた

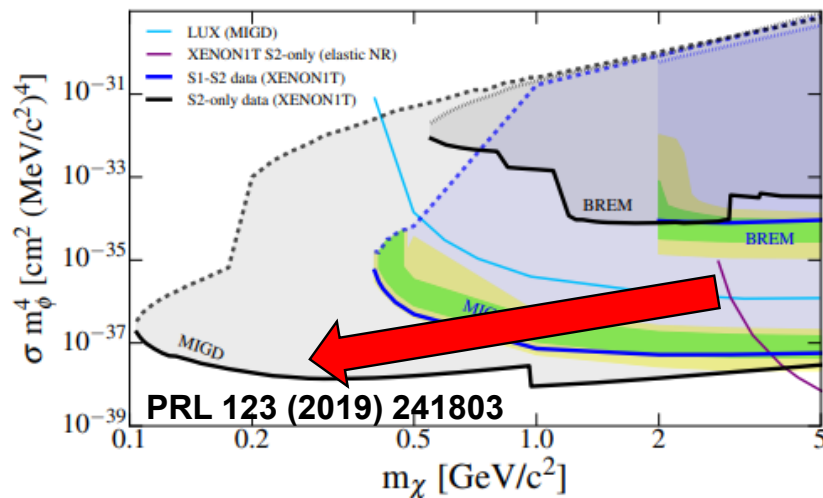


性能Upgradeも進行中

## ミグダル効果とは

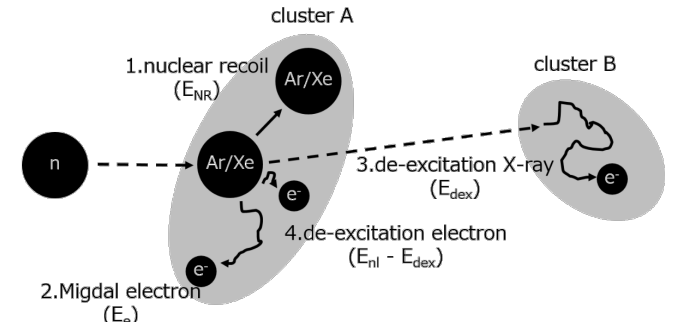


- 原子核反跳等で、追加の励起や電離が発生する
- まず原子核が動き、電子が追従する、という描像をちゃんと計算すると出てくる



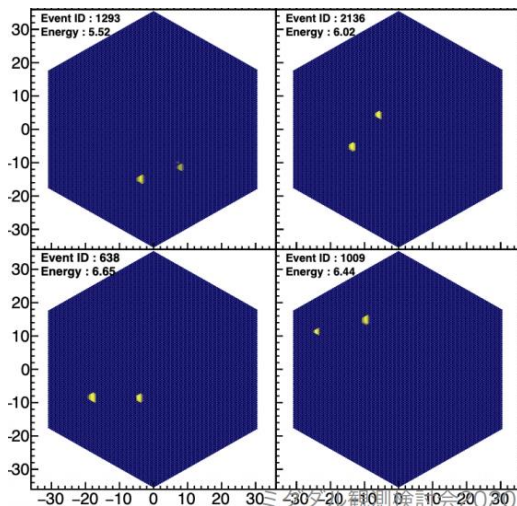
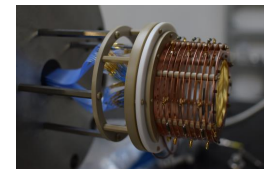
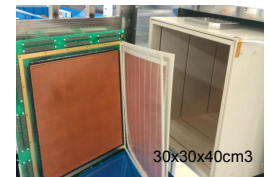
## 特徴

- ガス中だと2つのクラスター
- cluster-Bは特性X線のエネルギーになる
- ⇒位置感度のあるガス検出器

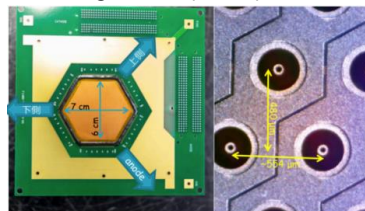


## ガス検出器

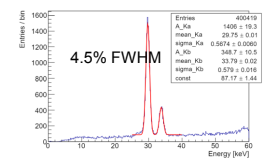
- Ar 1atm
  - $\mu$ -PIC (400um ピッチ)
  - Arは非弾性散乱がなく、低BG
- Xe 8atm
  - pixelized EL readout (1cm ピッチ)
  - エネルギー分解能が良い
- ⇒それぞれ、1000ev/日くらい



Ar 1atm  
400um-pitch  
5.9keV gamma (55Fe): ER+ER



target	Ar 1atm	Xe 8atm
K-shell energy	4keV	30keV
absorption length	2.95cm	2.19cm
fluorescence yield	0.14	0.9
event rate	603 ev/day	975 ev/day



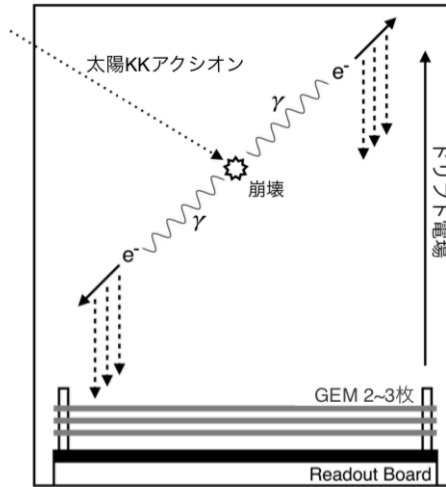
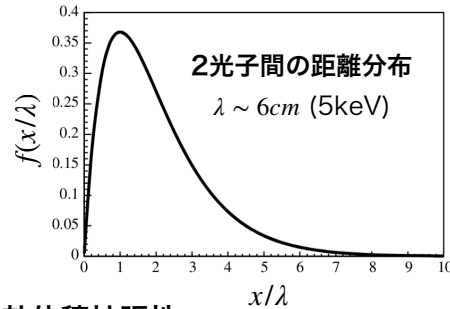
既存の技術で信号(2 cluster)は見えそうだが、中性子BG,  $\gamma$  BGが多いため実験デザインを詰める必要がある



## 低圧ガス検出器を用いた探索

### 非常に強力なBG除去能力

- 2光子を分離して検出可能なので、位置・エネルギー情報を利用した強力なBG除去が可能



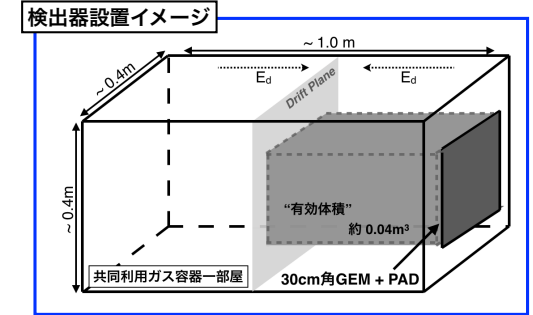
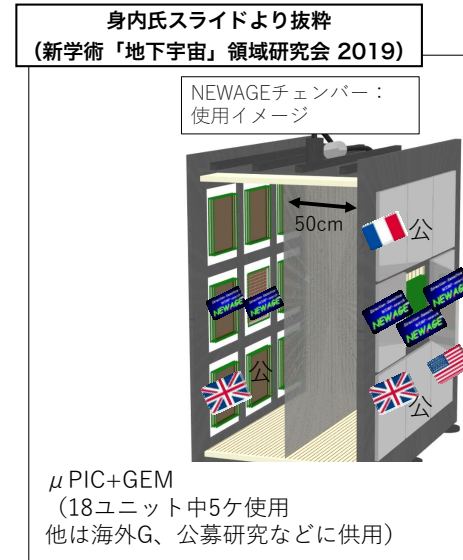
### 有効体積拡張性

- 常温の低圧ガスを使うので、有効体積の拡張が比較的容易



KKアクション探索に  
非常に適している！！

## NEWAGEチェンバーの利用

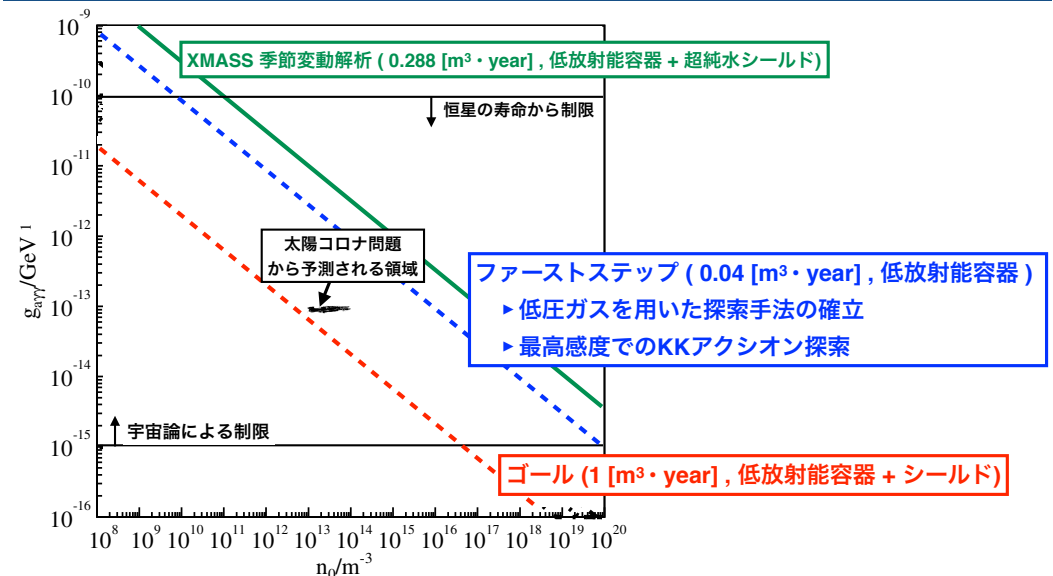


- ▶ 低圧ガス容器の一部を拝借して低コストで実験開始
  - SF<sub>6</sub> 0.2atm
  - 低放射能仕様
  - 有効体積 40L (XMASS: 288L)

Dec. 6-7<sup>th</sup>, 2019 MPGD & TPC 合同研究会 Keishi Hosokawa

## 予想感度

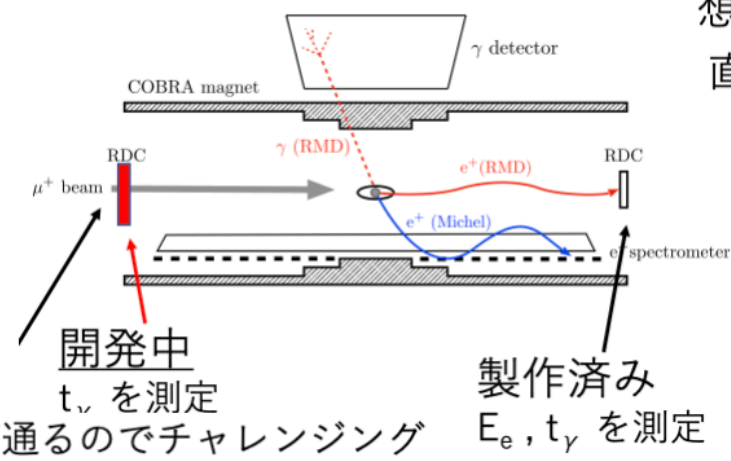
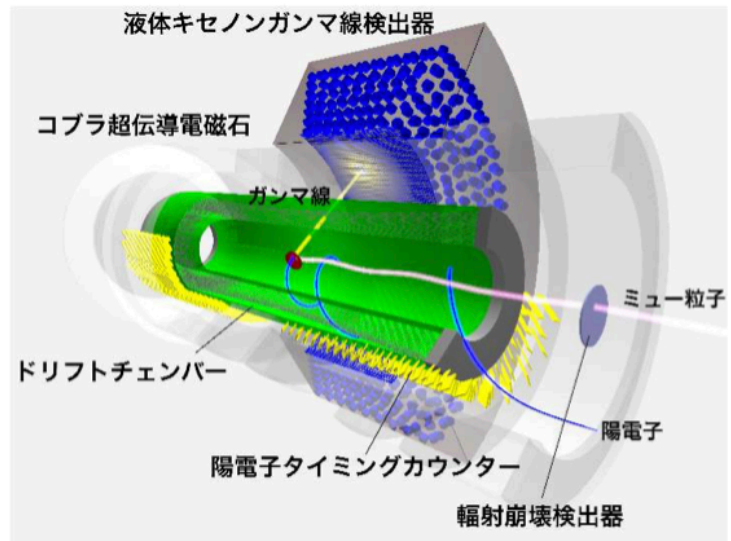
- ・ NEWAGEチェンバー 1部屋を用いた開発・観測で先行研究以上の感度
- ・ 更なる低BG環境構築・有効体積拡張で太陽コロナ問題によるモデルを検証



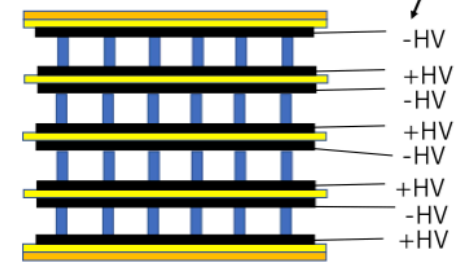
# 超低物質質量RPCの開発

大矢(東大)  
et. al.

輻射崩壊由来の背景事象を同定するために  
ビーム中に超低物質質量のRPCを設置

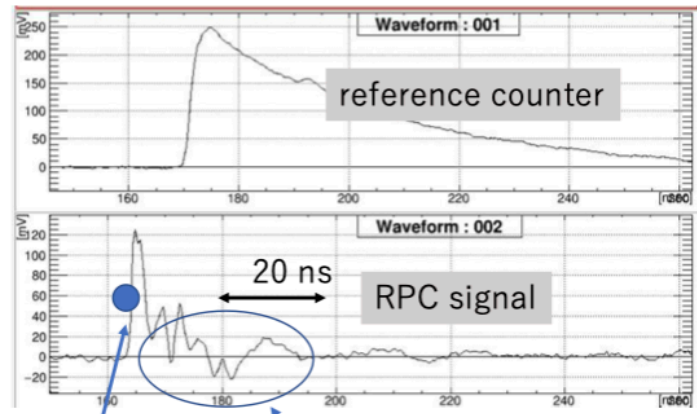
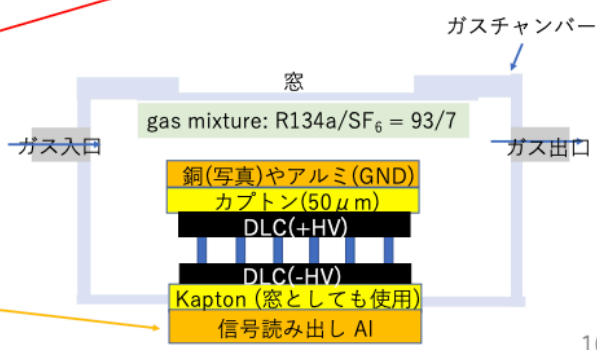
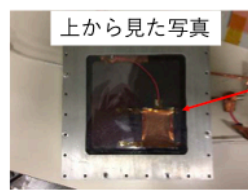
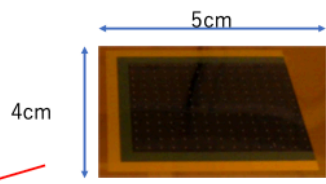


想定している検出器構造  
直径20 cm



青: スペース (200-500 μm)  
黒: DLC (~100 nm)  
黄色: カプトン (50 μm)  
橙色: Al 読み出し (~100 nm)

- 4cm×5cm サイズの試作機を作成した
- ✓ 実機を想定した、Al 読み出しによる試験
- ✓ ただし、積層せず、単層で試験を行った



10

RPC 検出時間

読み出しストリップでの反射?

時間分解能は要求性能(1ns)よりも良い結果  
物質質量も要求を満たす

# 中性子イメージング検出器

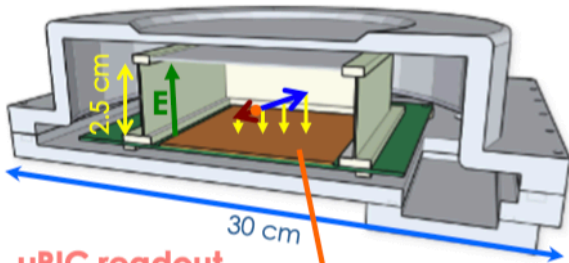
J.Parker(CROSS)  
et. al.

Image of Gd test target (<sup>3</sup>He detector)

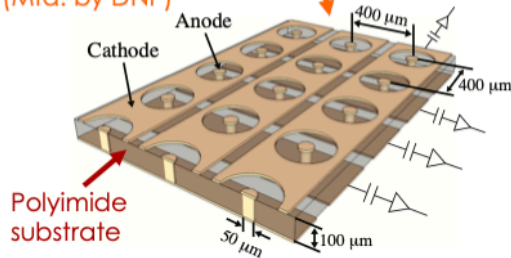
@J-PARC MLF

## μPIC-based neutron imaging detector (μNID)

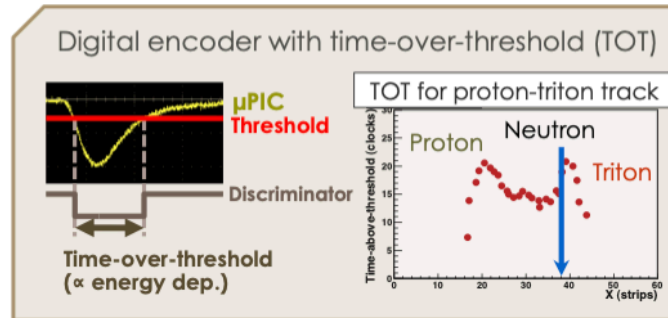
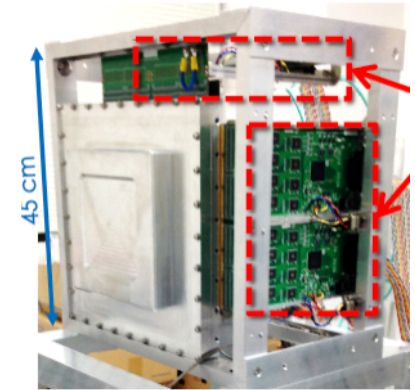
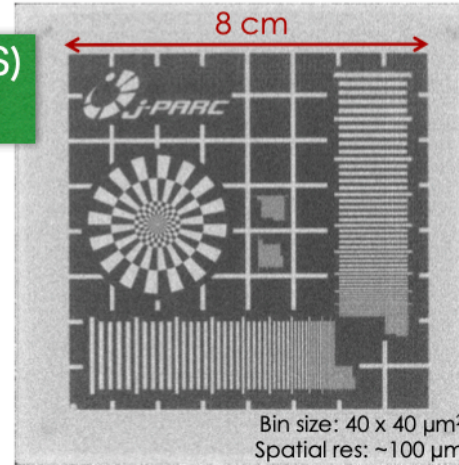
Neutron detection via <sup>3</sup>He gas (n + <sup>3</sup>He → p + t) or <sup>10</sup>B thin-layer (n + <sup>10</sup>B → alpha + <sup>7</sup>Li)



**μPIC readout**  
10 cm x 10 cm area,  
400 μm pitch x,y strips  
(Mfd. by DNP)



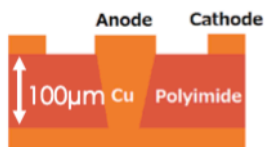
- Gaseous time-projection-chamber
  - CF<sub>4</sub>-iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>-<sup>3</sup>He (45:5:50) at 2 atm
  - μPIC micropattern readout
  - Compact ASIC+FPGA data encoder front-end
- 3-dimensional tracking (2D position + time) with time-over-threshold
  - Accurate position reconstruction
  - Strong gamma rejection



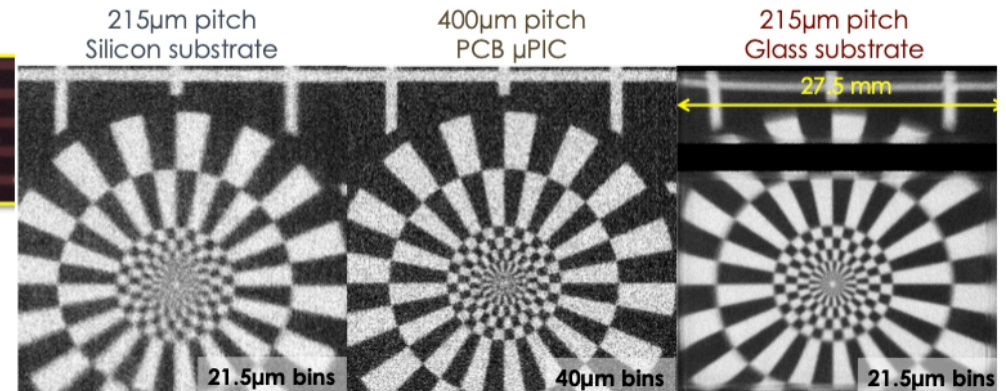
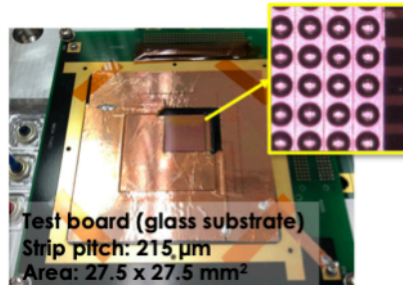
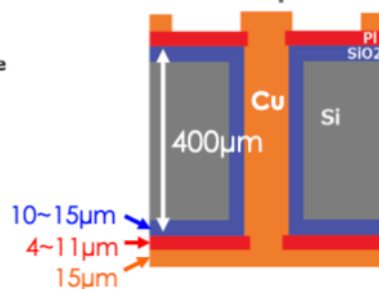
Base performance characteristics		
	<sup>3</sup> He	<sup>10</sup> B
Active area	10 x 10 cm <sup>2</sup>	
Spatial resolution	0.1 mm	0.45 mm
Time resolution	0.25 μs	~10 ns
γ-sensitivity	< 10 <sup>-12</sup>	
Efficiency @25.3meV	26%	5%
Count rate capacity	8 Mcps	22 Mcps
Effective count rate	> 1 Mcps	

## MEMS加工のμPICによる位置分解能の改善

Current PCB μPIC  
(400 μm pitch)



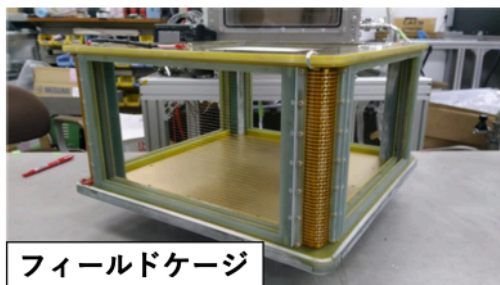
MEMS μPIC



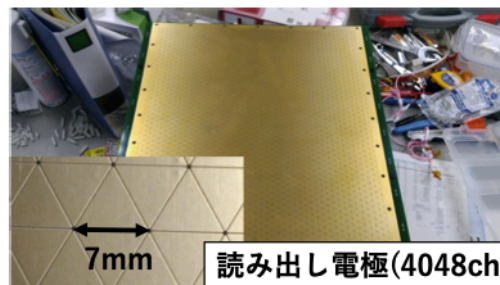
# 大強度重イオンビーム照射用低圧ガスアクティブ標的 CAT

大田(東大), 遠藤(東北大)  
et. al.

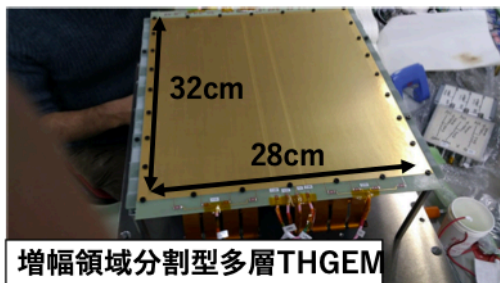
## アクティブ標的CAT-M



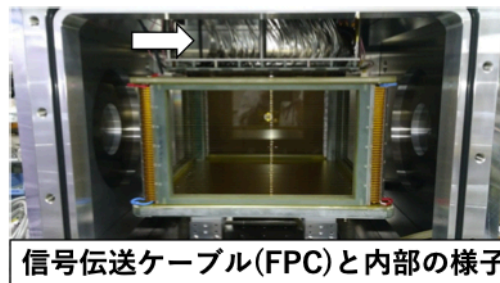
フィールドケージ



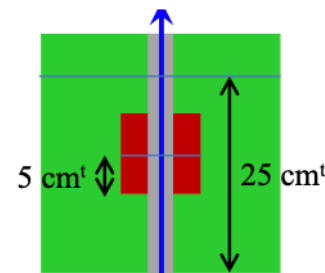
読み出し電極(4048ch)



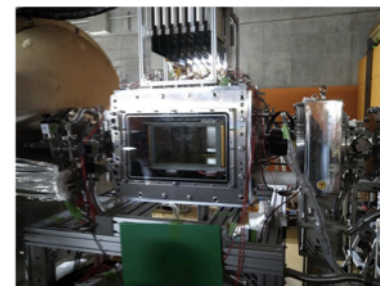
増幅領域分割型多層THGEM



信号伝送ケーブル(FPC)と内部の様子

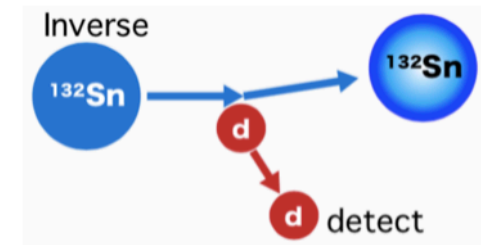


CAT-M @RIBF  
18-25 Nov., 2019



波形サンプリング  
GET electronics

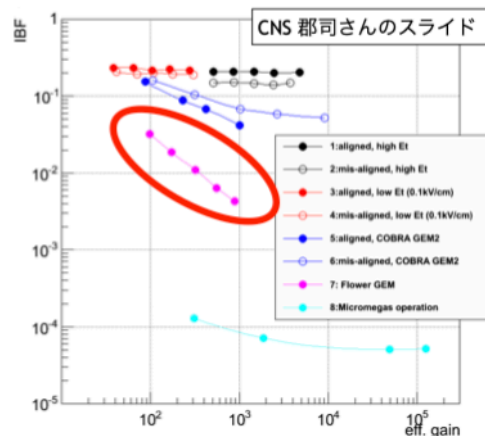
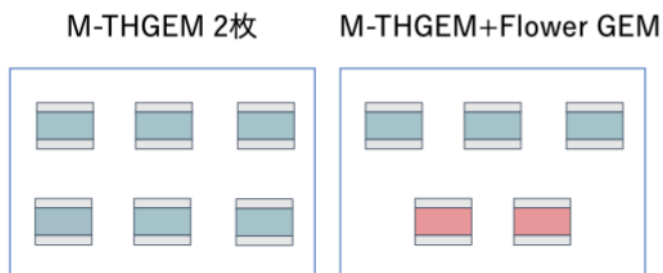
不安定核ビーム実験では  
低エネルギー反跳粒子測定



### 現在の問題

->大強度ビーム照射化ではGEMからのイオンバックフローによる電場の歪み  
Flower GEMを用いるとIBFが0.5%程度まで抑制される。(郡司さん)

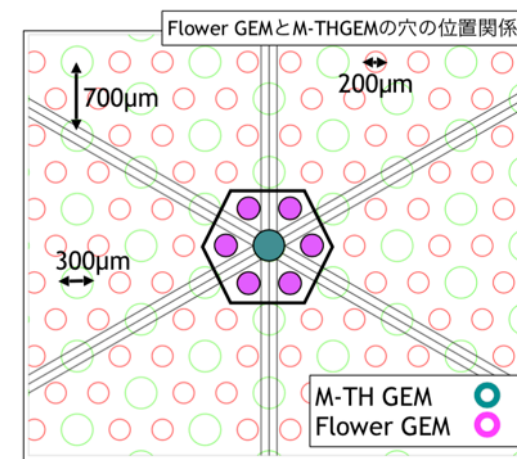
従来のCAT-MではM-THGEMのみ使っていた。  
新しくFlower GEMを使い、IBFを抑えたい！



### イオンバックフローを抑える改良

M-THGEM  
穴直径 300 μm  
厚さ 1180 μm  
ピッチ 700 μm

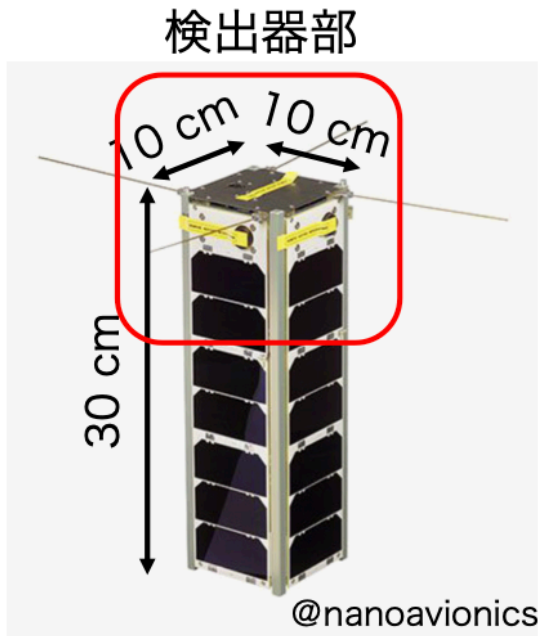
Flower GEM  
穴直径 200 μm  
厚さ 400 μm



# 超小型衛星搭載用GEM X線検出器

玉川(理研)  
et. al.

MAXIが発見した突発天体を追観測する衛星を計画

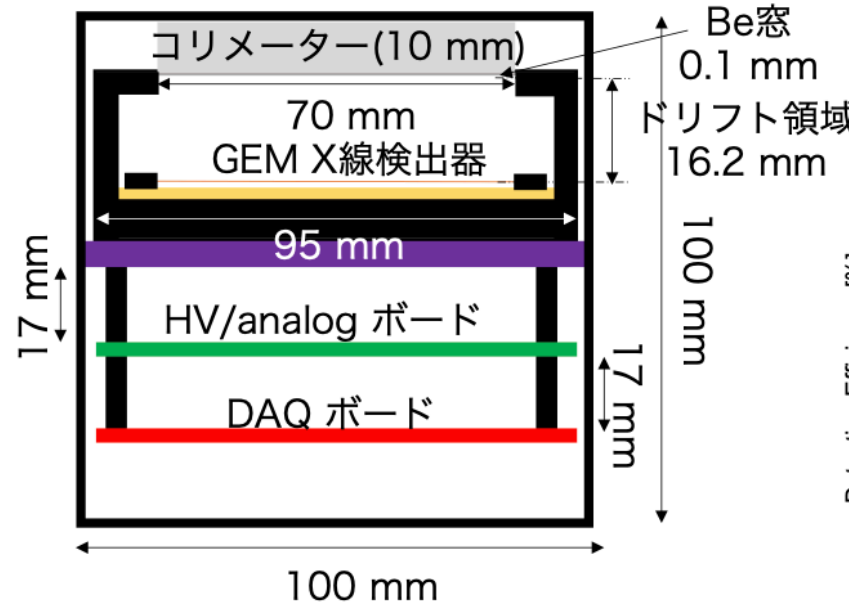


@nanoavionics

## 3U規格のCubeSat

- MAXIと同等の有効面積(~20 cm<sup>2</sup>)
- 10分の観測で統計量は10倍に

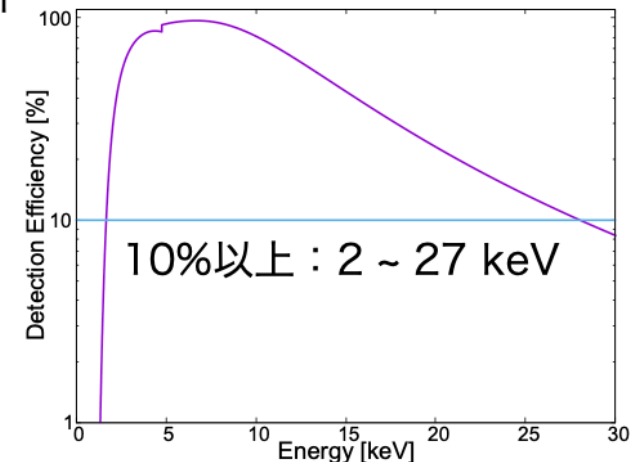
## 検出器部断面図 1 kg以内



- 検出器は円筒型
- GEMを用いたガス検出器を採用

## ▷ 検出効率

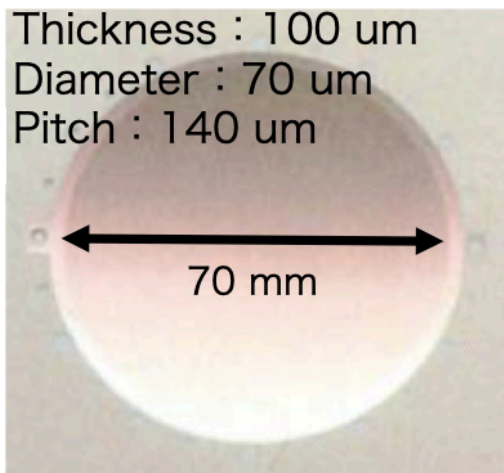
- 封入ガスはXeCO<sub>2</sub>(95%/5%)
- 気圧は1.2 atm



- MAXIと同じエネルギー領域を狙う

## GEM(LCP)

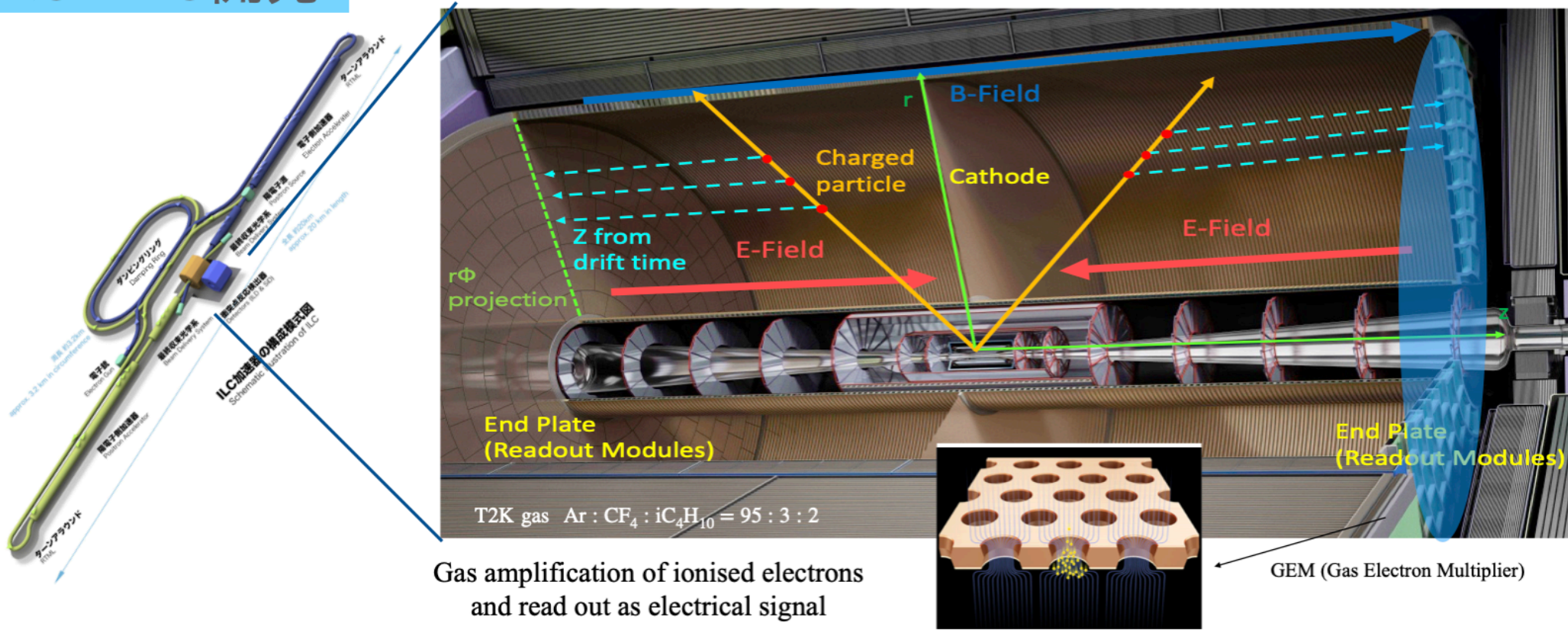
- 環境試験をクリアした規格で作成したGEM
- 形を円形に変更



- 搭載する小型HVモジュールの安定性、温度依存性の確認、Background減衰シールド調査等を進めている
- 2021年秋頃の打ち上げ予定 37

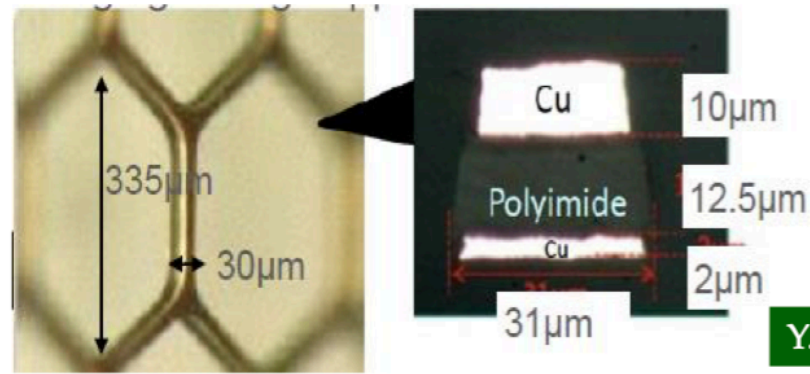
# ILC TPC開発

# ILD-TPC



Test Beam @ DESY:  
GEM-TPC with Large-aperture GEM gating device (produced by FUJIKARA)

ビームBKGとIBFからの飛跡の歪み  
~60μm→Gating is needed



Electron transmission (3.5 V) ~ 82-86%

