

キセノンTPC、気液2相型と液体球状型

日本物理学会第73回年次大会

シンポジウム「素粒子・宇宙線・原子核・応用研究のためのユニークなTPC開発」

2018年3月24日

関谷洋之

東京大学宇宙線研究所

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構

東京大学次世代ニュートリノ科学連携研究機構

菅澤佳世、石井瞭、伊藤好孝、増田公明

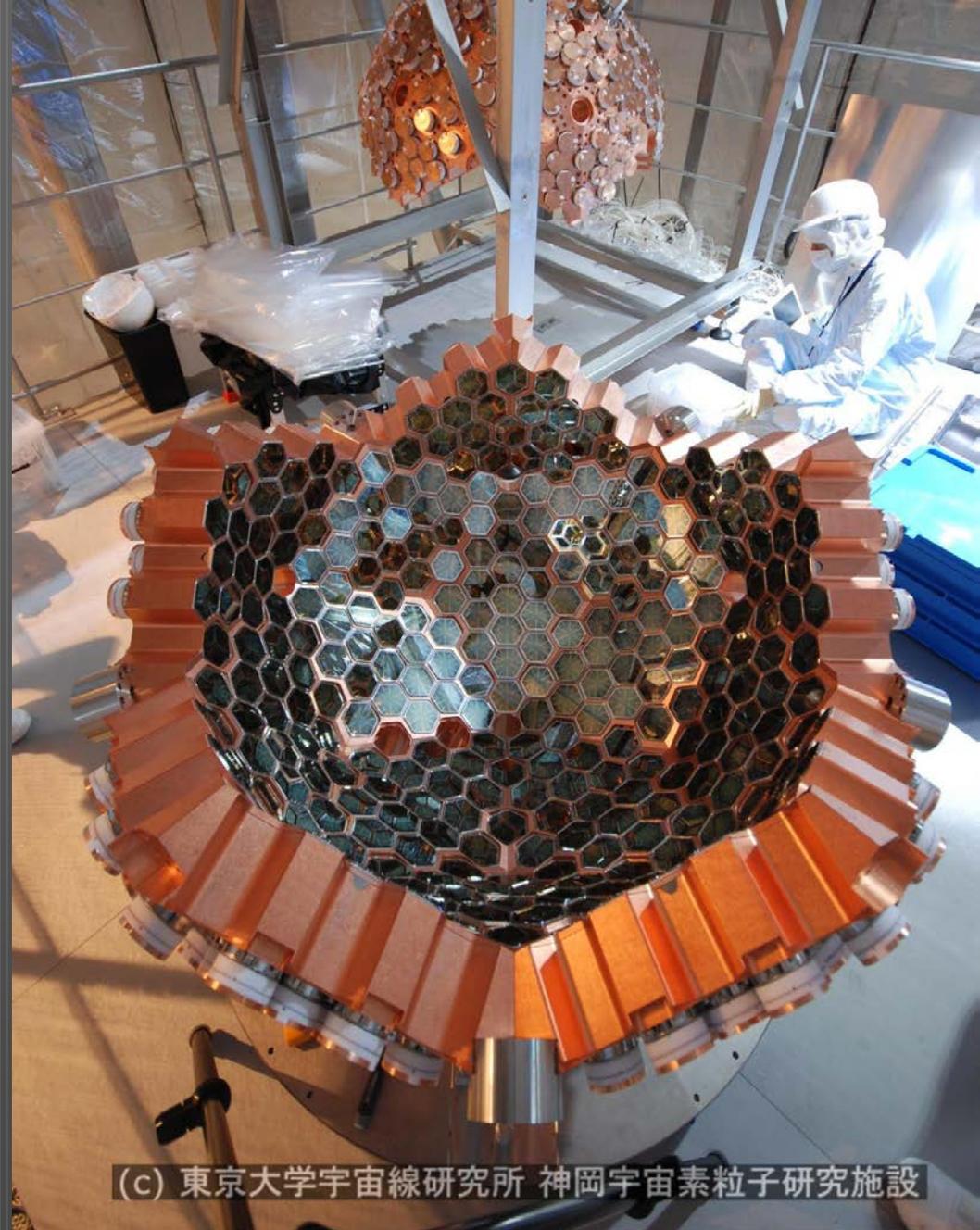
名古屋大学宇宙地球環境研究所

Ioannis Giomataris

Irfu, CEA Saclay

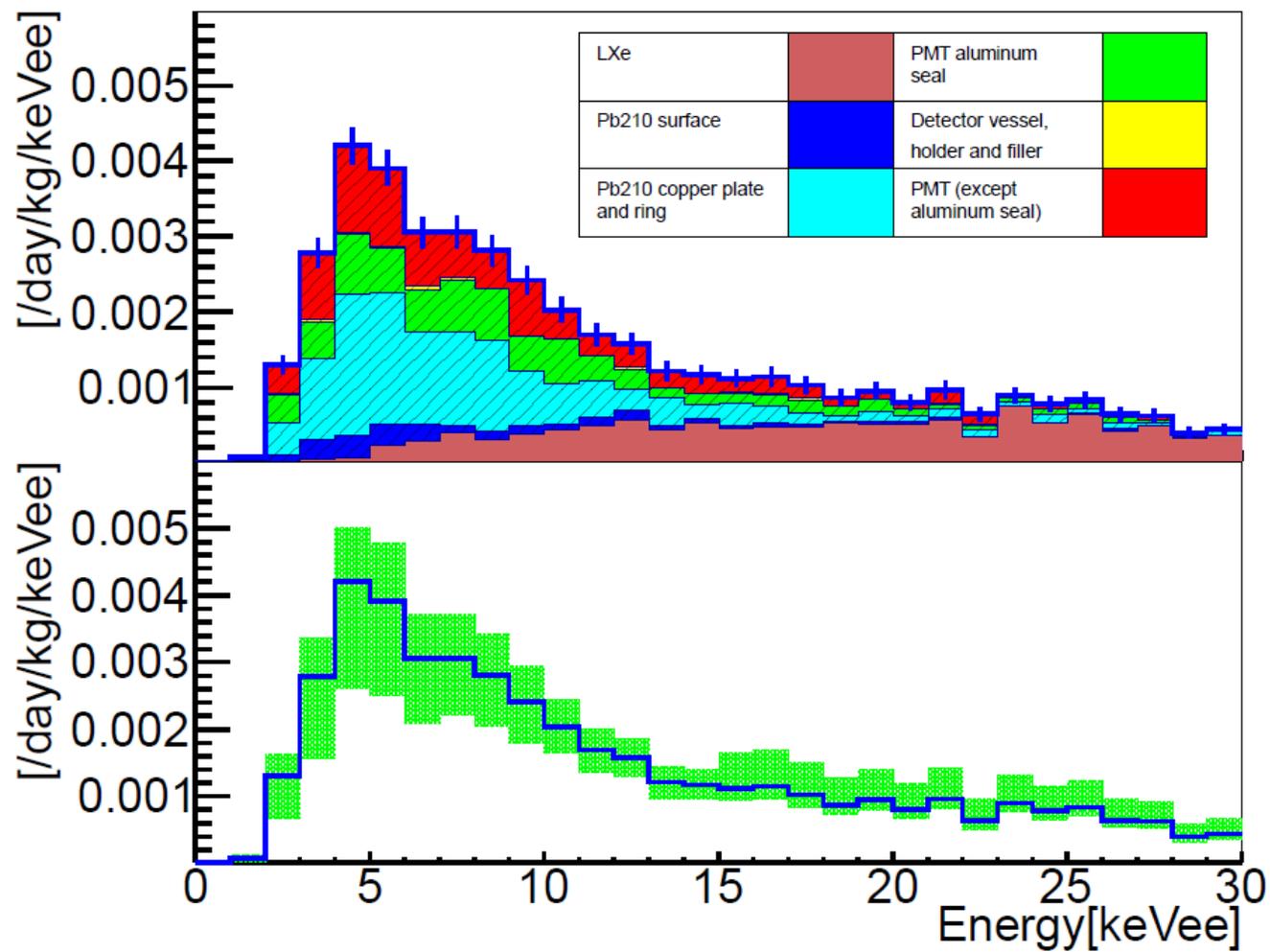
研究の動機と現状認識

- XMASS
 - 1相式液体キセノンシンチレーター



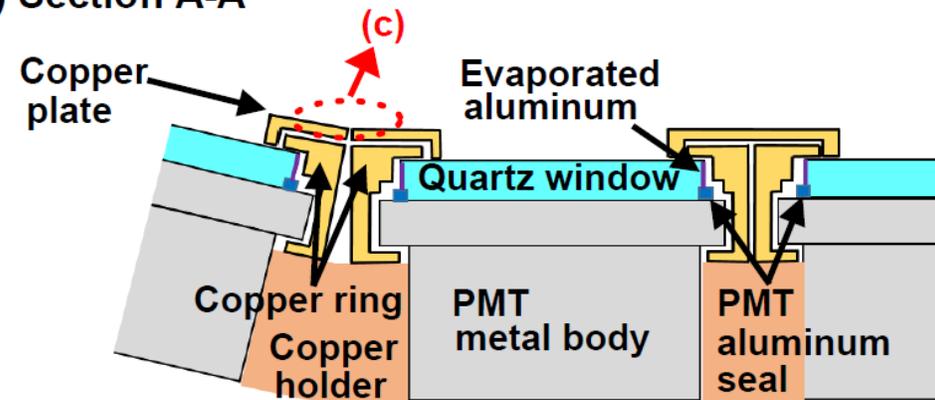
(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

XMASSの到達点と問題点

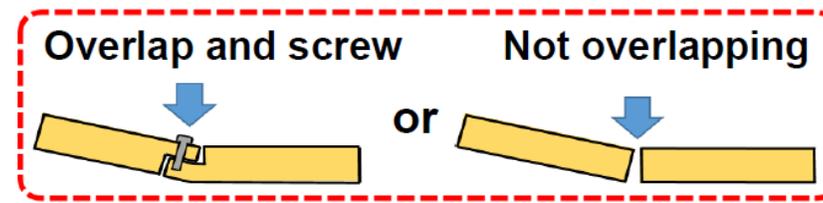


- すごい！
 - 私にはできない。
 - 10^{-50}cm^2 探索にはこれくらい必須

(b) Section A-A



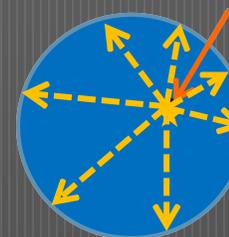
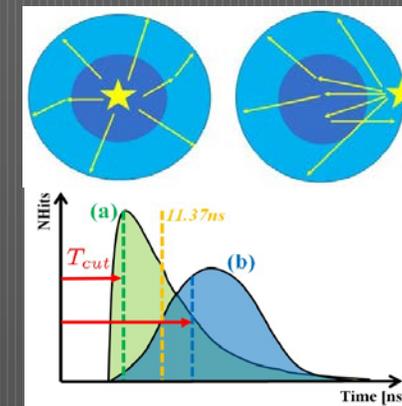
(c) Copper plate around boundary



低エネルギーでの表面バックグラウンド問題

- 電荷と時間情報によるLikelihoodベースのvertex reconstruction

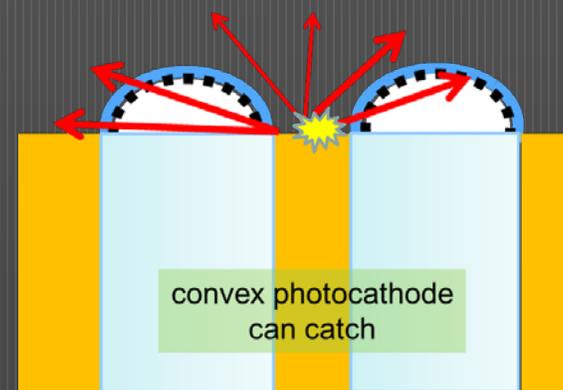
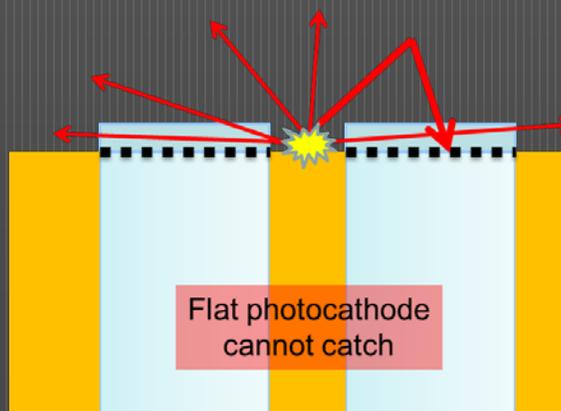
- 光電子数が少ない場合や情報が失われた場合 mis-reconstructionが起きる
- 特に検出器表面で起きたBGイベントが有効体積中に誤って再構成されるのが問題
- AI等を使用したとしても、本質的に解決できない。



Q reconstruction and T cuts

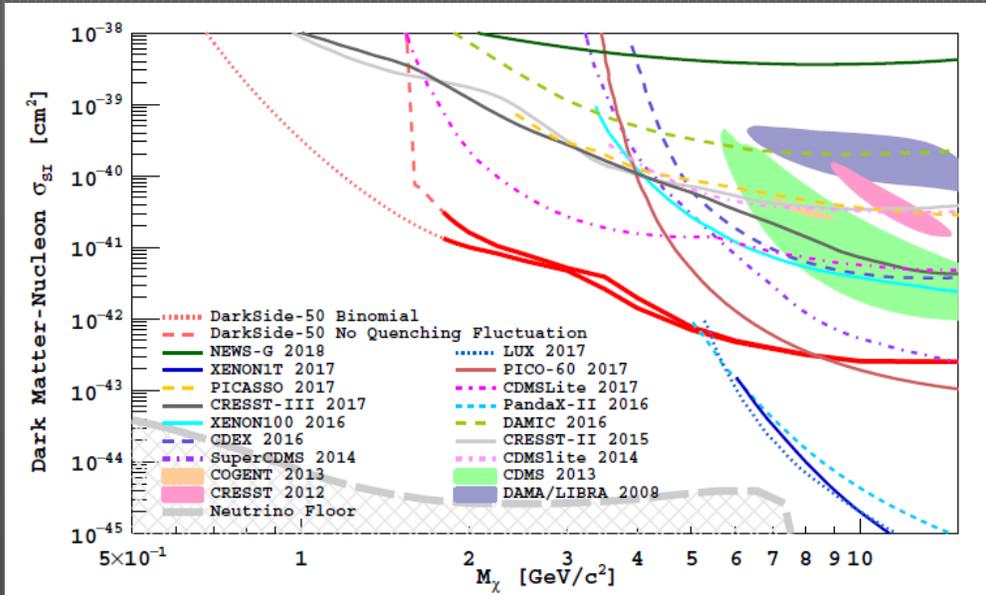
- ハードウェアによる本質的改善が必須

- 「XMASS 1.5」という最初のアイデア



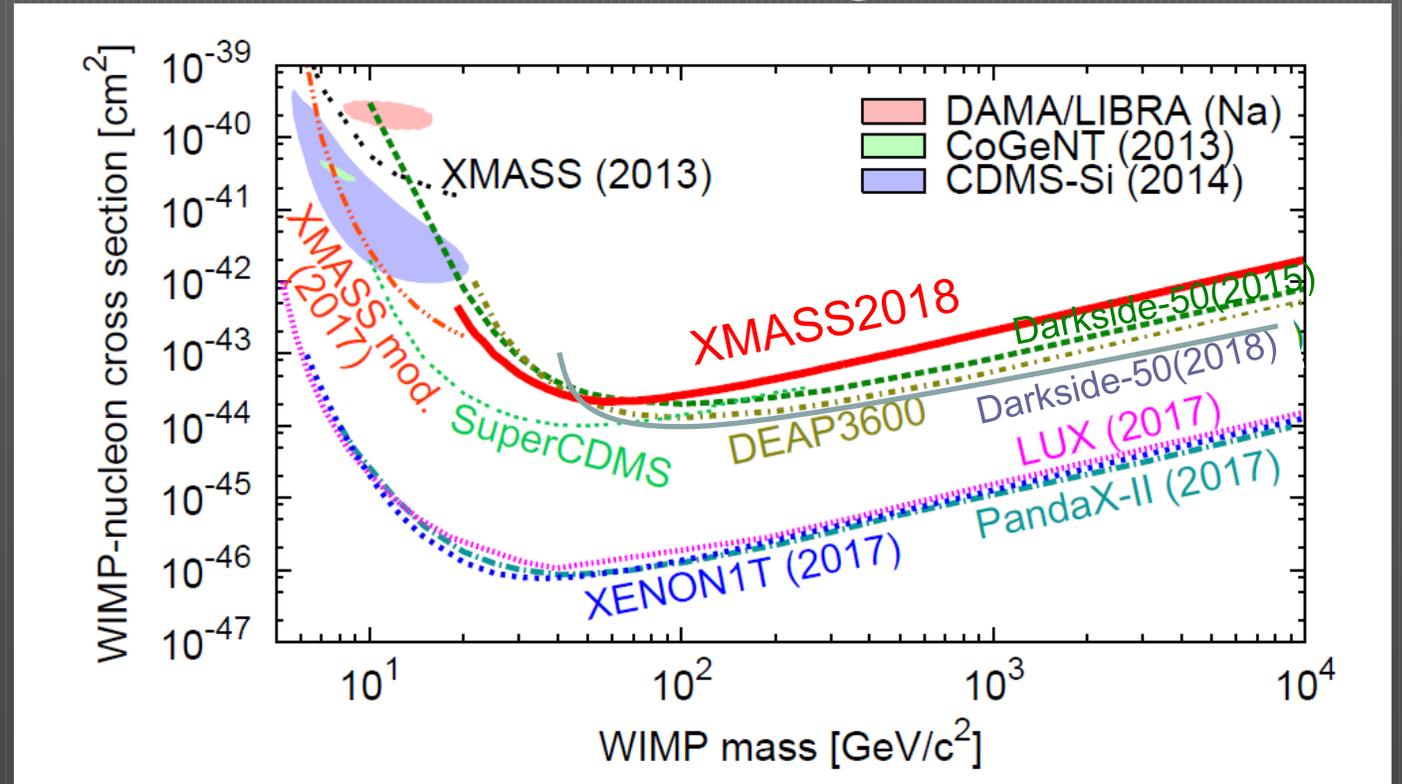
世界は3桁先を行っている

- Light region



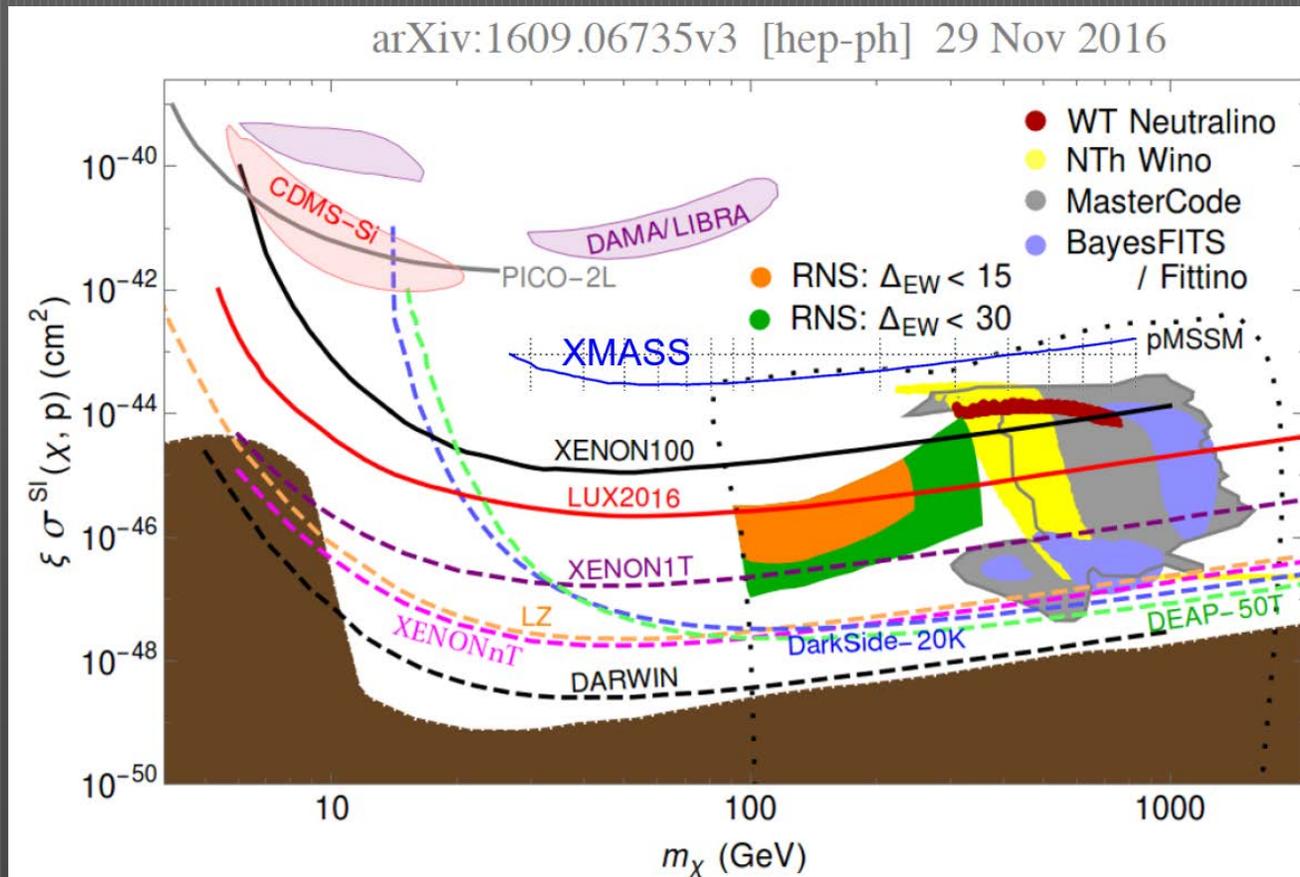
arXiv:1802.06994v1

- Standard region



SUSY-WIMPの発見のための次世代計画もNoble liquid

- Large mass/scalability especially Ar ←cost
- Large mass number especially Xe
- Passive BG rejection: self shielding by fiducialization
- Purification→low BG XMASS!!



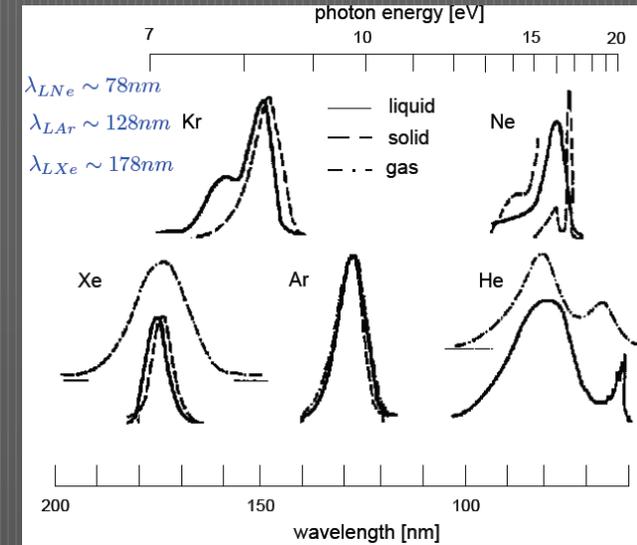
XMASSのRIは他と同レベルむしろ少ないくらいなのに負けている

せっかくのnoble liquid detectorの性質を使いきれしていない

結局Ar/Xeの10トンクラスの2相式TPCばかり

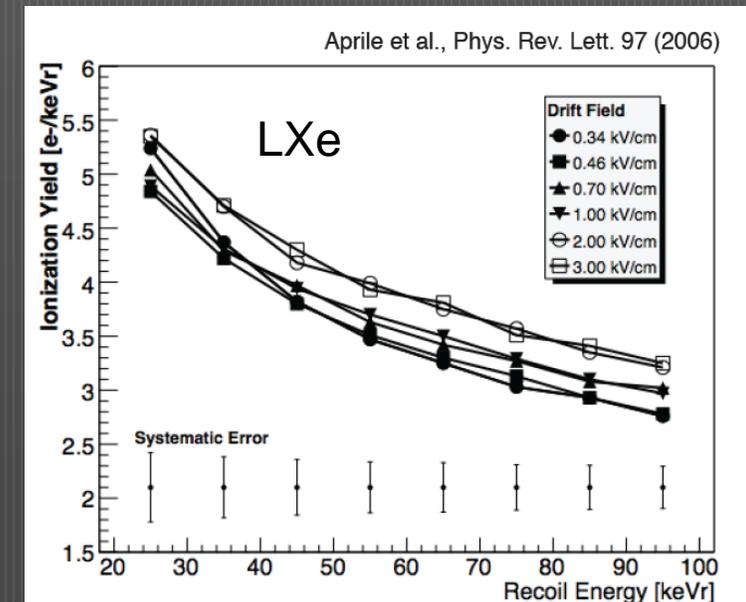
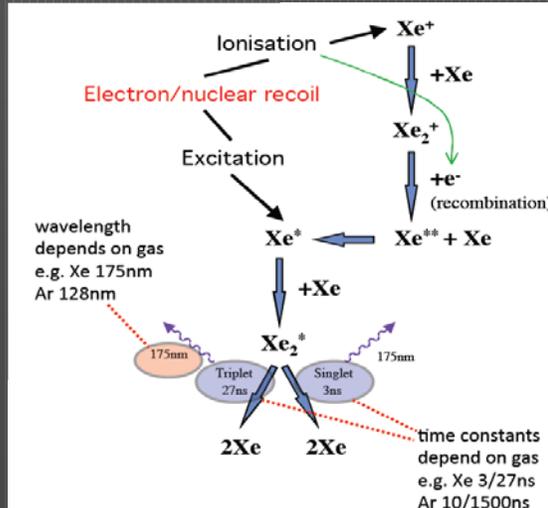
Noble Liquid detector

- scintillationとionizationの両方を検出可能
 - 高いシンチレーション効率 + 高い電離電子生成率
 - LXe: $W_{ph}=14.7$ eV $W=15.6$ eV
 - 自身に対して「透明」、長い透過長
 - 電場をかけた場合のドリフト速度も大きい
 - $\sim 1\text{cm}/\mu\text{s}$ @1kV/cm
- 励起とイオン化の比率からPID可能



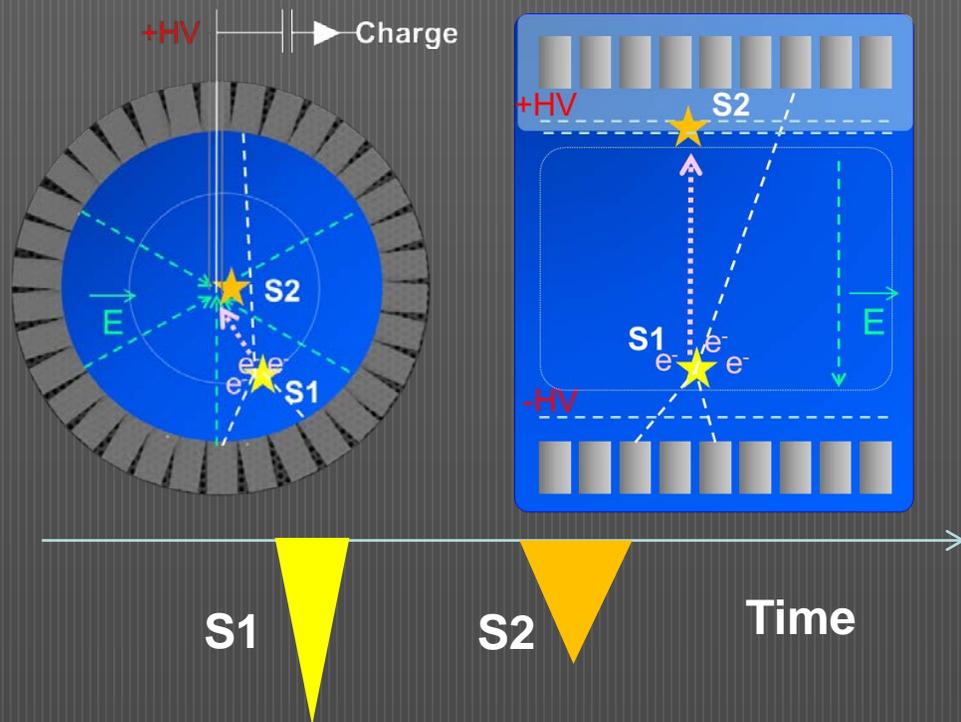
E. Aprile Phys. Rev. Lett 97(2006)

→Active BG rejection



やはりTPCでハード的に位置を再構成できるべきだ

- TPCとしては、電荷読み出しではなく比例蛍光を利用
 - ガス中の方が簡単: 二相式 液中ドリフト: ガス中電荷増幅



Start: S1 Direct interactionにPrimary scintillation

Stop: S2 S1発光時の電離電子を電場によりドリフトし、高電場で電荷増幅した際に発光するproportional scintillation

現在2相式Xe-TPCがもっとも成功

長期間の測定では気相-液相間の液面管理の問題

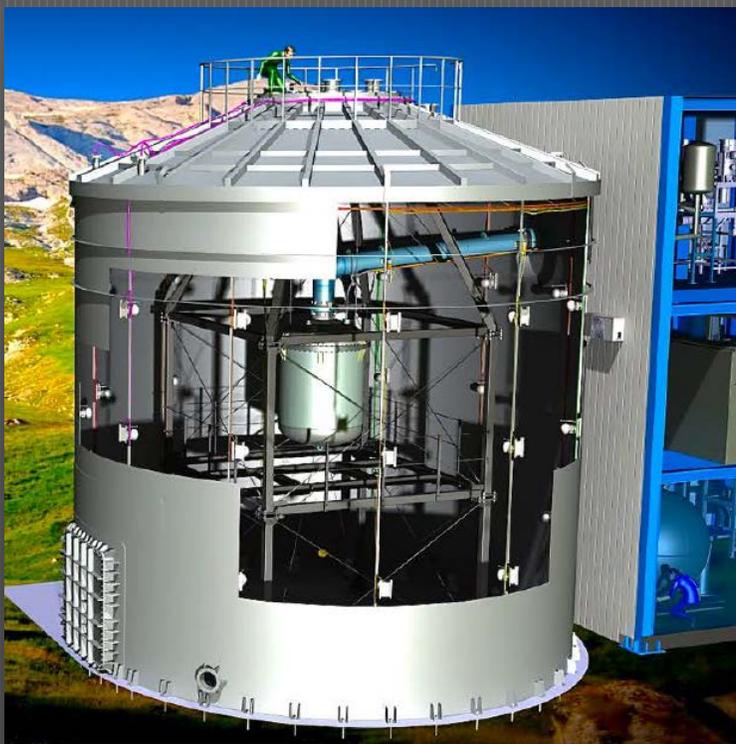


S2発光まで液中で行う1相式液体TPCを考える
液体のみなので形状に自由度ができる

「キセノンTPC、気液2相型と液体球状型」

I. 2相型をやるならXENONへ

- XMASSの一部が参加
詳細は Martens 23aK301-10
2018年2月のKMI school
E. Aprilのスライドから引用



The XENON Collaboration: 160 scientists

Logos of participating institutions: Columbia, Rensselaer, Nikhef, WWU, Stockholm University, JGU, MPIK, Freiburg, University of Zurich, Chicago, UCLA, UC San Diego, UCSD, Rice, Purdue University, Subotech, LPNHE, LAL, INFN, NYU Abu Dhabi, 東京大学 (The University of Tokyo), Nagoya University, Kobe University, and جامعة نيويورك أبوظبي (NYU Abu Dhabi).

ちなみにArでも

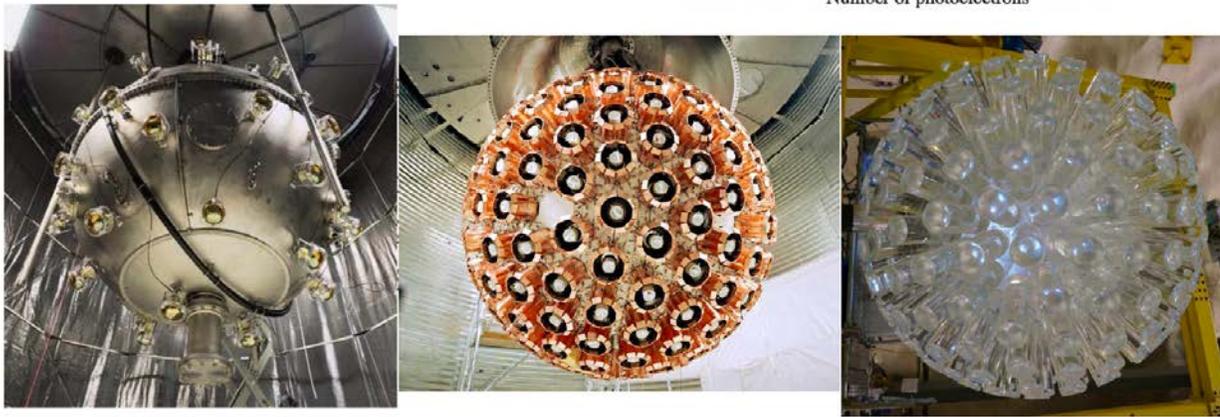
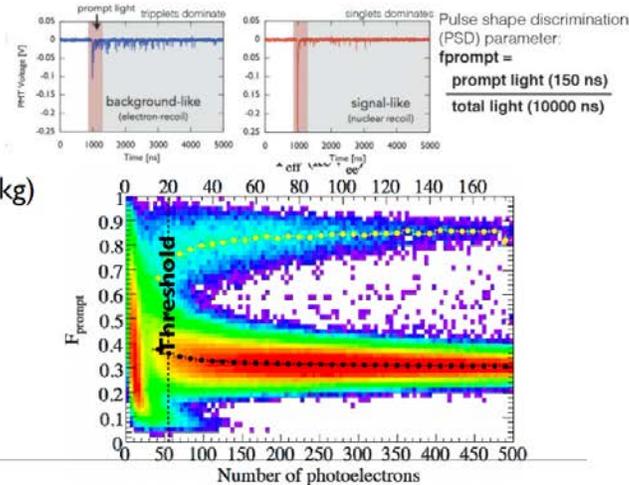
• DEAP → DarkSide 20kに合流

arXiv:1707.08145v1

DEAP-3600 @ SNOLAB

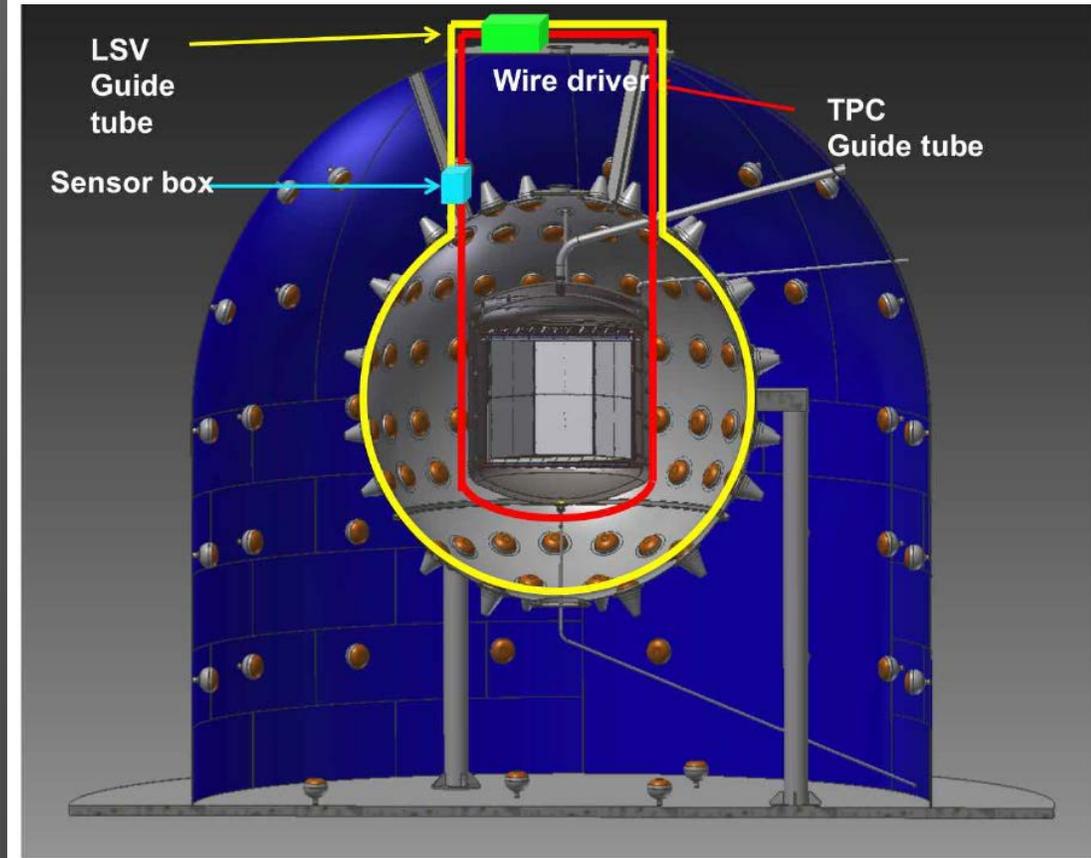
Single-phase liquid argon (no E-field)

- 3.6 T of LAr, ~1 T fiducial
- High ^{39}Ar background when using $^{\text{nat}}\text{Ar}$ (~1 Bq/kg)
- Excellent discrimination using pulse shape. Prediction: $\sim 10^{10}$ ER suppression
- Higher energy threshold compared with Xe detectors
- Collecting data since late 2016
- Projected sensitivity $10^{-46} \text{ cm}^2 @ 100 \text{ GeV}/c^2$



90

The DarkSide Collaboration: DarkSide-20k



XENON1T

The phases of XENON

XENON10

XENON100

XENON1T



2005-2007

2008-2016

2012-2018

25 kg - 15cm drift

161 kg - 30 cm drift

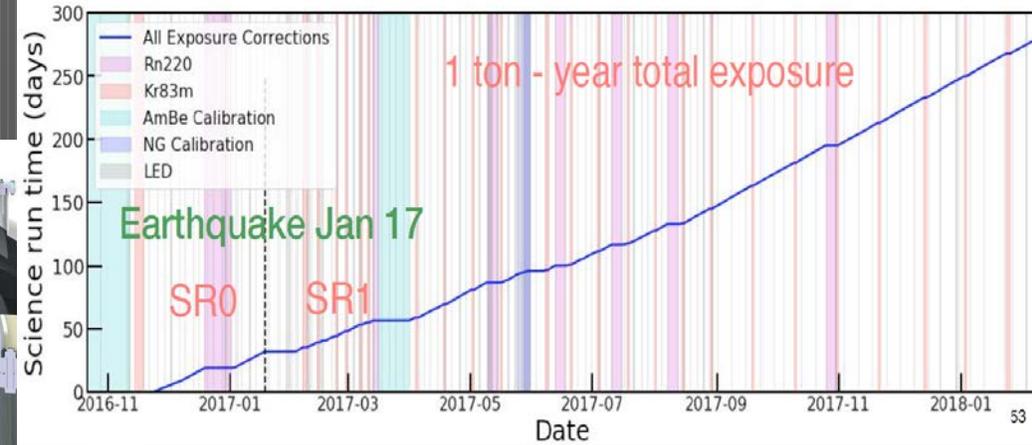
3.2 ton - 1 m drift

$\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$

$\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$

$\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$

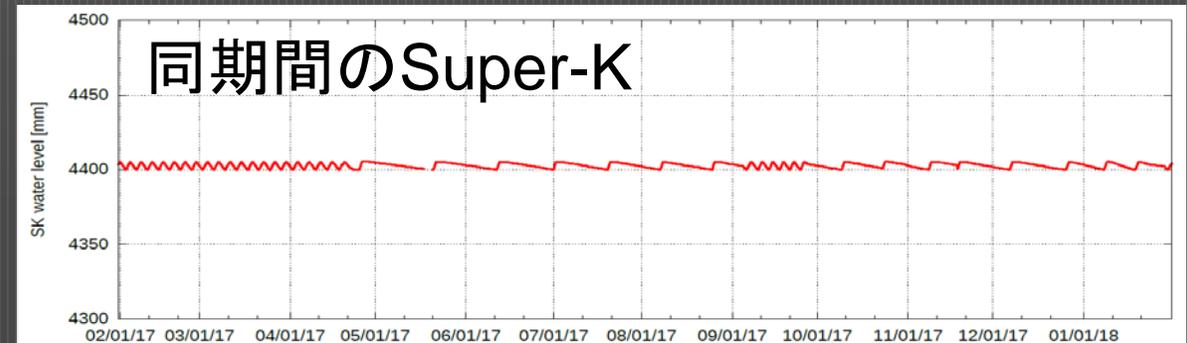
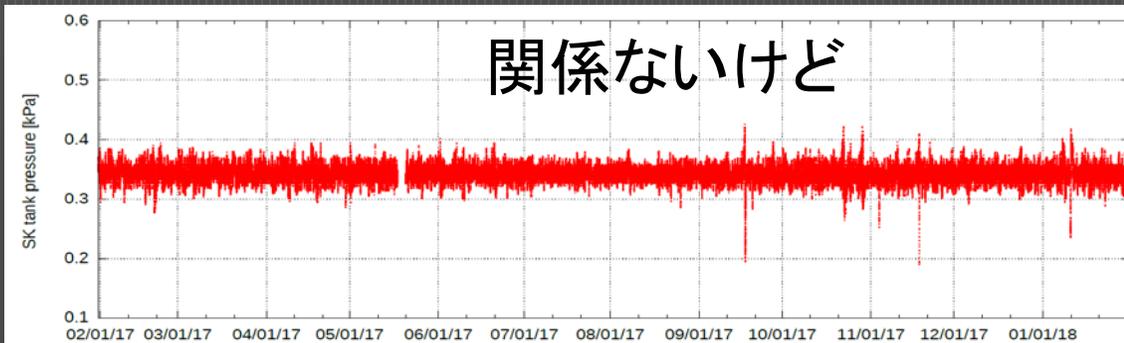
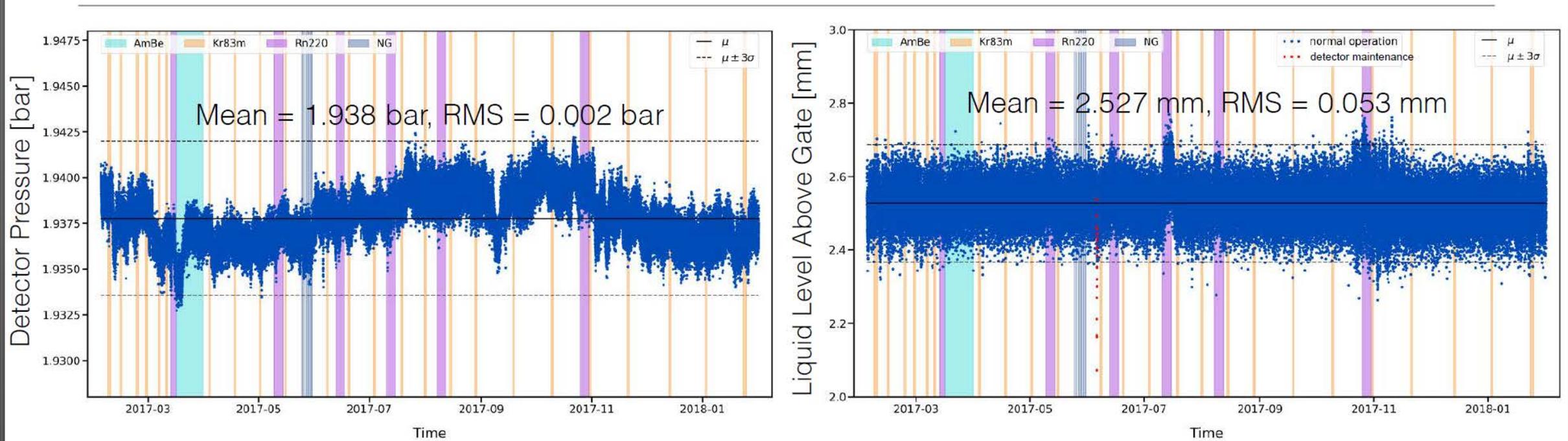
- Detector still running smoothly and taking data with high efficiency
- SR0 (34.2 days): best SI limit $7.7 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ at 35 GeV/cm^2 (PRL 119, 2017)
- SR1 (246.7 days): improved detector stability - calibration statistics - refined analysis
- Total Exposure: 1 ton-year for the estimated 1.3 ton fiducial mass!



- 3.2 t LXe @180 K
- 2.0 t active target
 - ~1 meter drift length
 - ~1 meter diameter
- Blind analysis
 - 間もなくData openの予定らしい

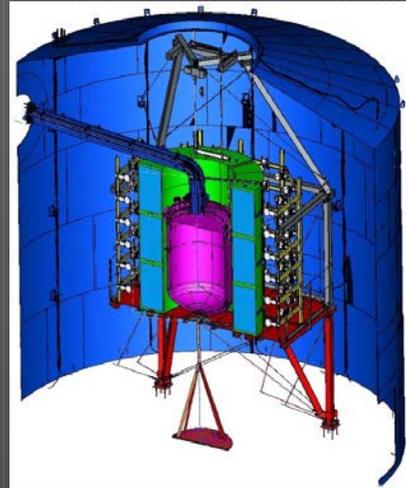
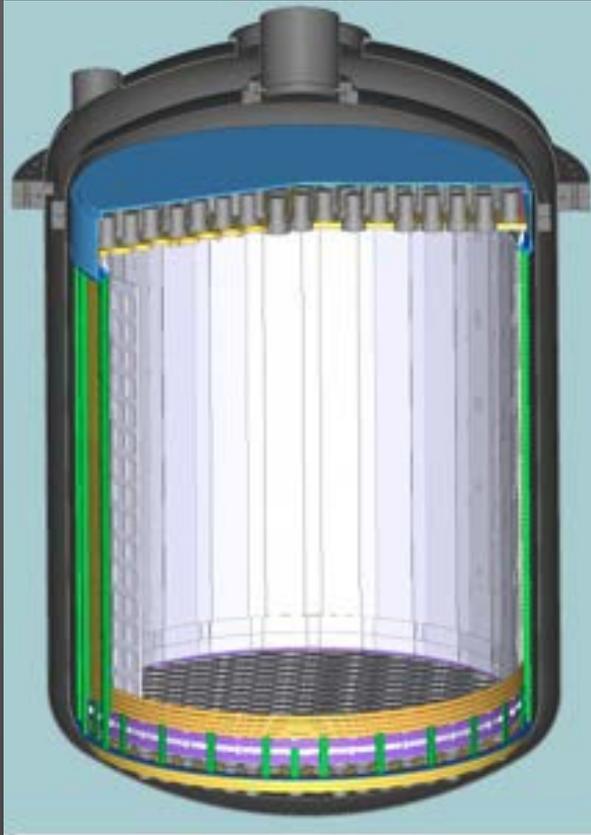
液面の問題

- 圧力と液面のStability



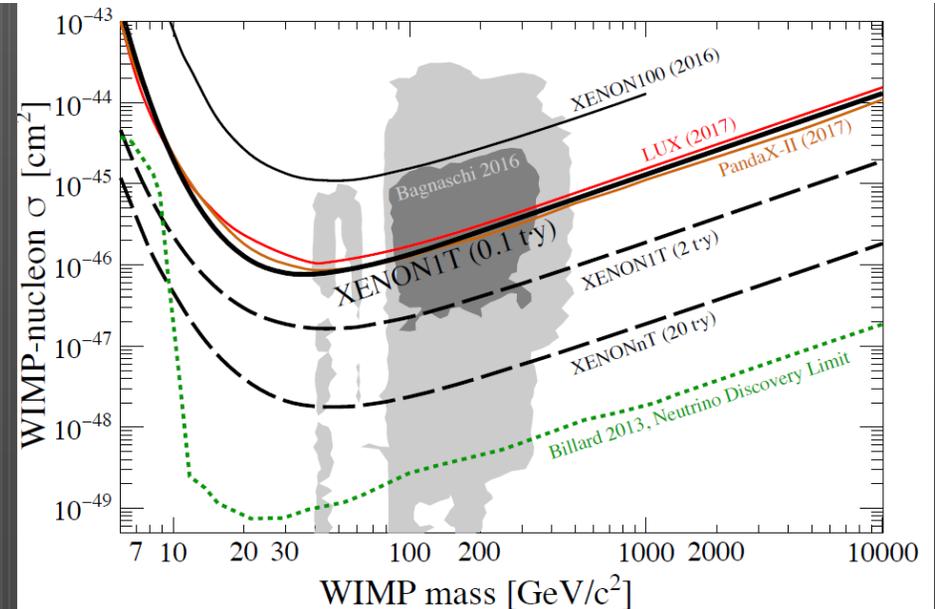
XENON nT

- 2019年スタート



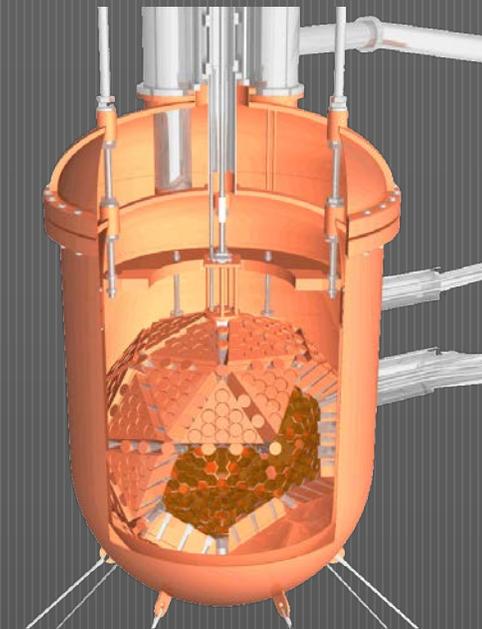
- 8.5 t LXe @180 K
- 5.9 t active target
 - ~1.5 meter drift length
 - ~1.5 meter diameter
- 476PMT

- A rapid upgrade to XENON1T, with a new TPC with 4 x target mass than XENON1T
- Most sub-systems, already operative, designed with this upgrade in mind
- Main challenge: reduce Radon by x 10

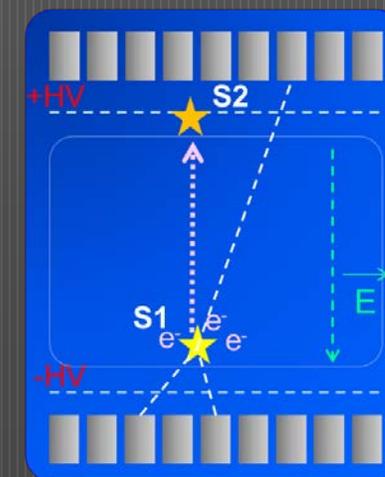
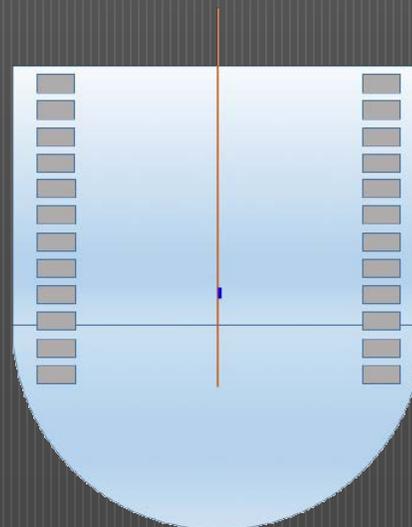
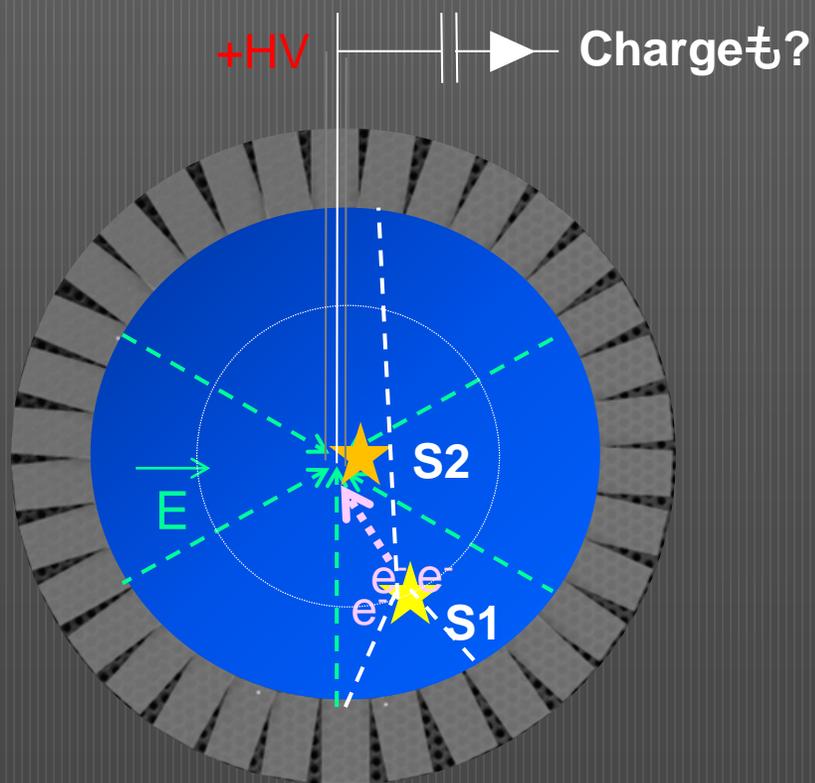


II. 我が道を行く

- 既存のものを急いで有効活用したい(したかった。)
- なるべくそのままなら「液体球状型」



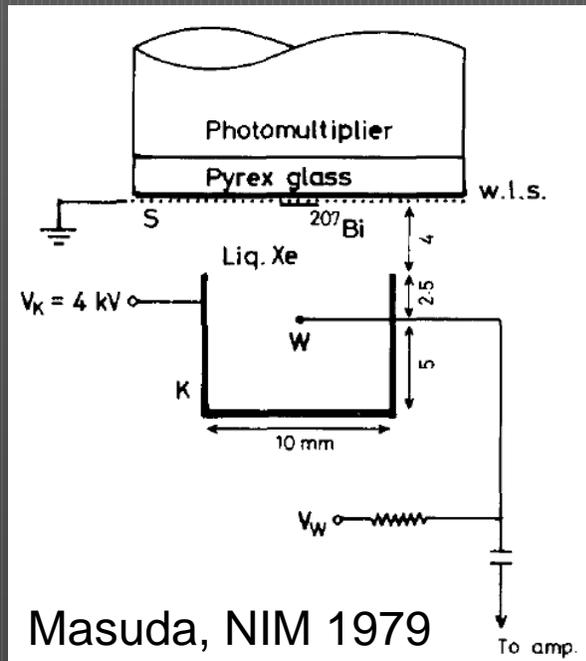
- キセノン容器をそのまま利用して「円筒形」も可能ではある
 - 例えば半径38.6 cm、高さ58.1cmのActive volumeの円筒形を確保できる。
 - LXeの質量は約805 kgで今ほぼと同じ



液中S2

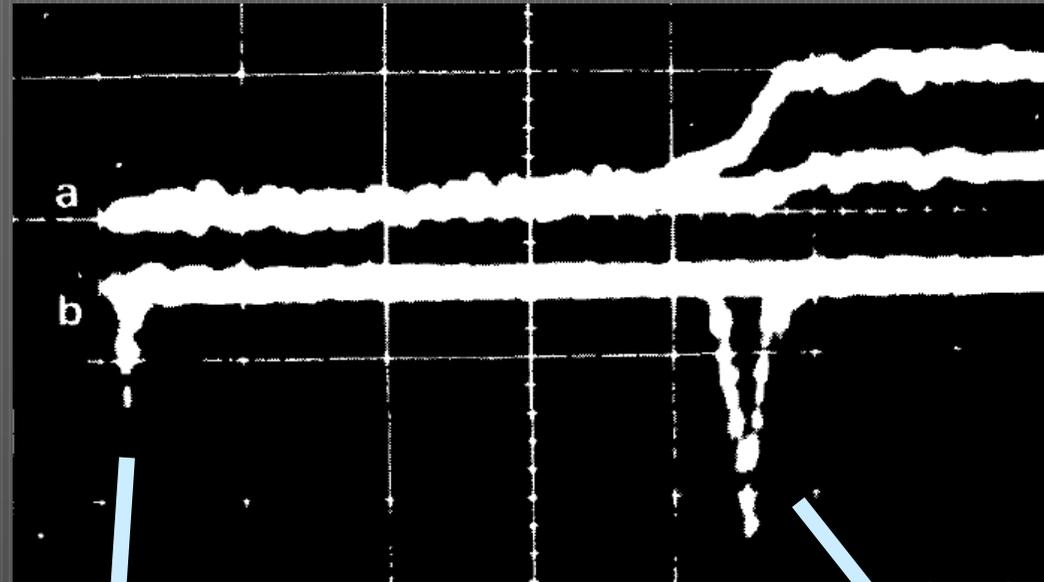
- 2相式より前、1970年代に元々はLXe Proportional counterの研究がされていた

ワイヤー電極(Bi207 γ 線1MeV)

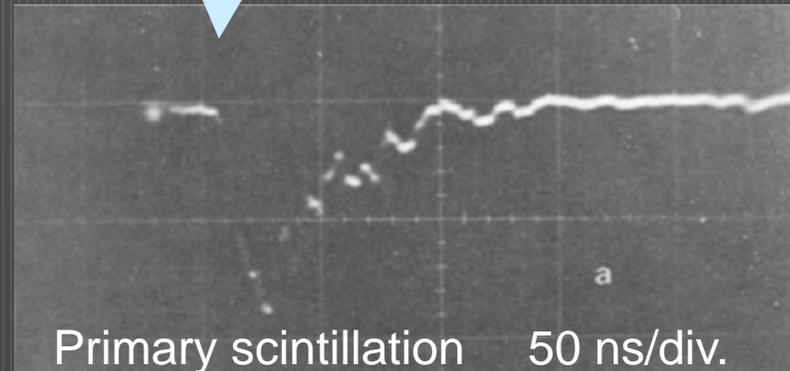


Masuda, NIM 1979

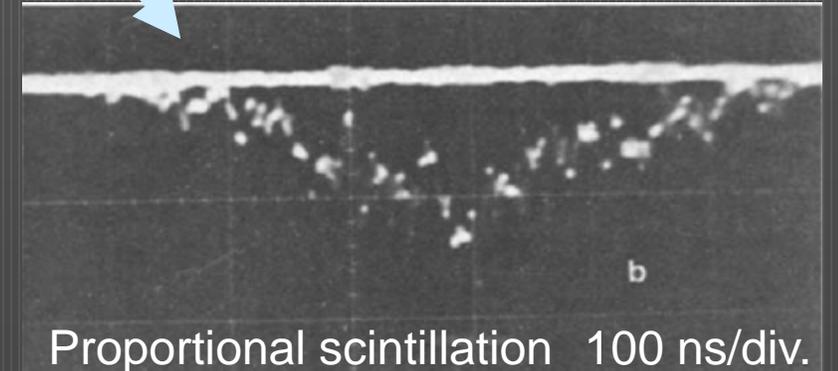
Miyajima, NIM 1976



Charge Amp 出力



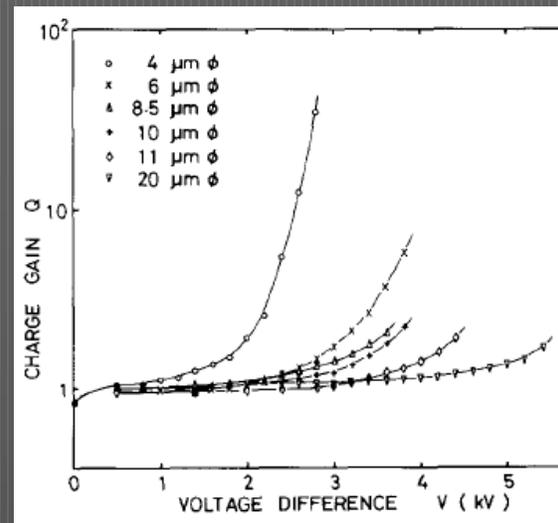
Primary scintillation 50 ns/div.



Proportional scintillation 100 ns/div.

1相型LXeTPCへ向けての開発/検証項目

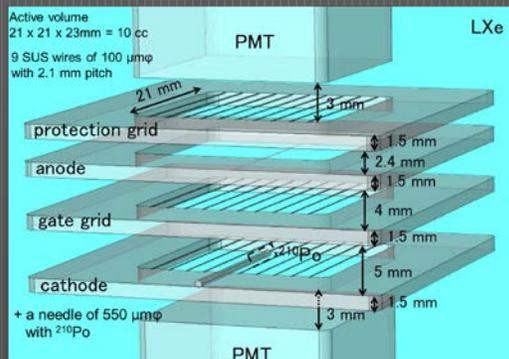
- ・ S2が発生するための電場(kV/cm)のしきい値
- ・ 1電離電子あたりのS2の発光量 gain (ph/e⁻)
- ・ 低エネルギー信号(<10keV)でS2発光可能か efficiency



Masuda, NIM 1979

Φ20μmワイヤー

S2 threshold: **410kV/cm**



Aprile
JINST 2014

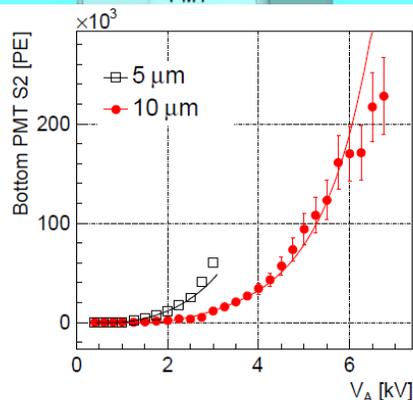
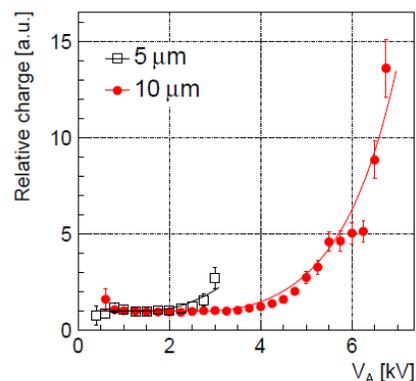


Table 2. Results from a simultaneous fit of the 10 and 5 μm data and individual fits of the 10 and 5 μm data. The last line shows the S2 gain factor after converting PE to ph/e^- using the conversion factor g .

parameter	10 & 5 μm	only 10 μm	only 5 μm
θ_0 : charge gain factor [$1/(\mu\text{m}\cdot e^-)$]	0.80 ± 0.10	1.15 ± 0.15	1.46 ± 0.02
θ_1 : slope in charge gain [kV/cm]	242 ± 45	561 ± 119	298 ± 1
θ_2 : threshold of charge mult. [kV/cm]	725 ± 48	586 ± 47	750 ± 1
θ_3 : S2 gain factor [PE/(kV/cm·μm)]	16.6 ± 1.1	13.3 ± 0.4	17.9 ± 3.4
θ_4 : threshold of S2 [kV/cm]	412 ± 10	399 ± 7	416 ± 13
χ^2/ndf	125/63	71.4/42	19.9/16
θ_3 : S2 gain factor [$ph/e^-/(\text{kV/cm}\cdot\mu\text{m})$]	$(2.09^{+0.65}_{-0.47}) \times 10^{-2}$	$(1.68^{+0.51}_{-0.36}) \times 10^{-2}$	$(2.26^{+0.80}_{-0.65}) \times 10^{-2}$

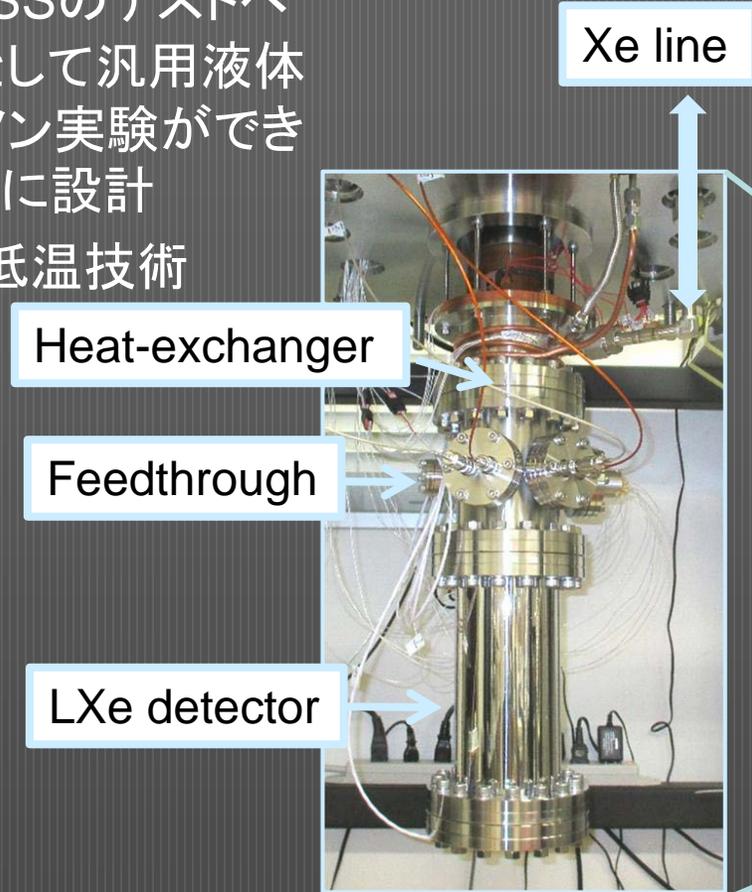
本研究開発の方針

- ワイヤーによる液中でのS2を観測する
 - Aを用いて閾値400kV/cmを確認する
 - 課題:どこまで低エネルギーで実現できるか
 - ^{207}Bi (0.55, 1.05MeV γ , 0.98MeV β)
K. Masuda et al., Nucl. Instrum. Meth. 160 (1979) 247
 - ^{109}Cd (22keV γ) 鈴木聡 日本物理学会Vol.53, No.3, 1998
 - ^{210}Po (5.4MeV α) E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012
- 球状LXe-TPCを見据えつつ、単純な形状でR&Dを行う。
 - ワイヤーを用いたXMASS円筒形化
 - 「球状電極」の開発

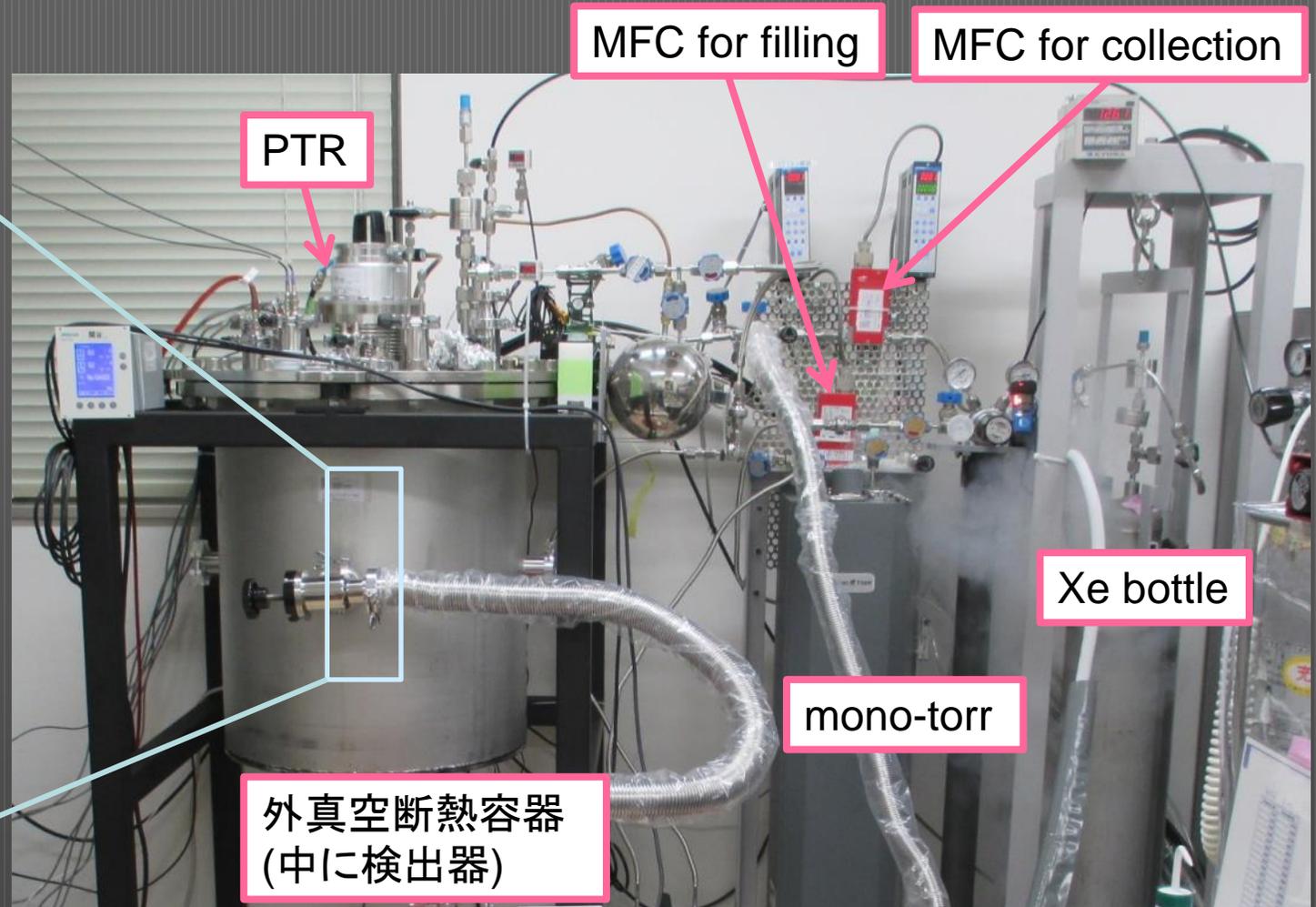
開発環境 Cryogenics

Xeは検出器へ導入する際にゲッターを通して純化

- XMASSのテストベンチとして汎用液体キセノン実験ができるように設計
- KEK低温技術



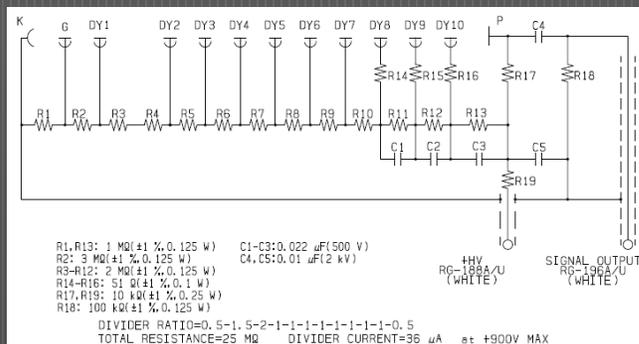
LXe operated at
Temperature -101.9°C
Pressure 0.045MPa(G)



中身

- PMT: 電位はGNDであってほしい
 - MEG用の低溶出ベースに+HV用のもの開発

R8520-406
光電面24mm□



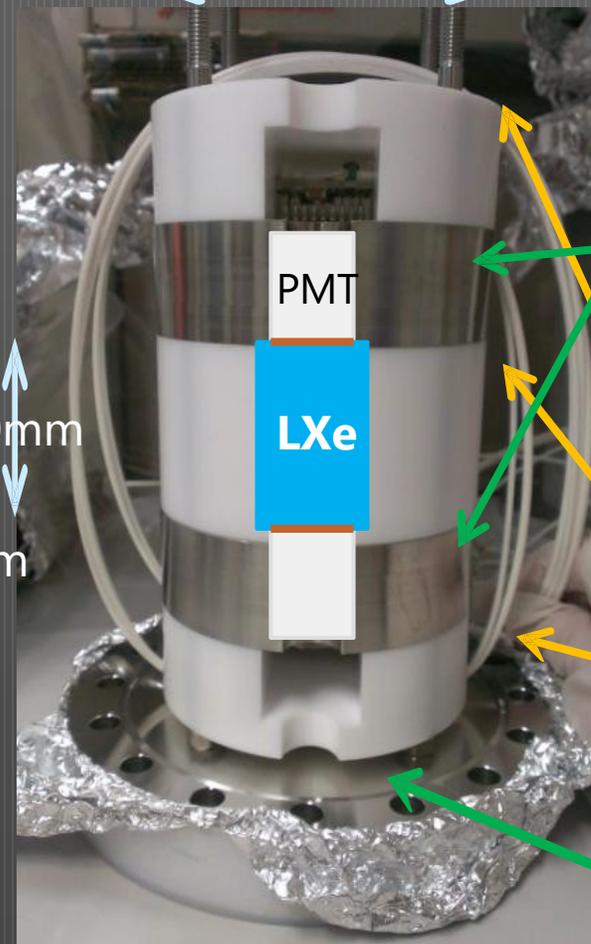
- キセノン量をセーブするための
テフロンスペーサー導入

LXe領域 24mm□ × 50mm

使用するXe: 1.7kg
~ 560cc(liq), 280L(gas)

Φ95mm

50mm
230mm

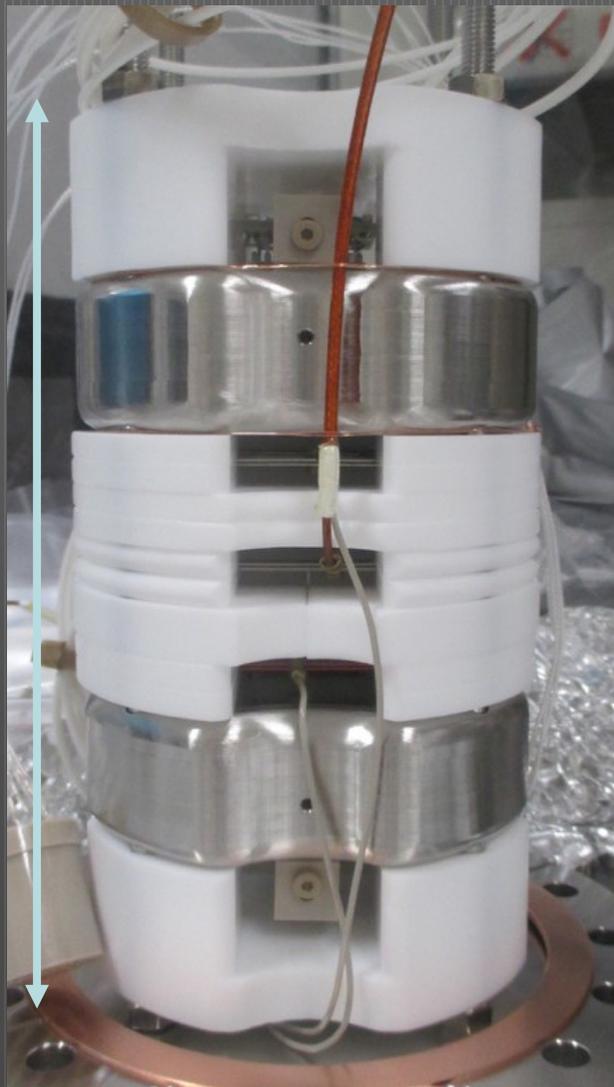


PMTホルダー
(SUS)

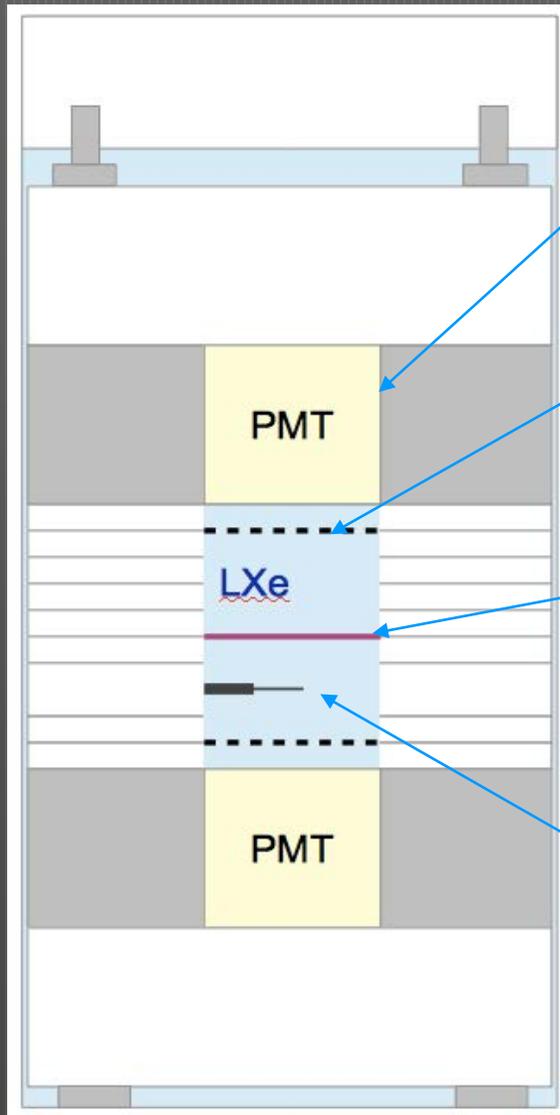
テフロンスペーサー

ICF152フランジ

ワイヤーセットアップ



170mm



50mm

Hamamatsu
R8520-406

24mm□
+HV



GND wires

Au coated
10μm W wire

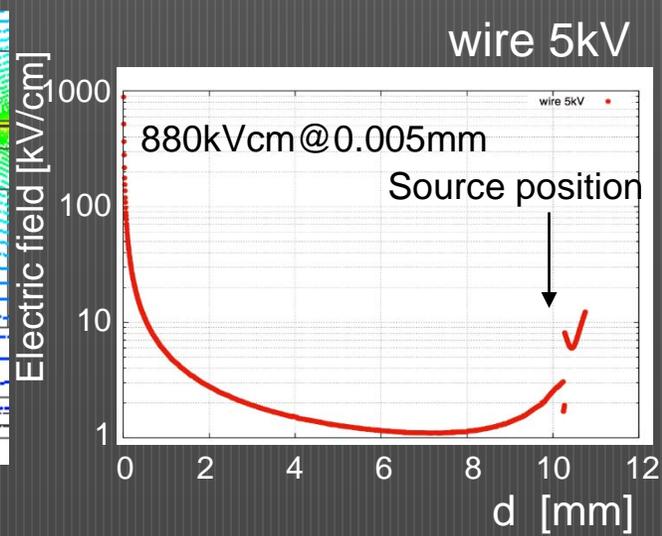
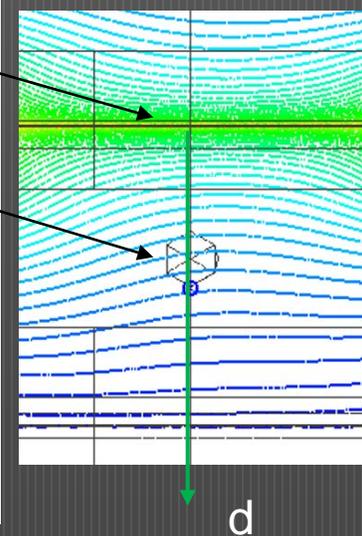
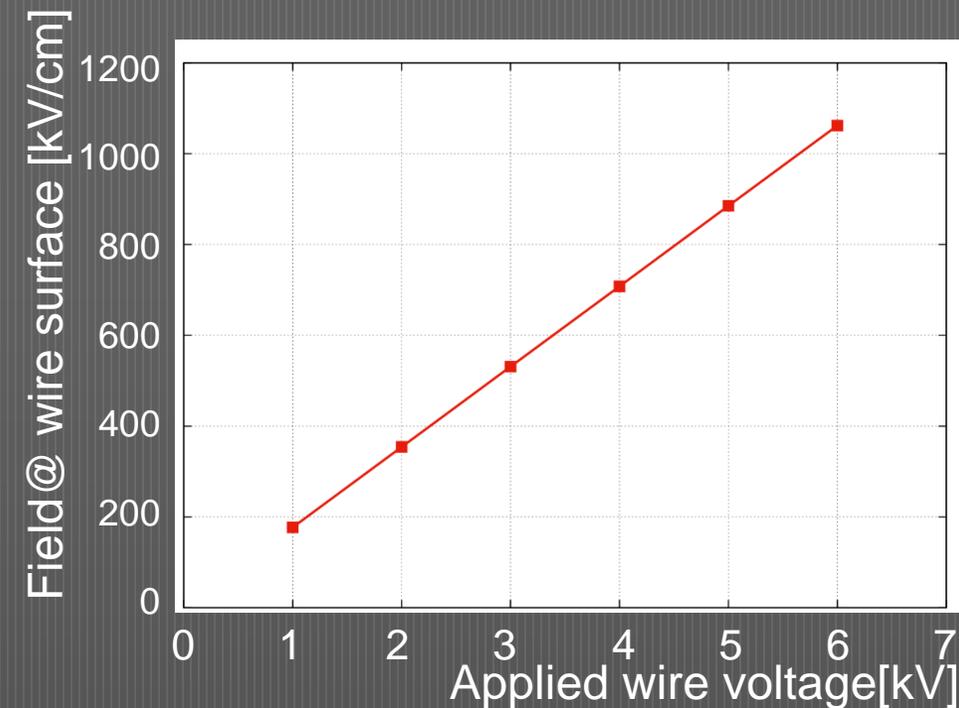
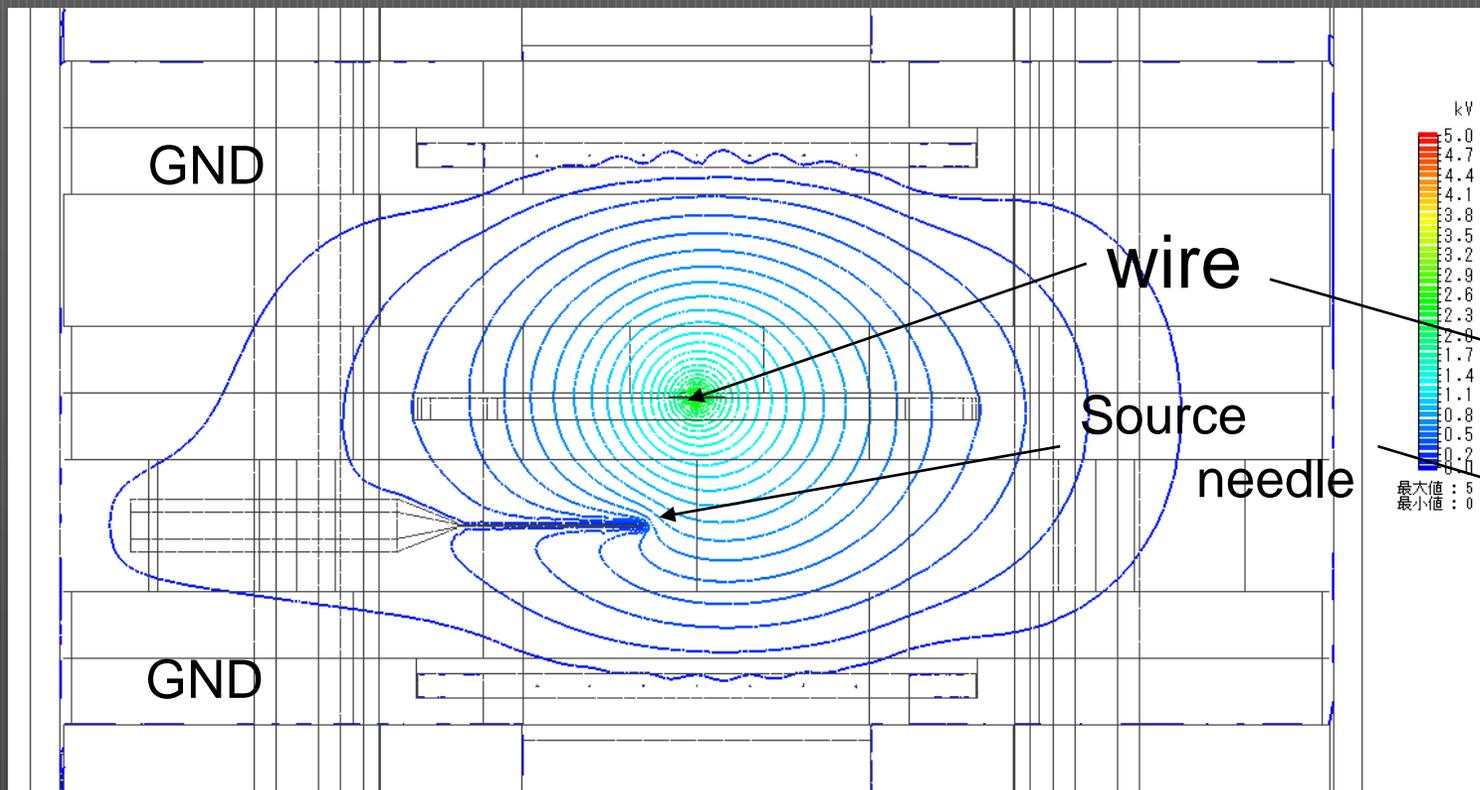
^{241}Am

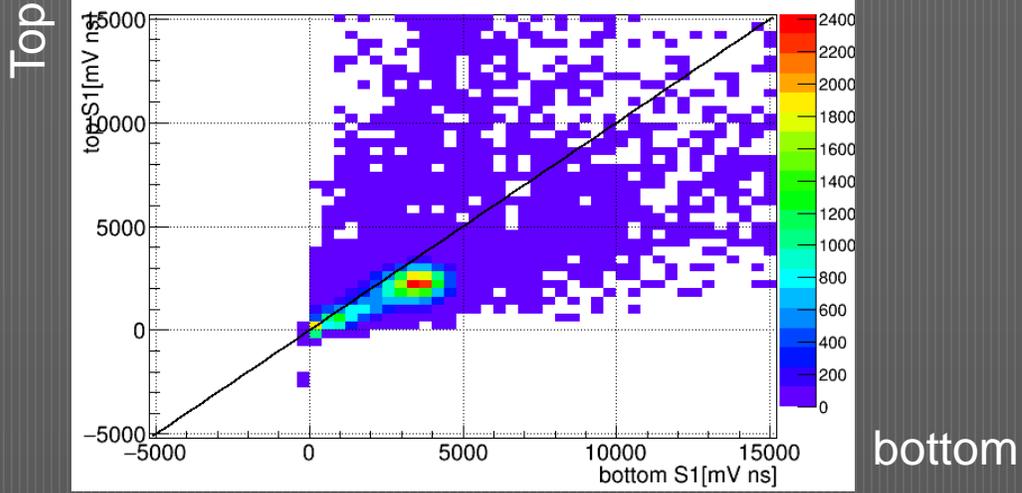
γ : 59.5, 26.4keV
X: 20.8, 17.8, 13.9keV
 α : 5.49, 5.44MeV



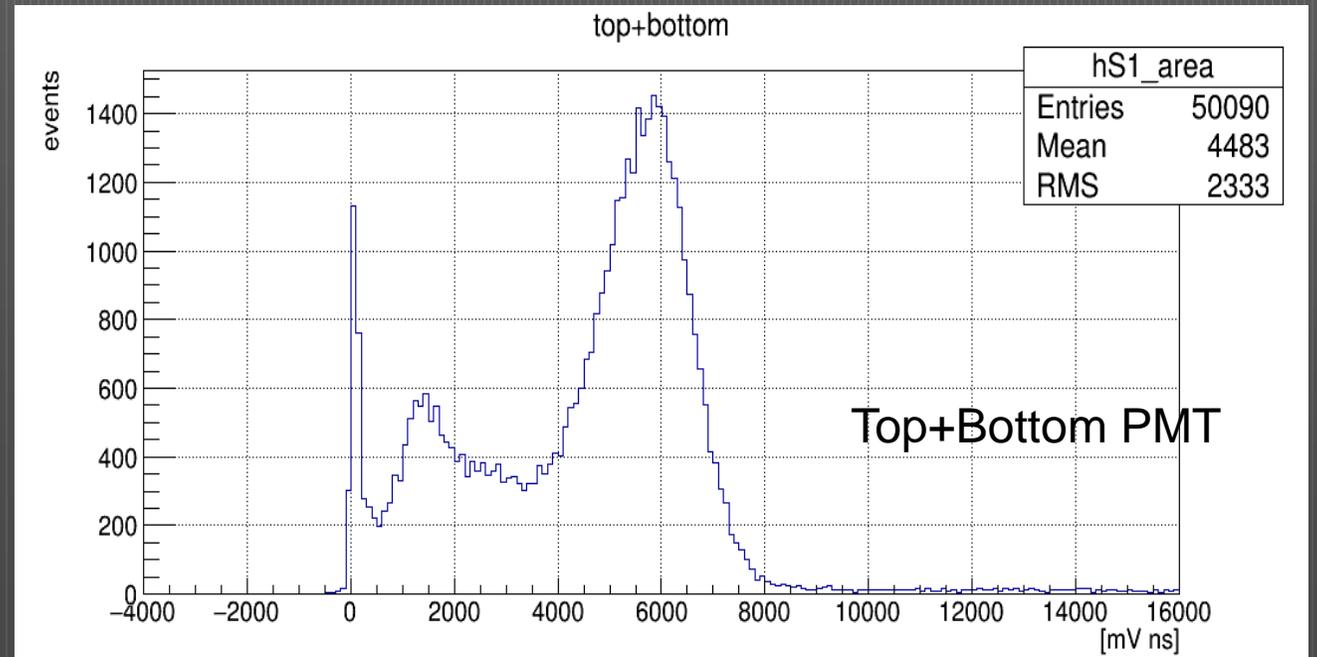
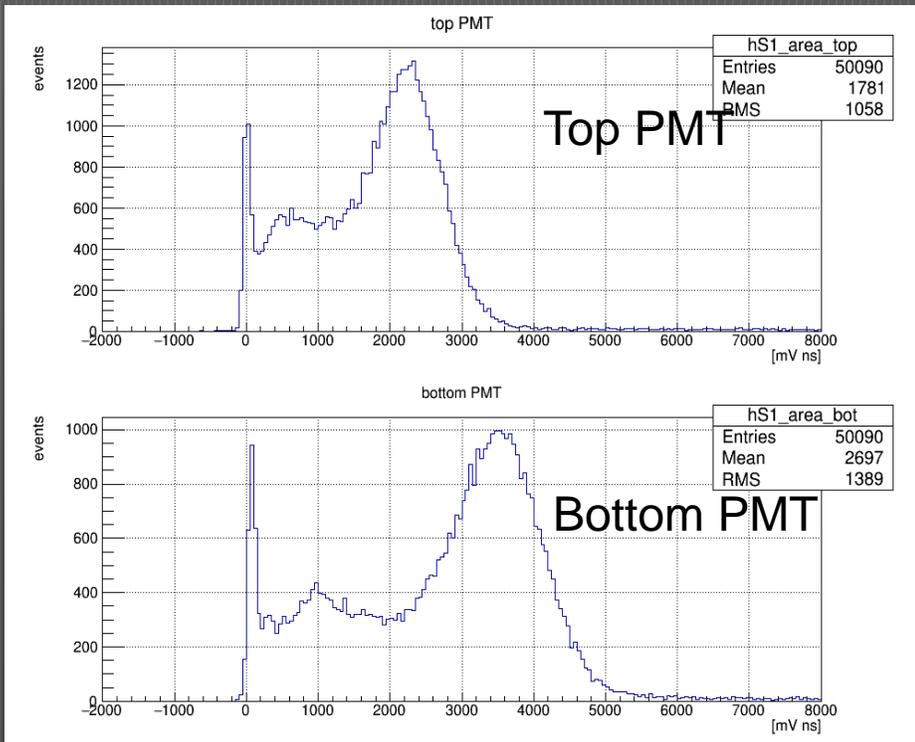
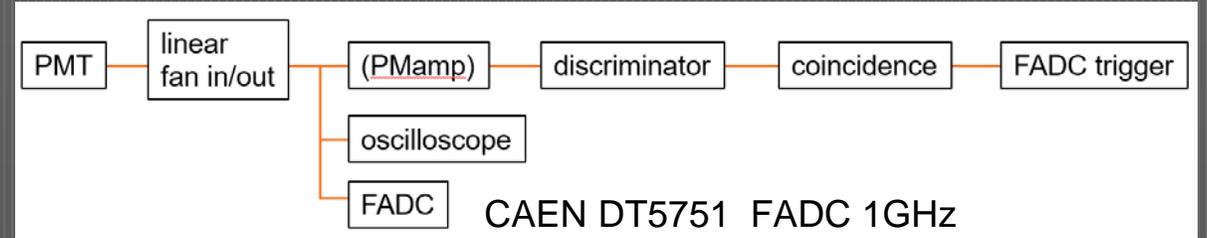
Formed electric field

- 5kV → 880kV/cm @ wire surface





S1 59.5keV signal @0V

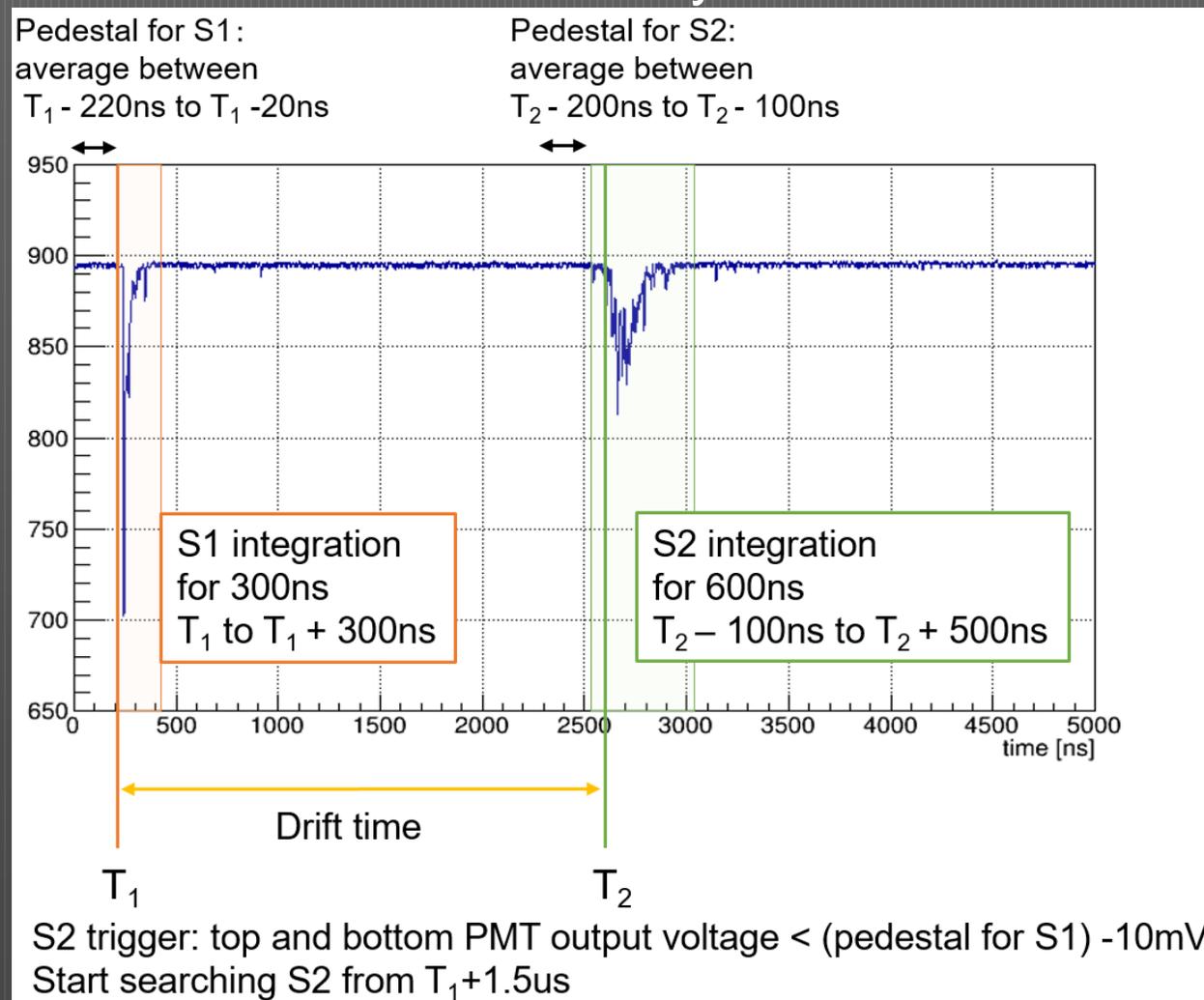
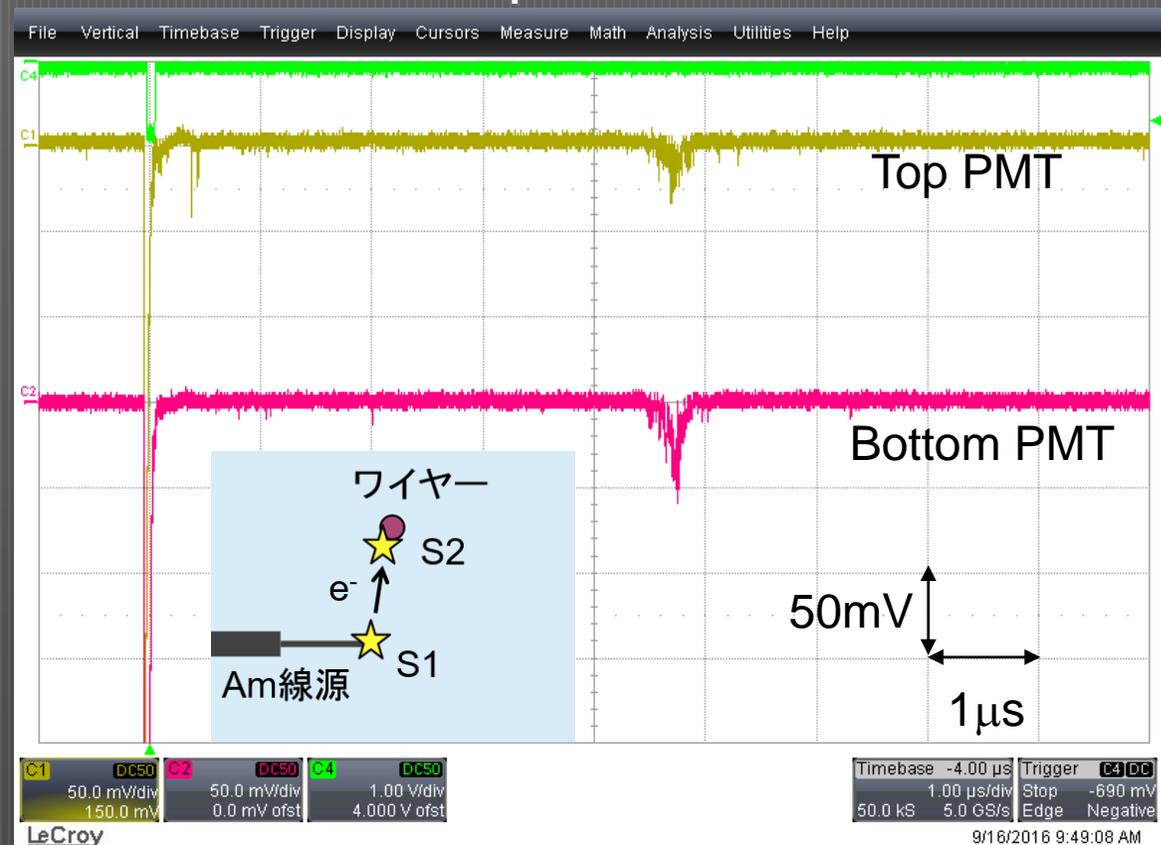


• LY ~ 10 p.e./keV

S2 signal @ 4.5kV

- Oscilloscope

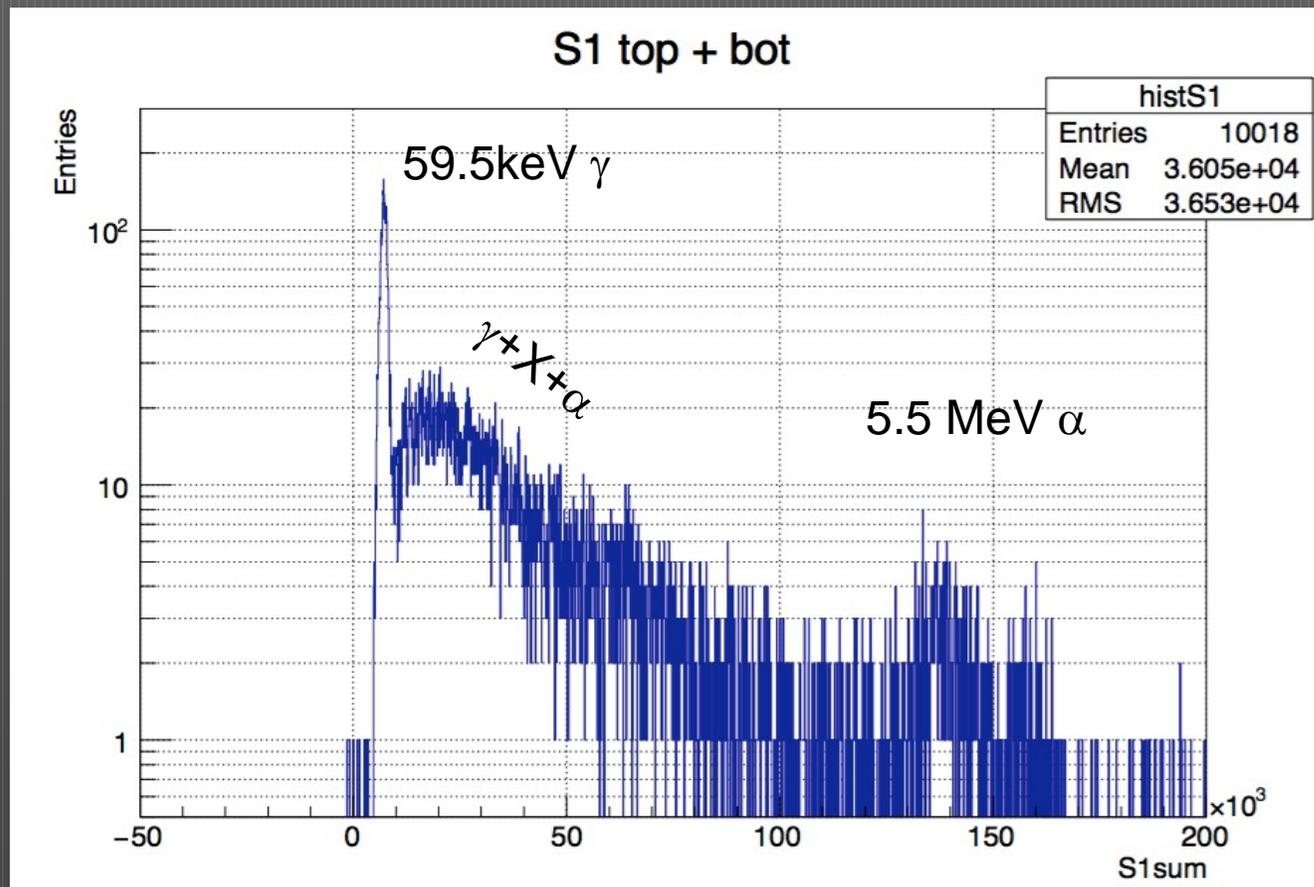
- FADC for analysis



- $E_{\text{drift}} \sim 1.6\text{kV/cm} \rightarrow \sim 0.2\text{-}0.3\text{cm}/\mu\text{s}$
- source-wire: 1cm $\rightarrow \sim 4\text{-}5\mu\text{s}$

5.5MeV α によるS2あって,59.5keV γ によるものではない

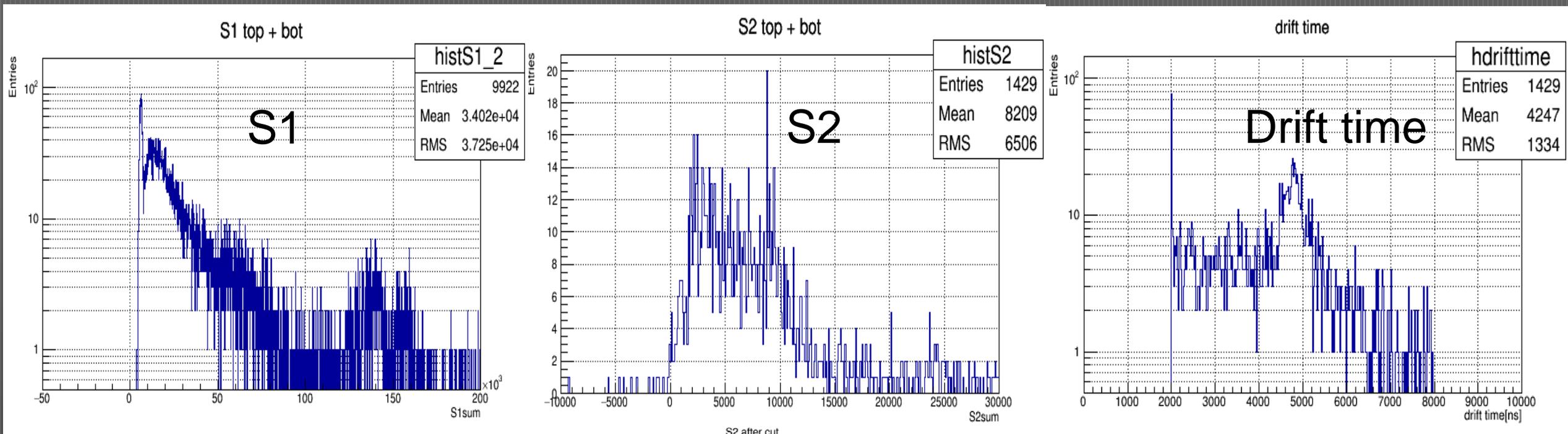
- S1 spectrum @0kV



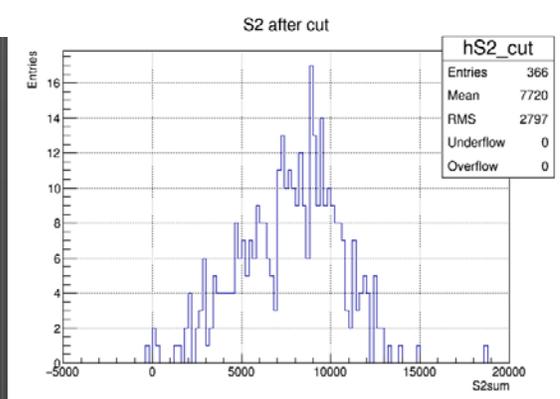
γ : 59.5, 26.4keV
 X : 20.8, 17.8, 13.9keV
 α : 5.49, 5.44MeV

S1, S2 and drift time distributions @ wire 4.5kV

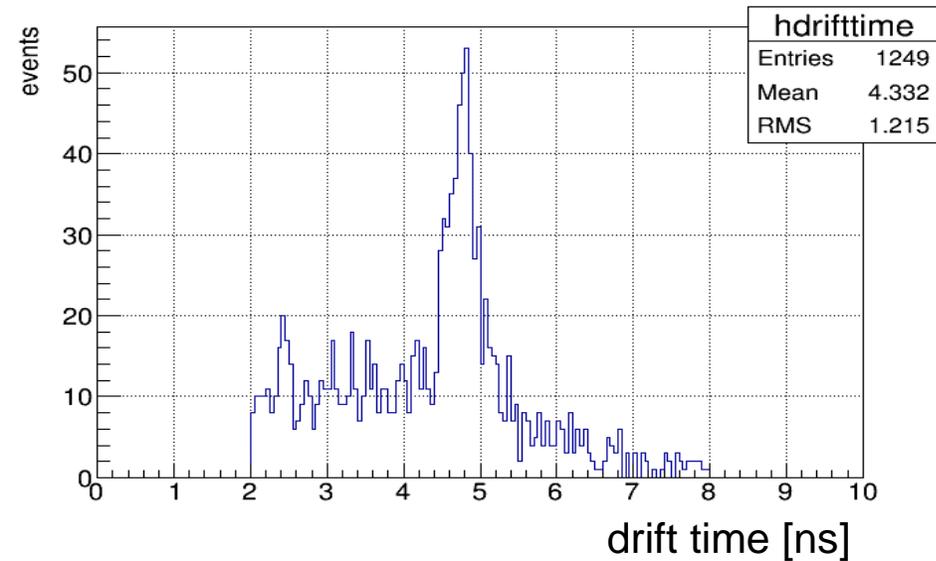
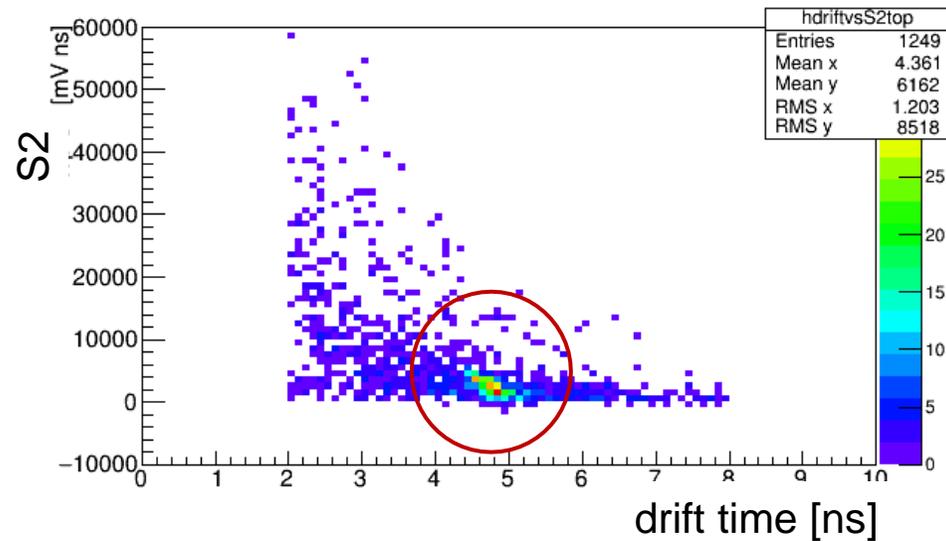
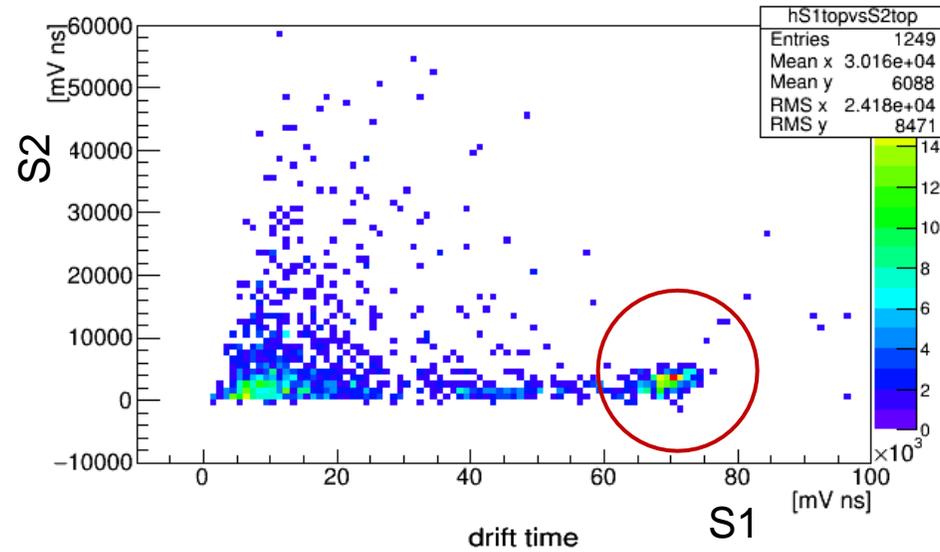
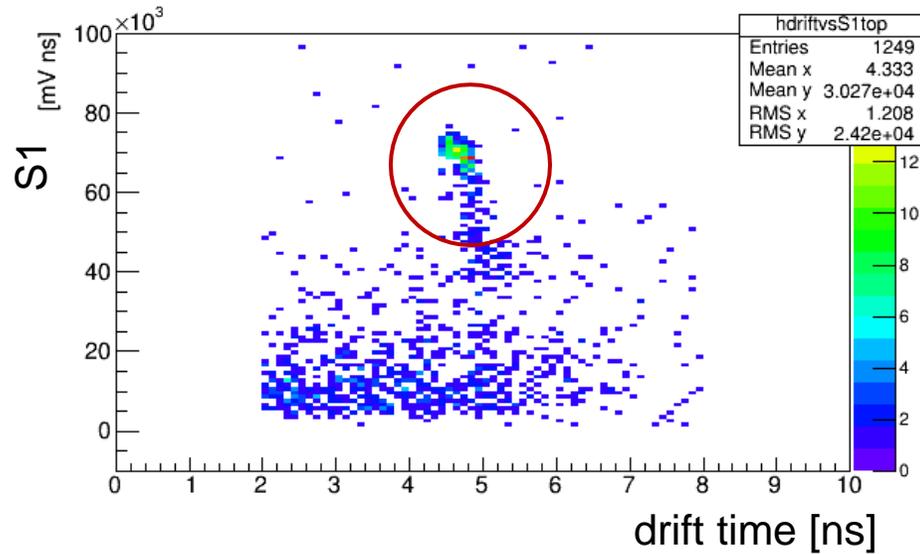
- 800kV/cm @ wire surface



S2 after α selection



α イベントの様子 @4.5kV

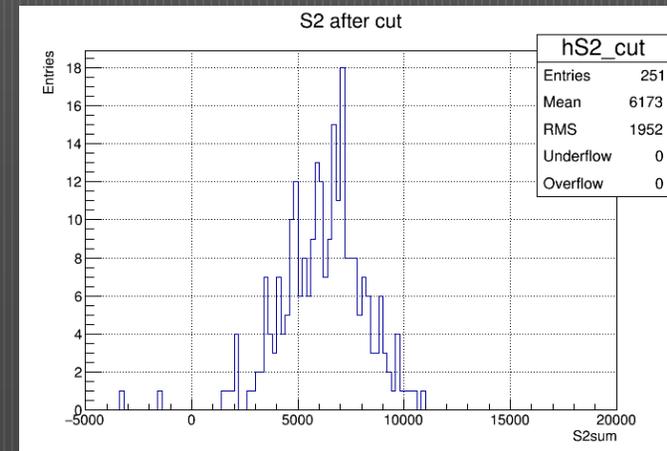
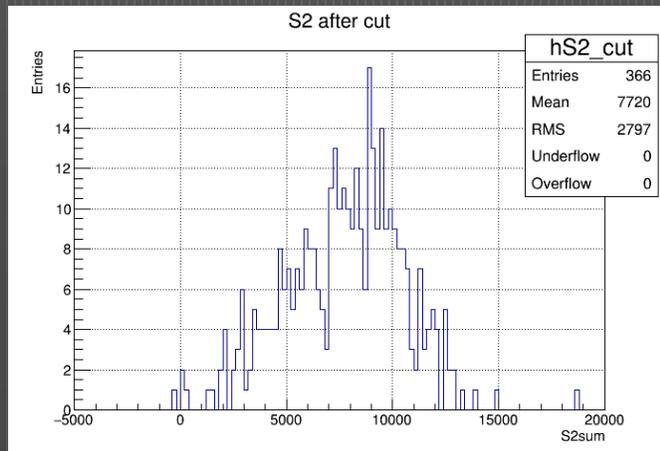
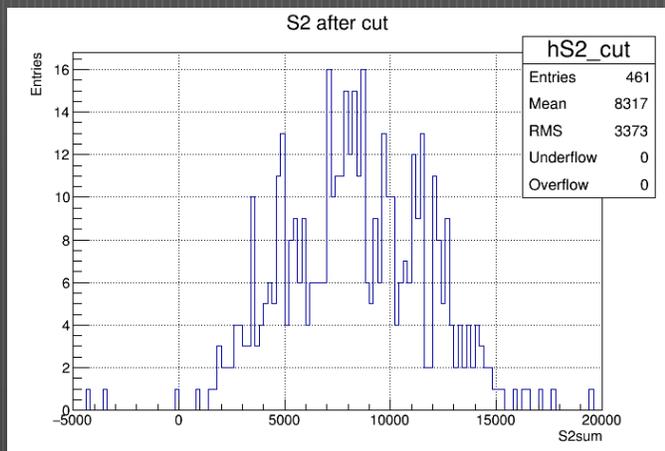
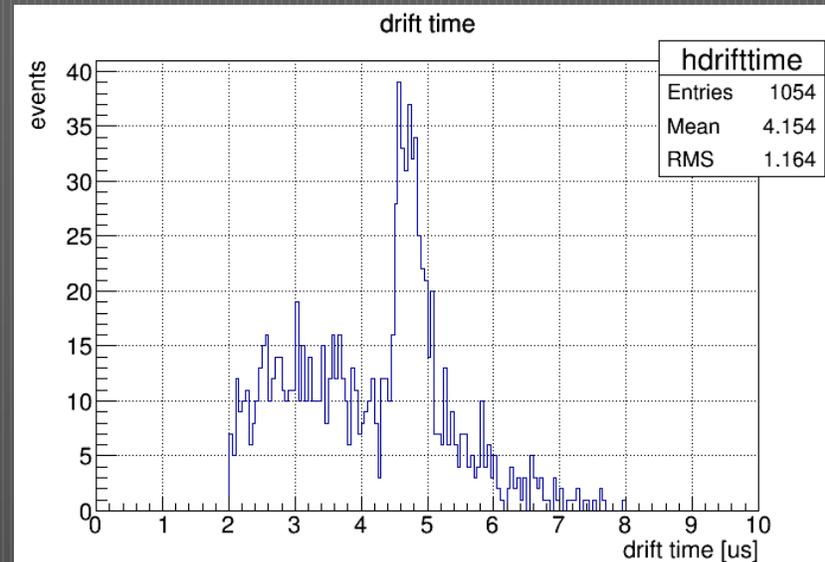
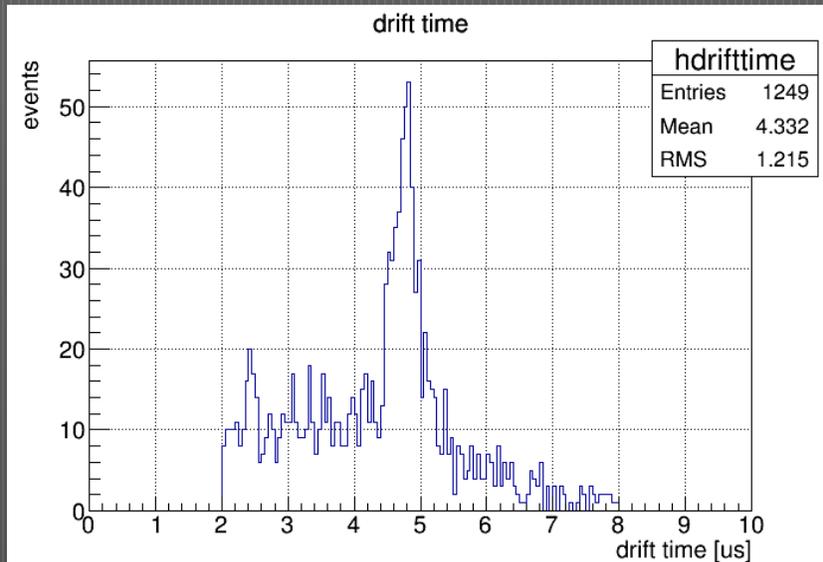
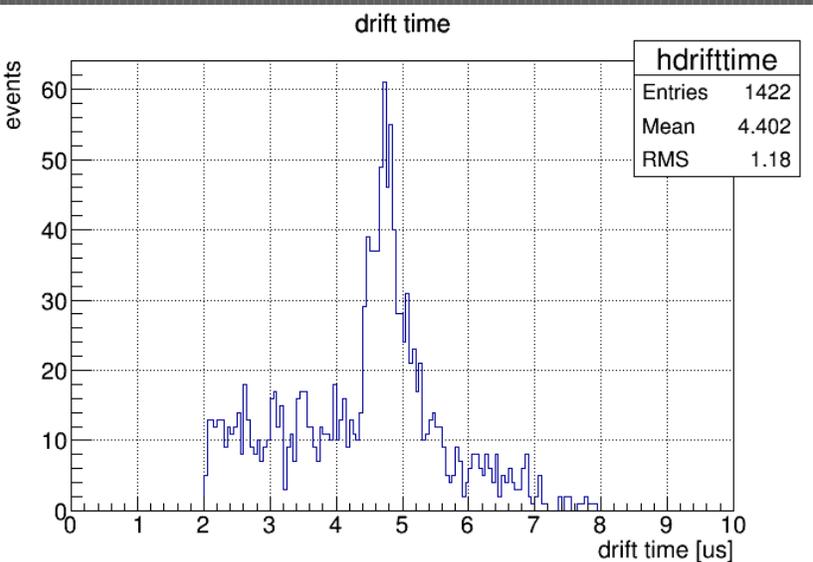


Wire印加電圧依存性

• 4.7kV

• 4.5kV

• 4.2kV

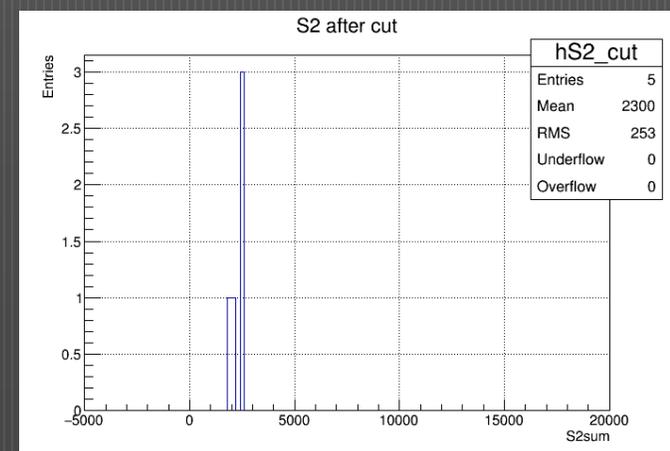
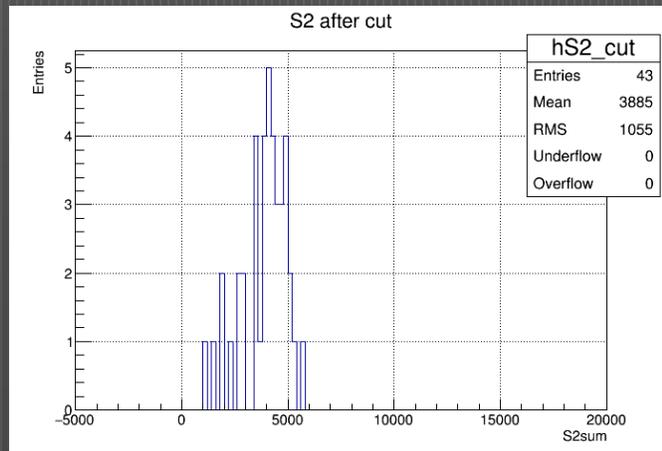
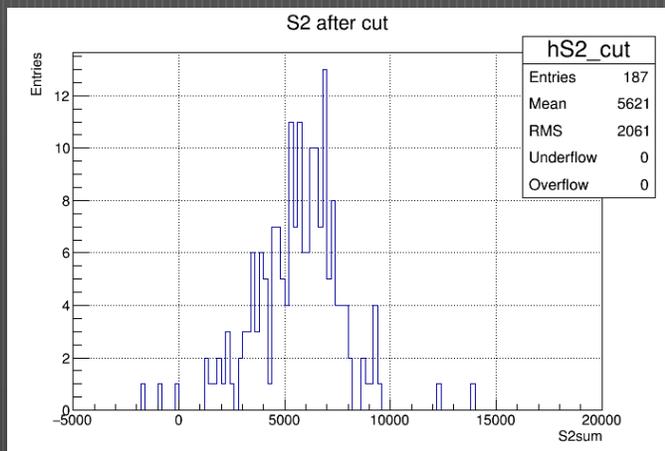
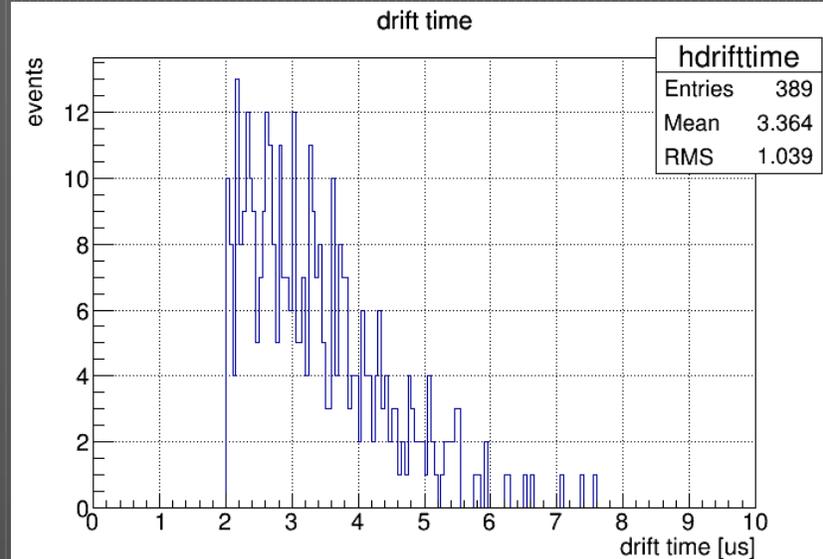
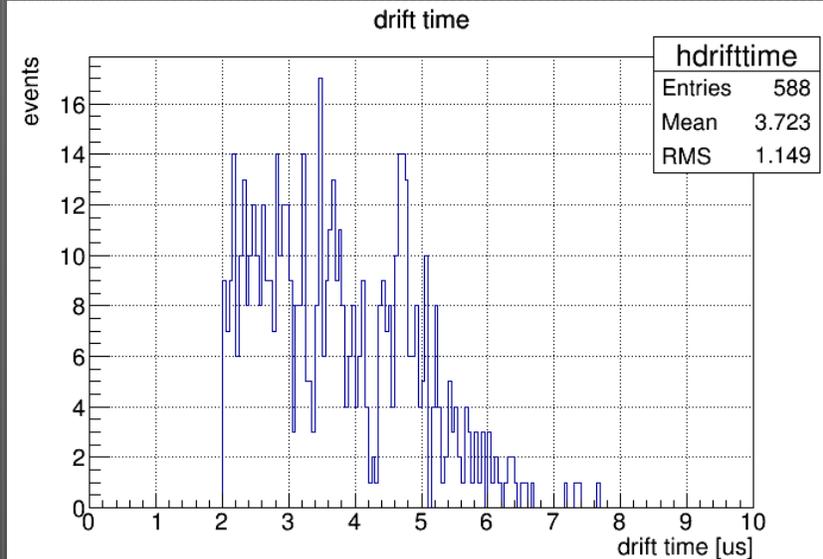
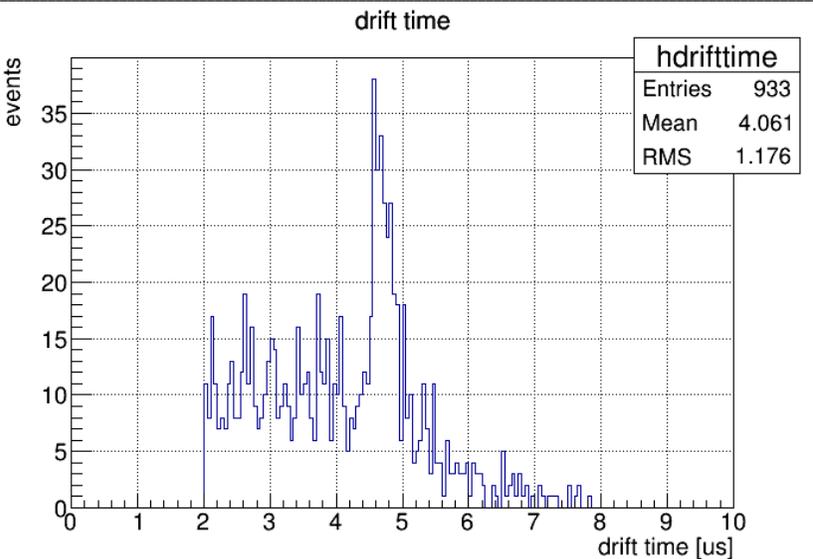


Wire印加電圧依存性

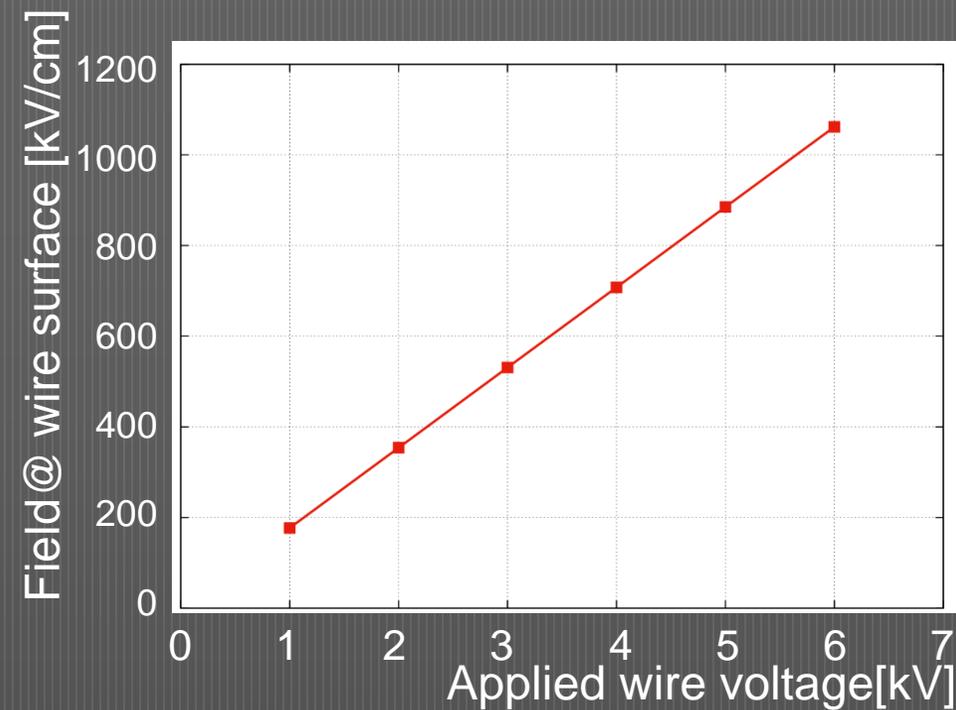
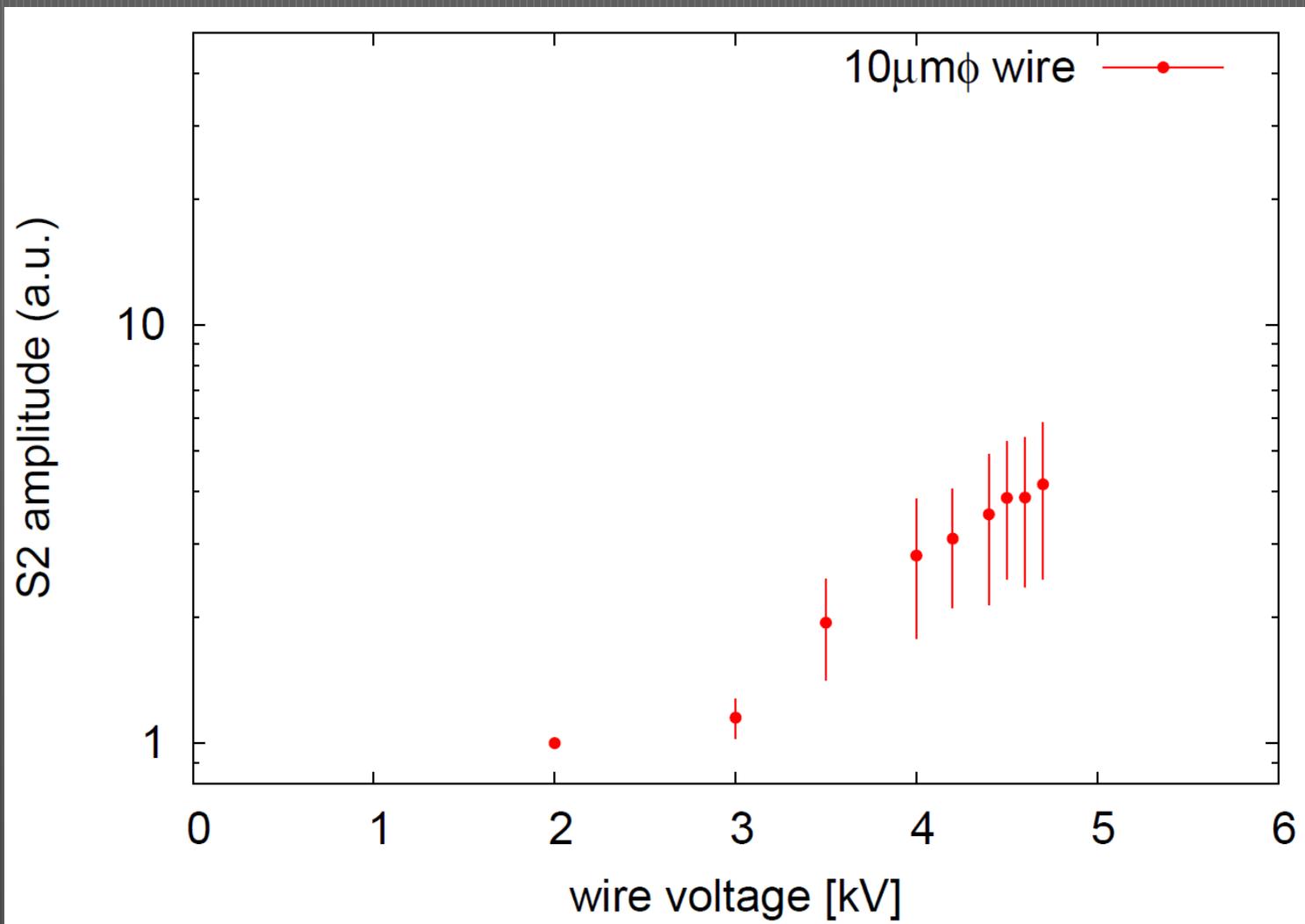
• 4.0kV

• 3.5kV

• 3.0kV



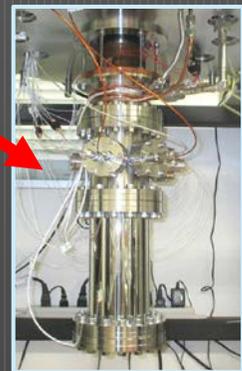
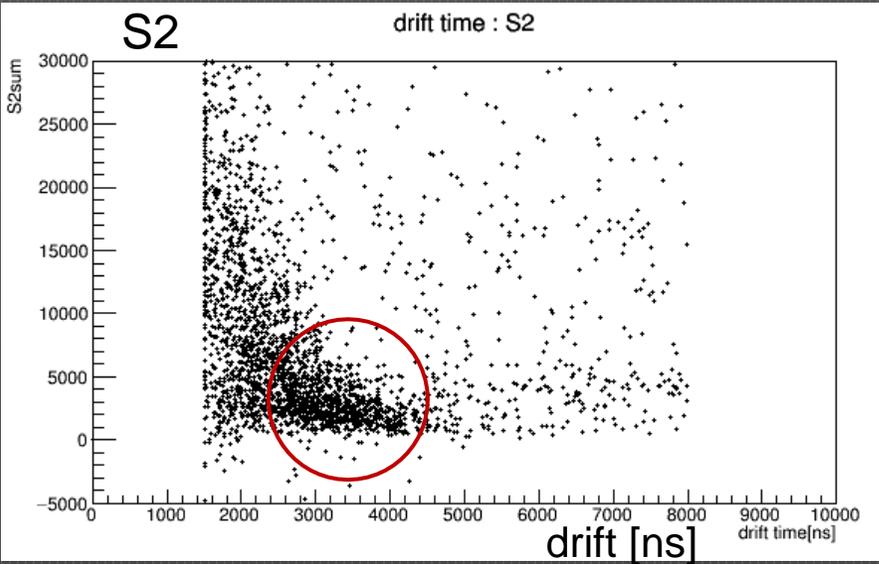
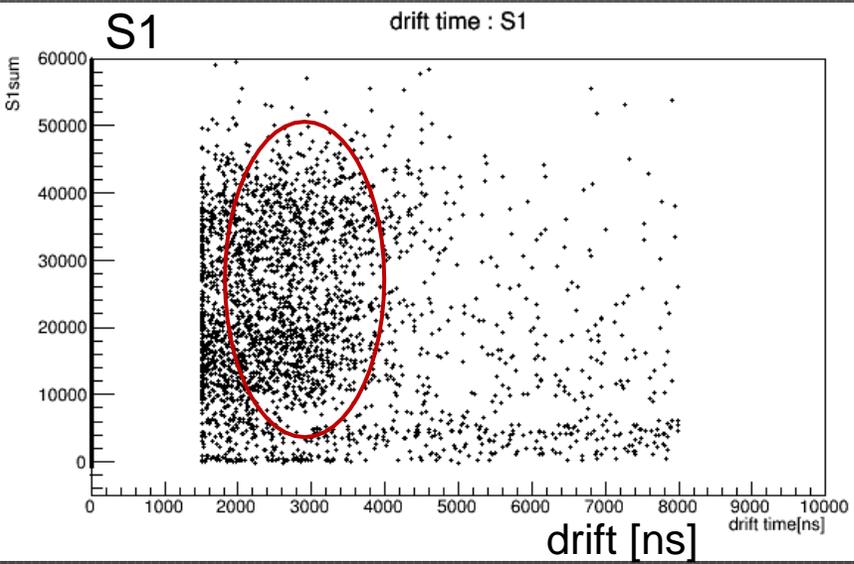
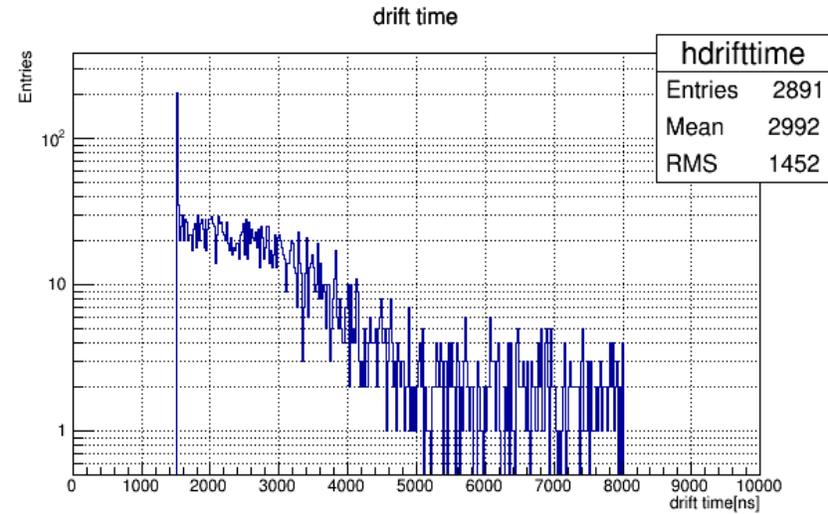
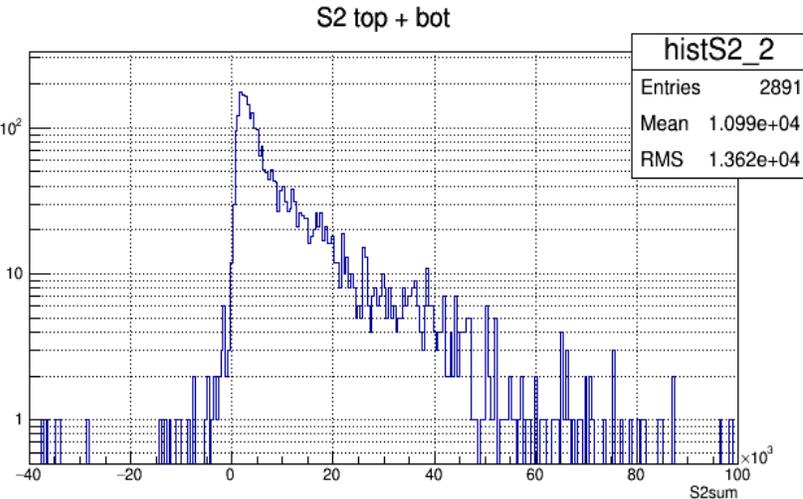
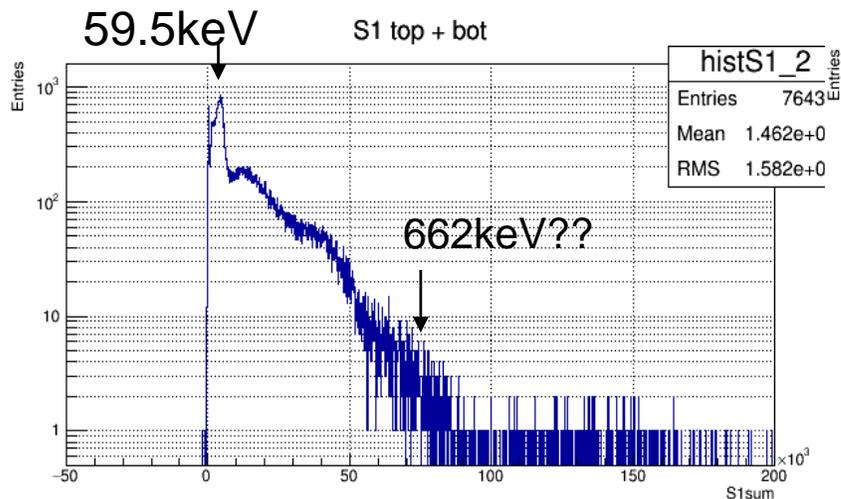
S2 のwire印加電圧依存性



- 3kV 以下を丁寧に測定する必要があるが、

S2の閾値~400kV/cmを確認

低エネルギーイベント確認のため ^{137}Cs 662keV外部照射



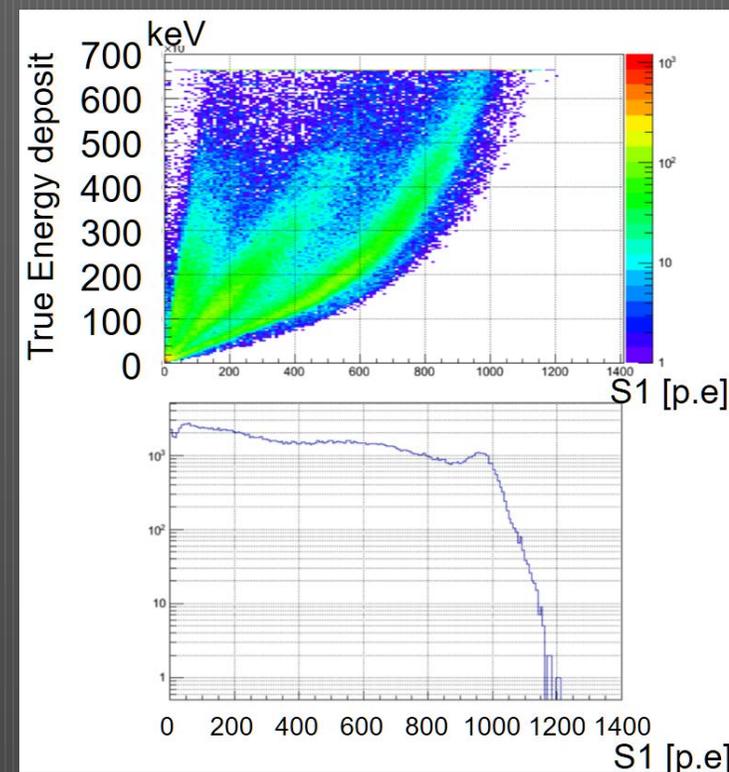
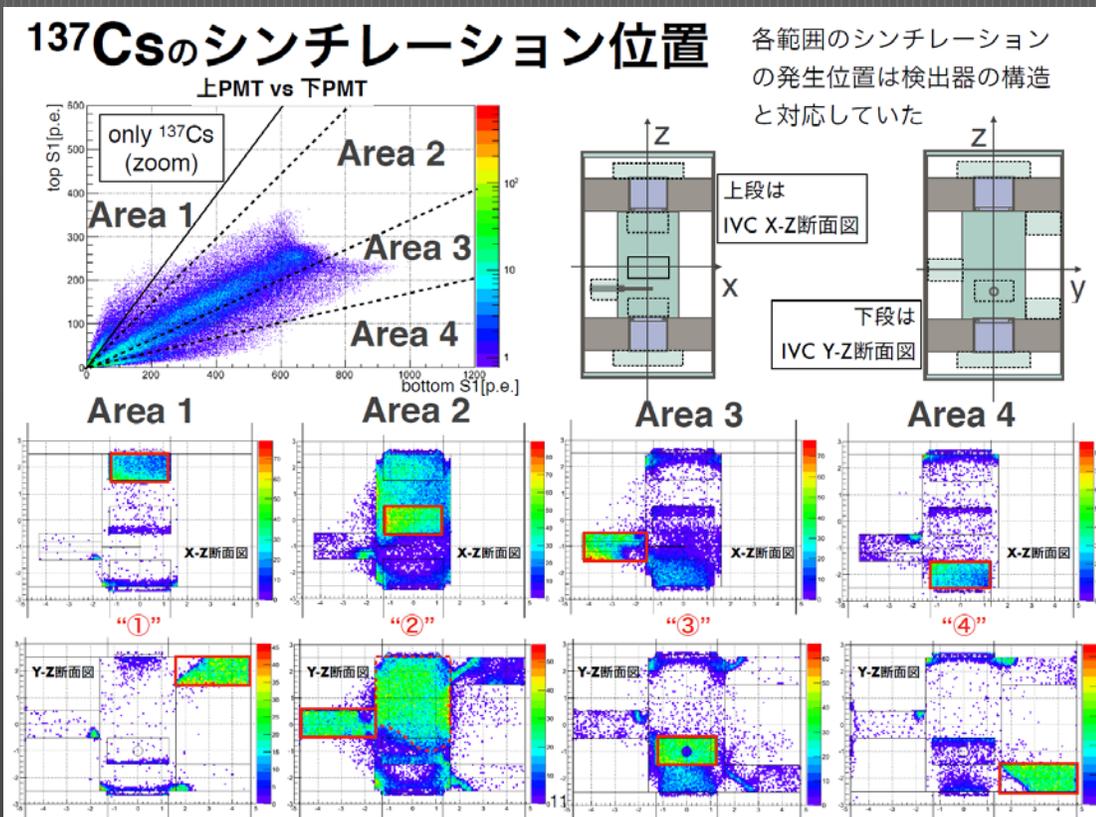
- @4.2kV
- S2 by ~100keVは確認！
- しかしS1の理解は不十分

^{137}Cs 662keV外部照射のMC

詳細は石井瞭 23aK301-9

- XMASSで分かっていたはずなのに
 - 穴だらけ 計4か所の大穴

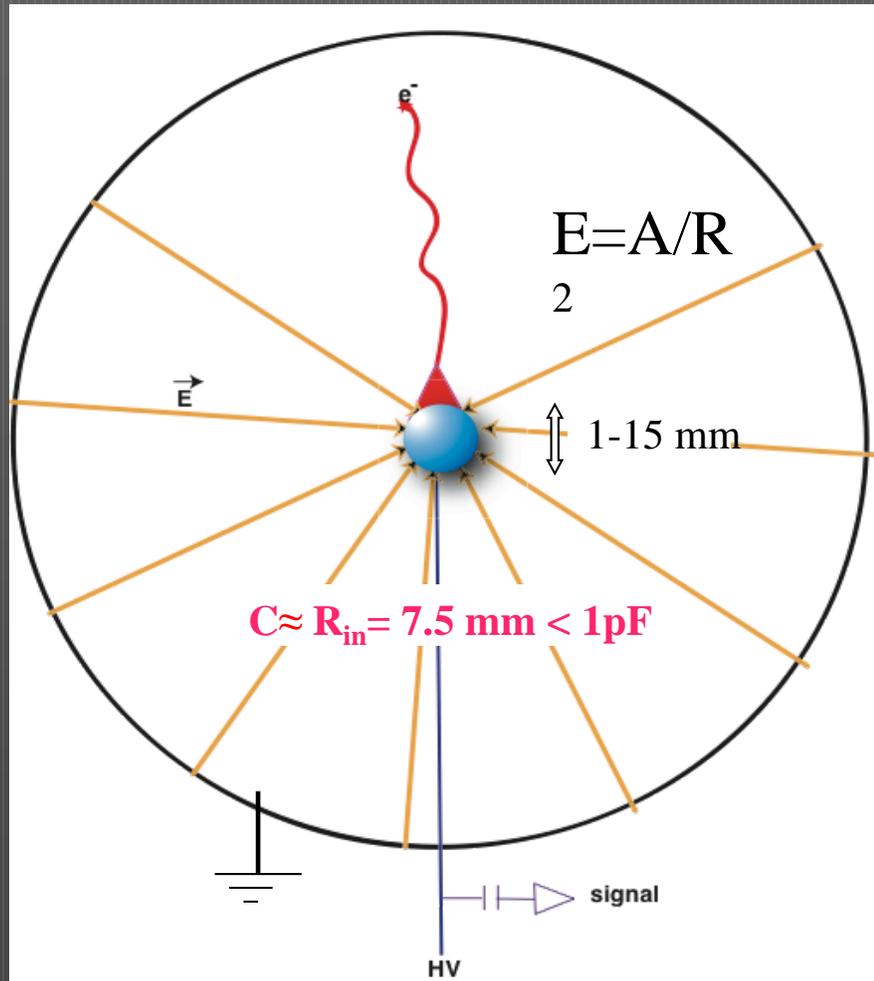
- S1の662keVのピークは見えない
- 上下PMT光量からの位置再構成も不可能



きちんと「穴を塞いだ」検出器を作らねばいけない! (TPCでない)液体検出器の鉄則

ようやく球状検出器の話: ガスならば既存

● 球状ガス検出器 NEWS-G



A Novel large-volume Spherical Detector with Proportional Amplification read-out, I. Giomataris *et al.*, JINST 3:P09007,2008



- Simple and cheap
- Large volume
- single read-out
- Robustness
- Good energy resolution
- Low energy threshold
- Efficient fiducial cut
- Low background capability

Ioannis's spherical detectors

Low background detector $d=60$ cm $p=10$ bar



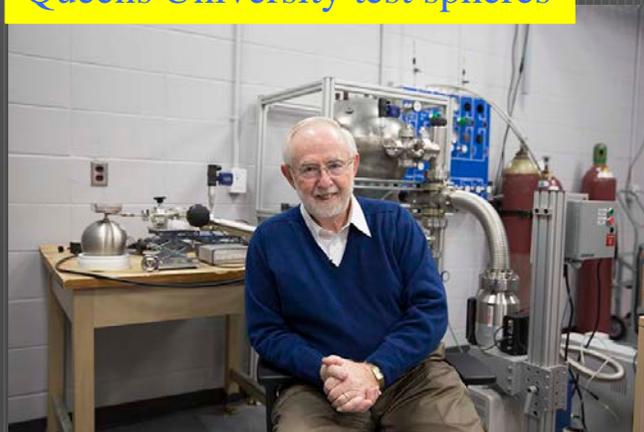
University of Thessaloniki detector



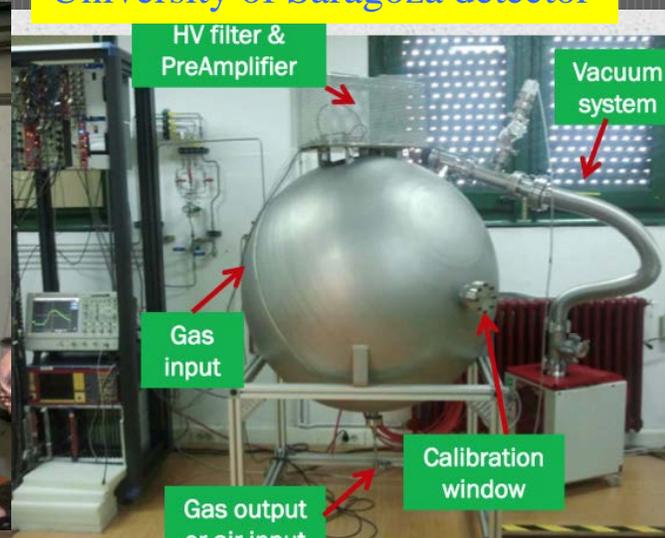
Basic R&D detector in Saclay



Queens University test spheres



University of Saragoza detector



University of Tsinghua - HEP detector

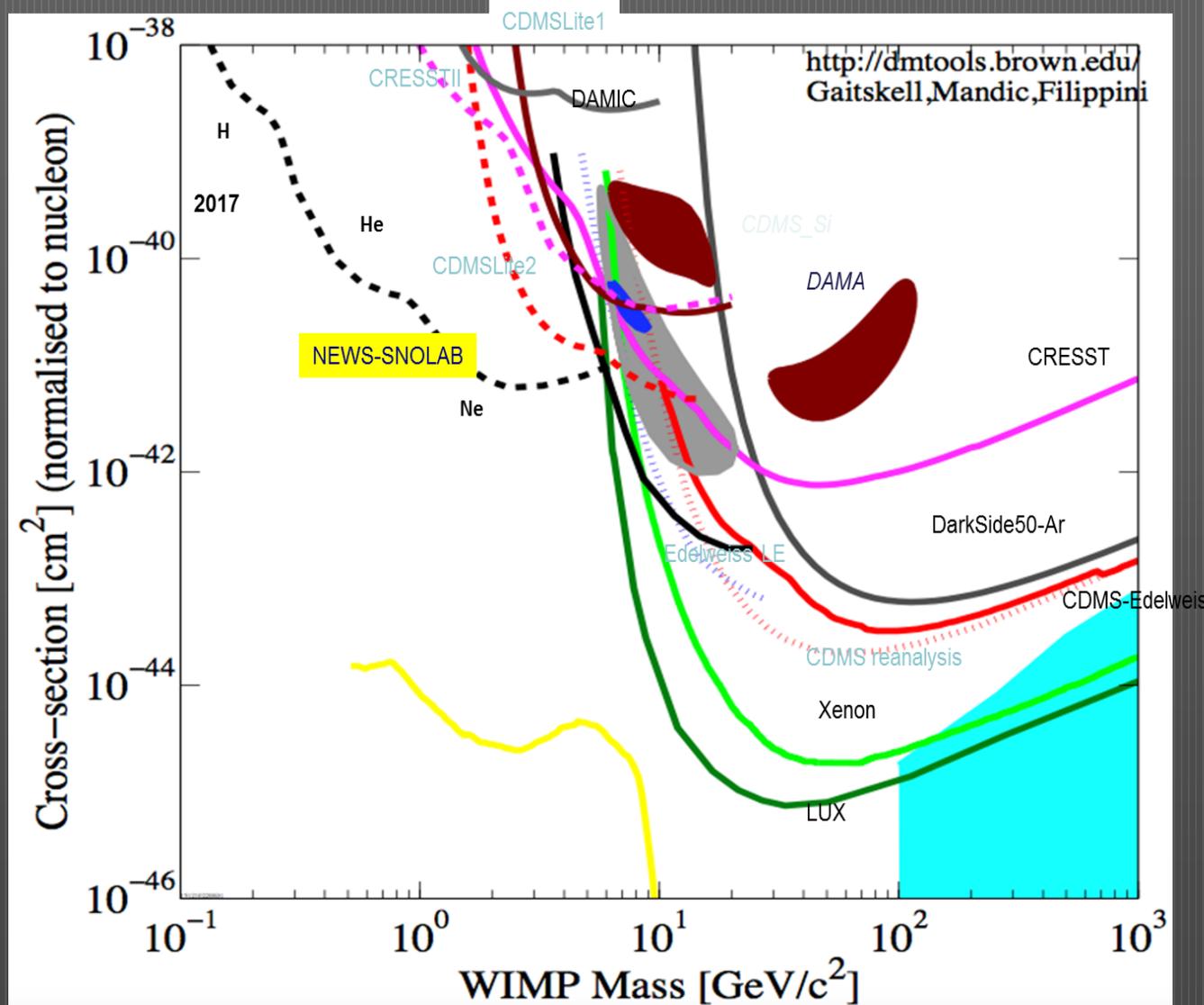
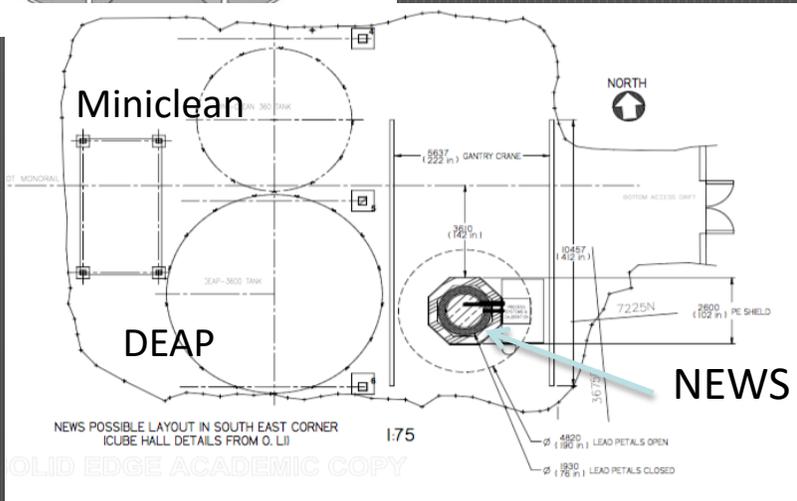
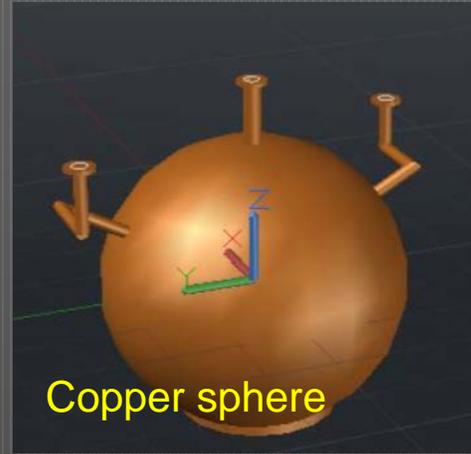
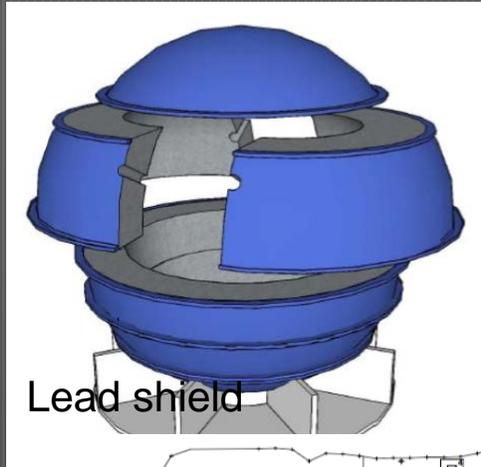


Radon Monitoring (for SuprNEMO) @ CPPM



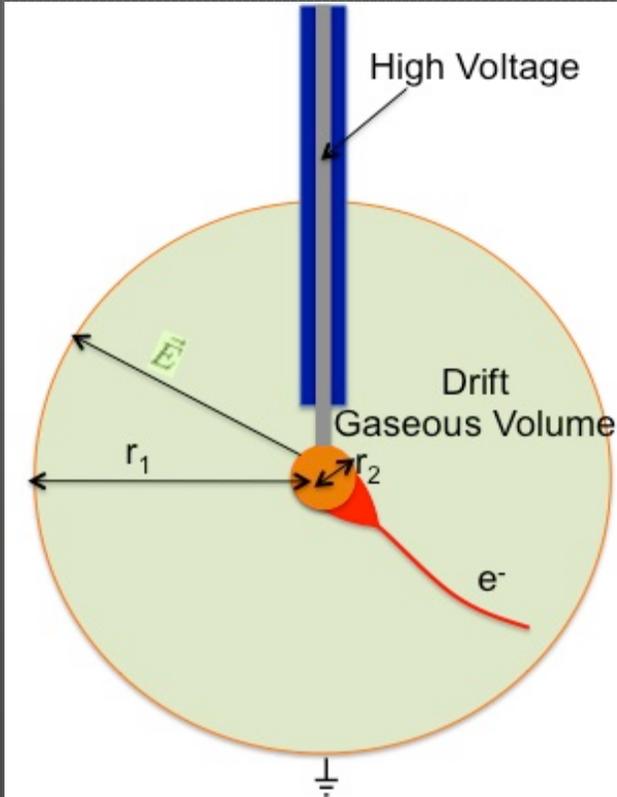
NEWS-SNO

- 140 cm \varnothing detector, 10 bars, Ne, He, CH₄
- Copper 1 μ Bq/kg



問題

- 中心の電場は高くても表面は低い
 - 電子をドリフトできないと意味ない！



$$E(r) = \frac{V_0}{r^2} \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \propto \frac{r_2}{r^2}$$

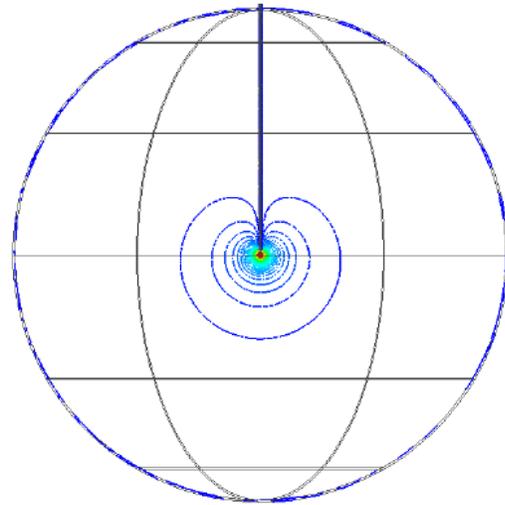


図 5.1 XMASS 検出器 (半径 40 cm) の中心に半径 5 mm の球形の電極を導入し 5 kV 印加したときの電場シミュレーション結果。左は検出器全体、右は電極付近を拡大した部分の等電位線を表している。

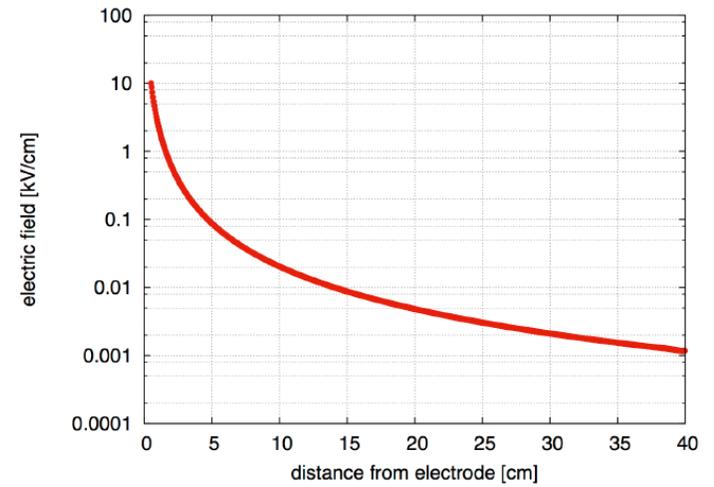
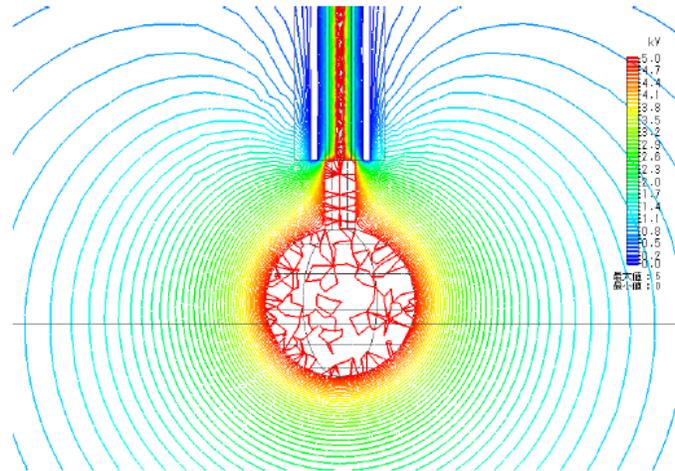
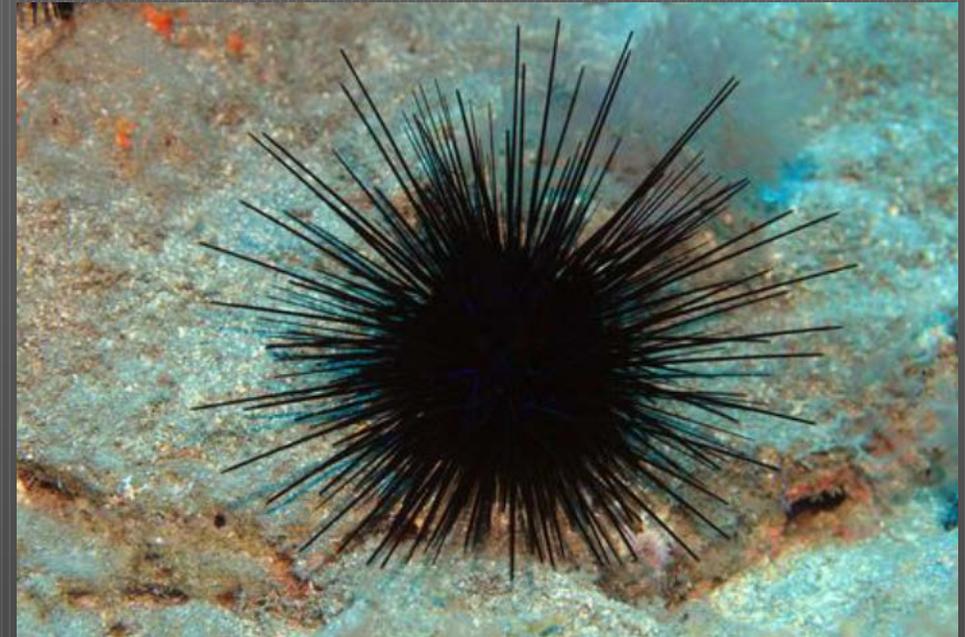
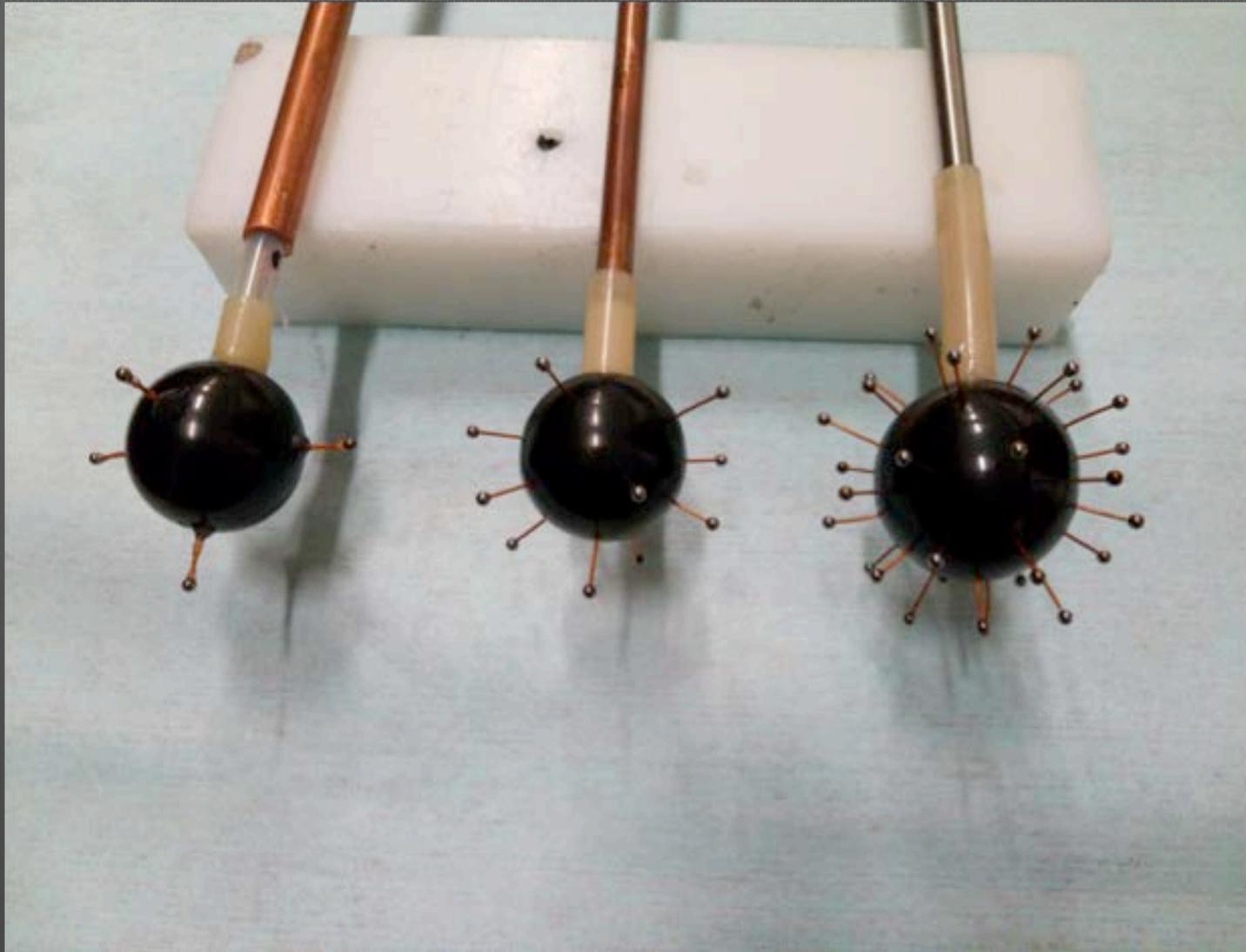


図 5.2 電極に 5 kV 印加したときの LXe 中の電場の大きさ。横軸は検出器中心 (電極) から水平方向の距離を示している。

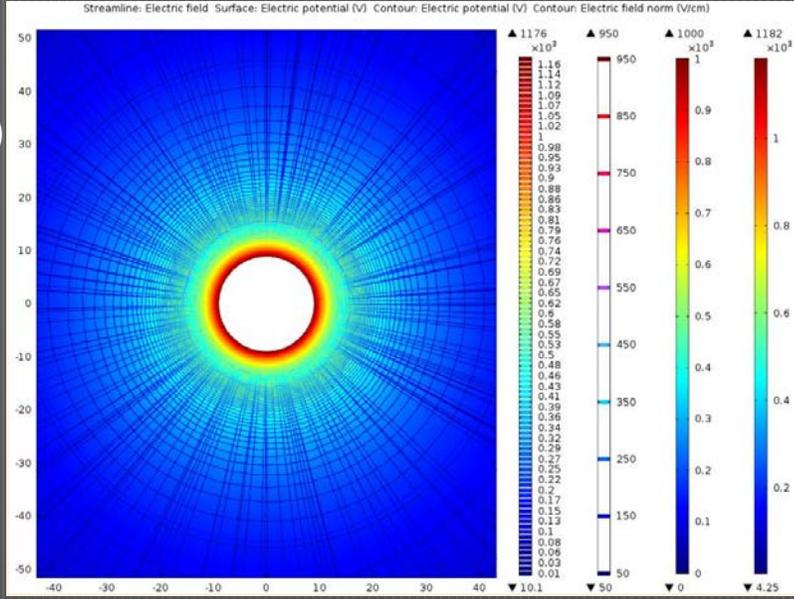


Multi-ball 「ウニ電極」



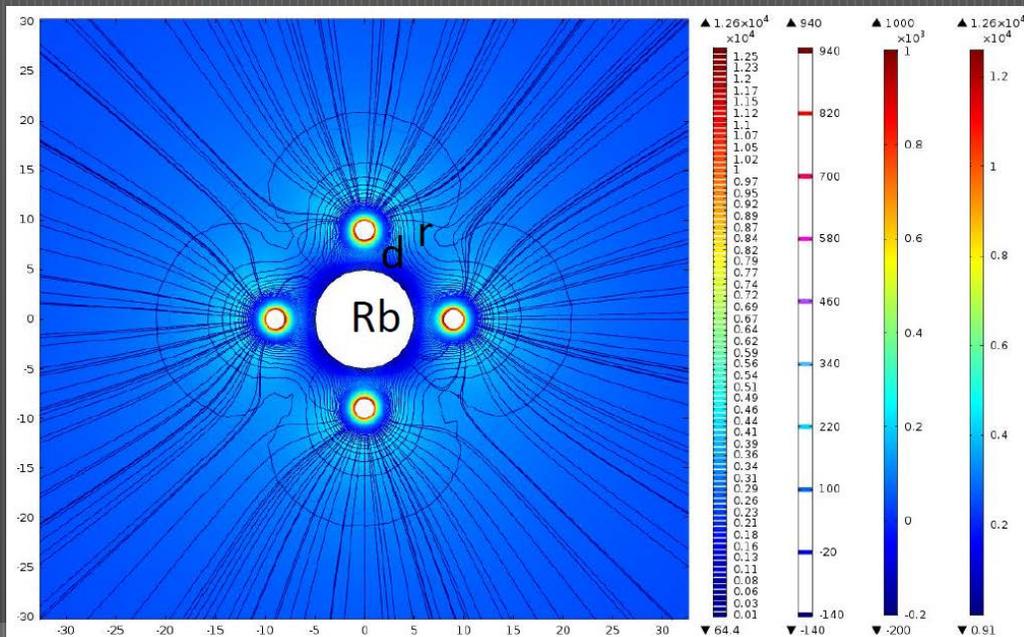
- 1 ball

1 ball system
 $(R = R_b + d + r)$
 $V = 1000 \text{ V}$



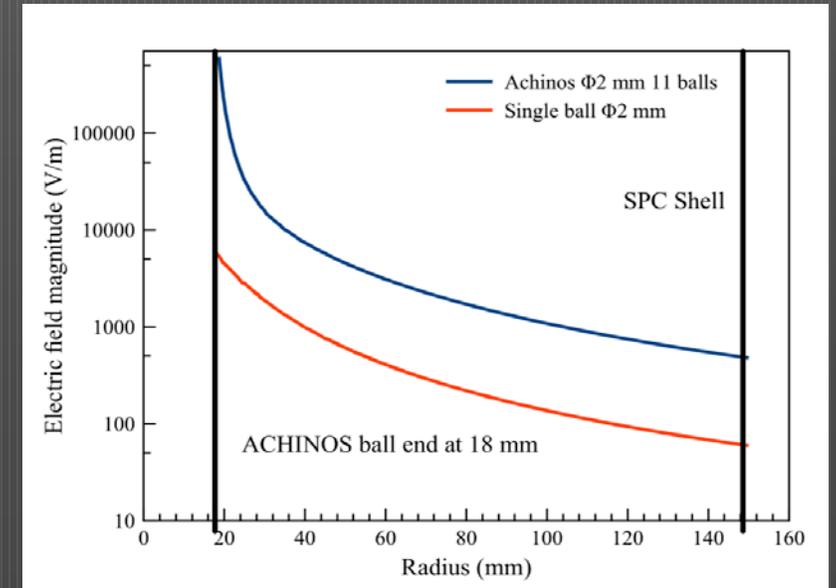
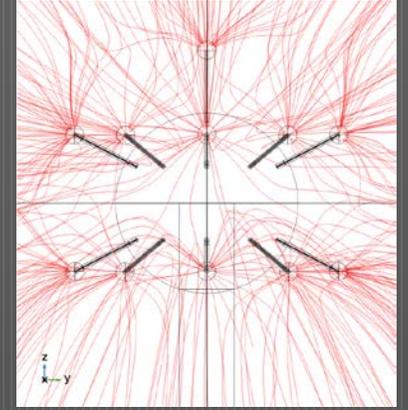
- 5+ balls

6 ball system
 $V_{ach} = 1000 \text{ V}$
 $V_b = -200$



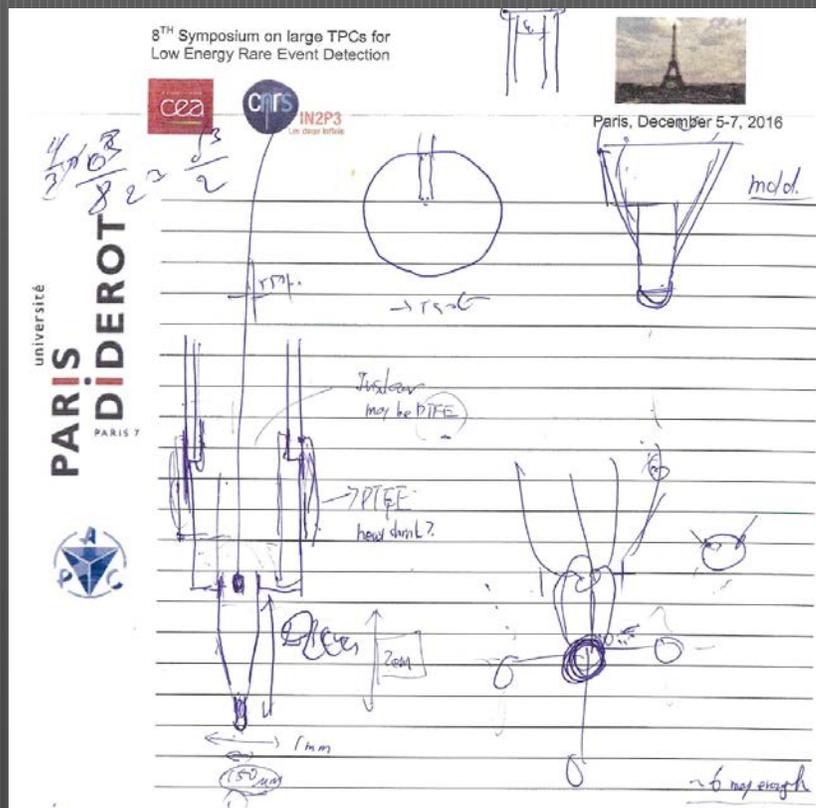
Multi ballsの効果

- 11+ balls 3D printer 試作品
 - Ioannis recommends 11+ balls system



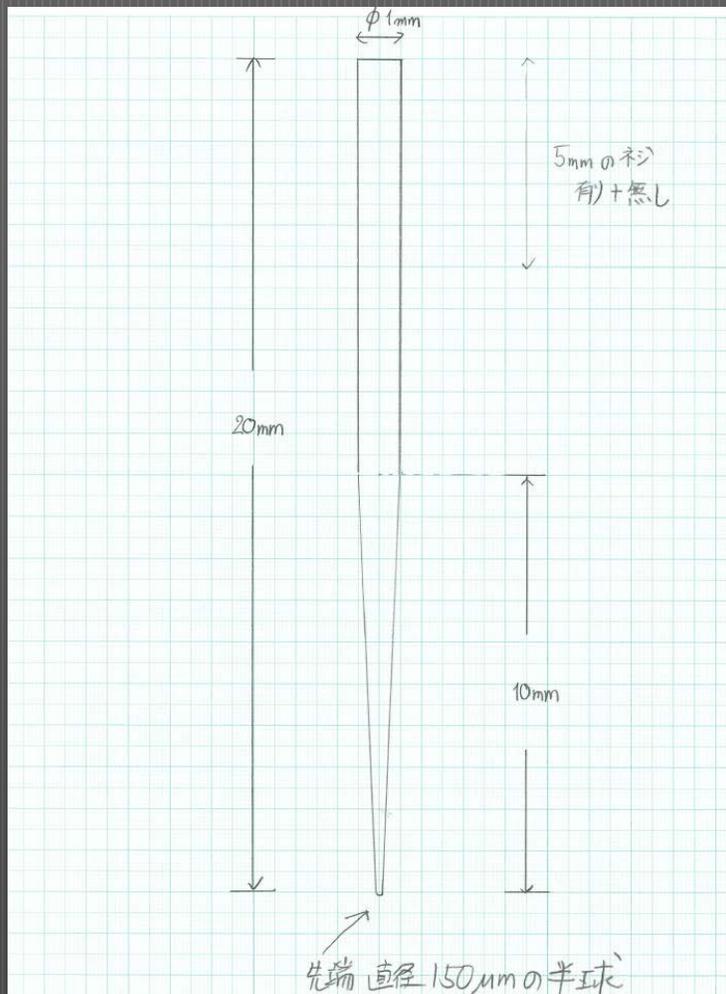
最初のテスト

- 150 μ m 半球/針



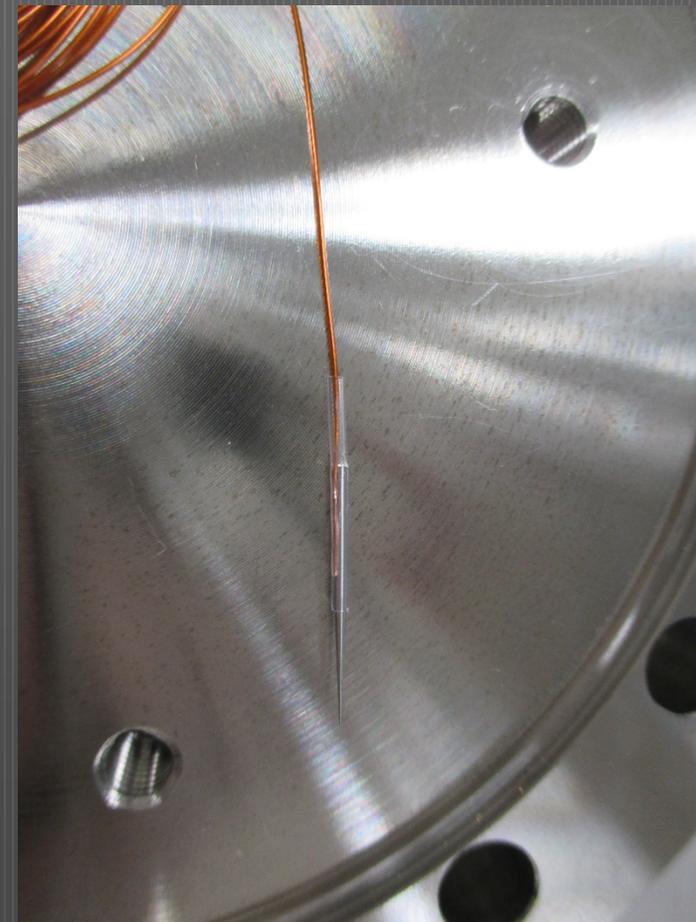
2016 Dec.

関谷洋之



2017 Jan.

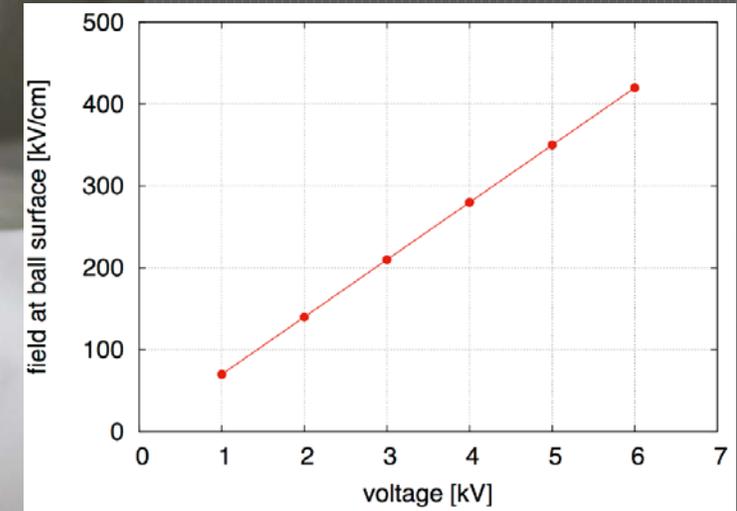
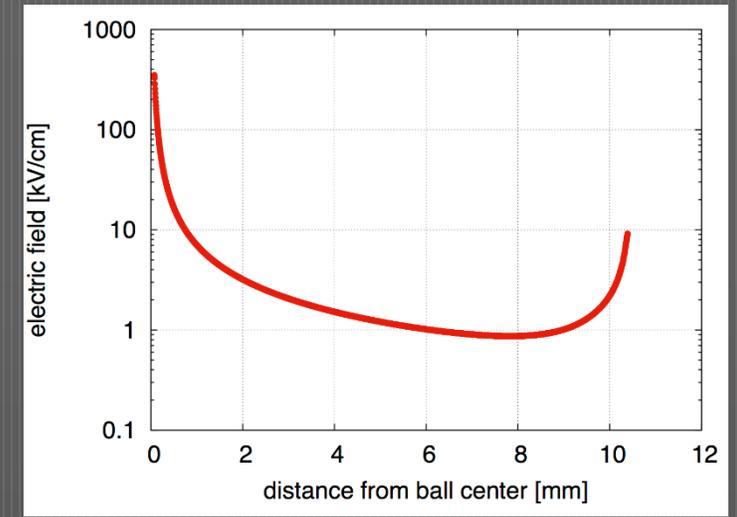
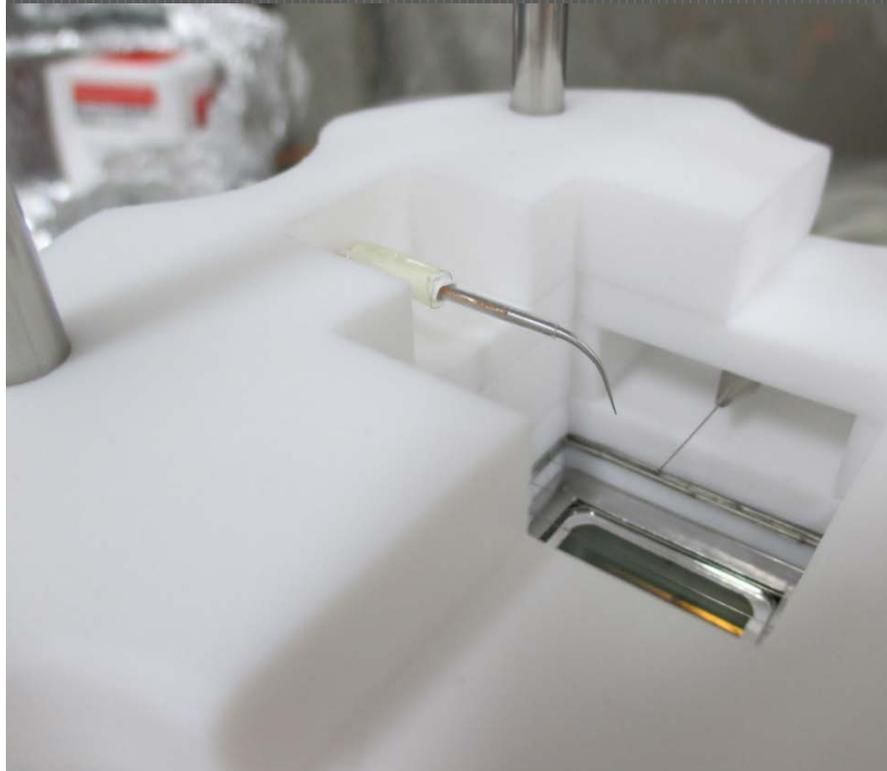
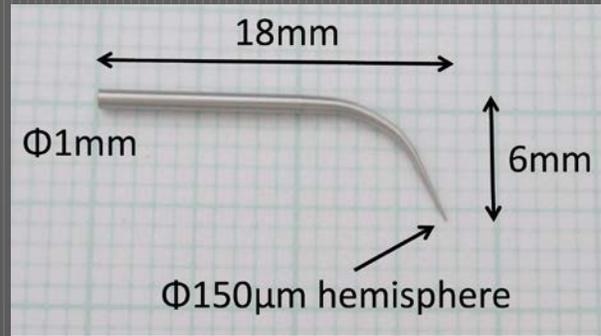
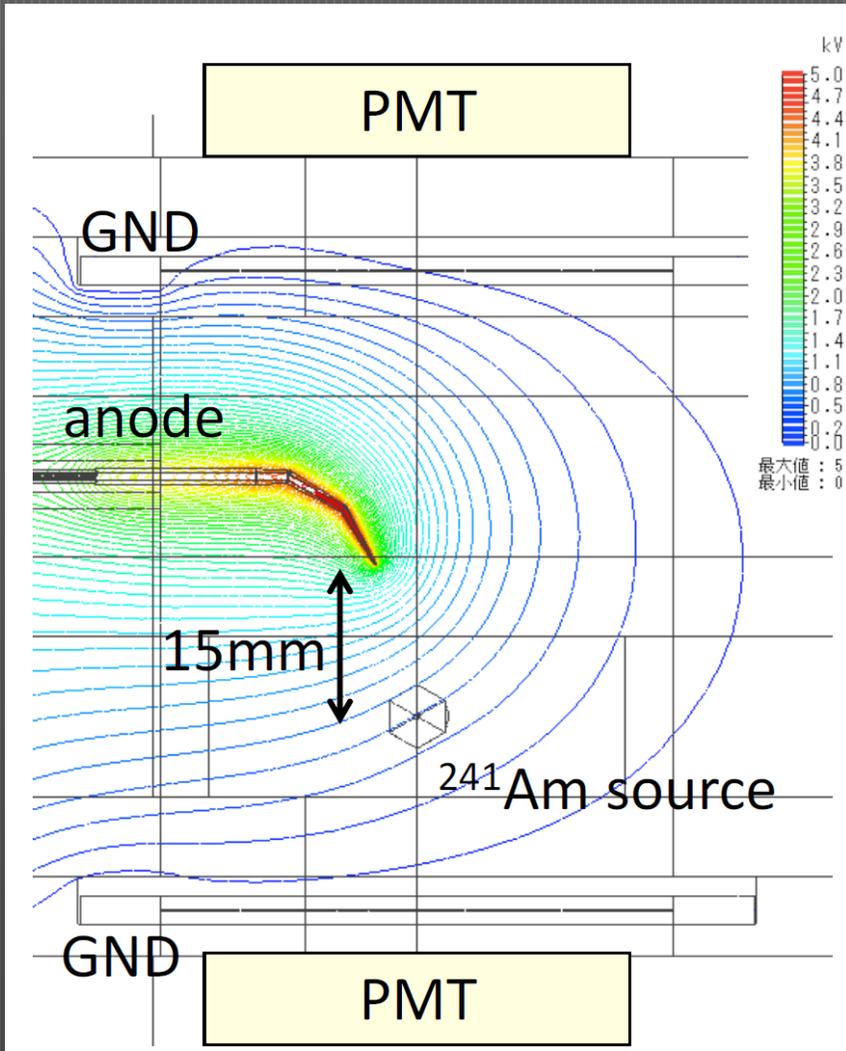
日本物理学会第73回年次大会 シンポジウム



2017 Mar.

東京理科大 2018.3.24

2017 Apr



400kV/cmを得るには
6kV以上印加する必要

2017 Apr.



フィードスルーの
セラミックの部分が
焦げている



SHVコネクタ側の絶縁体
(PEEK)の部分にも変色あり

Feedthrough放電で
6kV安定にHV印加できず

計画

- フィードスルー周りの開発
 - 溶出しないものが必須
 - テープとかアラルダイトとか使えん！
 - 素直にCockcroftに戻る？
- ワイヤーを用いた定量的S1/S2測定
- 針電極の再検証
 - 80 μ m or 50 μ mの針を用意済み
- 11+ echinus / spherical IVCの設計
- できれば今のXMASSのShutdownの前にキャリブレーションロッドにマウントして導入したい。



まとめと最後に

- 2相式キセノンTPCは暗黒物質検出器としてこれからも当面main streamであると思われる。
- 1相式TPCは「検出エネルギー閾値の高さ」「非一様で周辺部で弱いドリフト電場」といった原理的問題点があり、その解決のための開発として「ウニ電極の実現」をしなければならない。逆にこれが解決できれば、画期的な暗黒物質検出器になる。
- 将来の展開
 - 2相式検出器は無重力では使えない
 - ガンマ線衛星等へ
 - 宇宙空間でも利用でき、全方向に一様の感度を持つ、全く新しいタイプの位置検出可能なエネルギー測定器

Thank you for your attention!

