

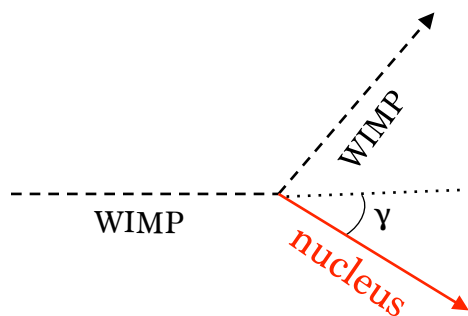
方向に感度を持った 暗黒物質探索実験NEWAGE

2016.10.30

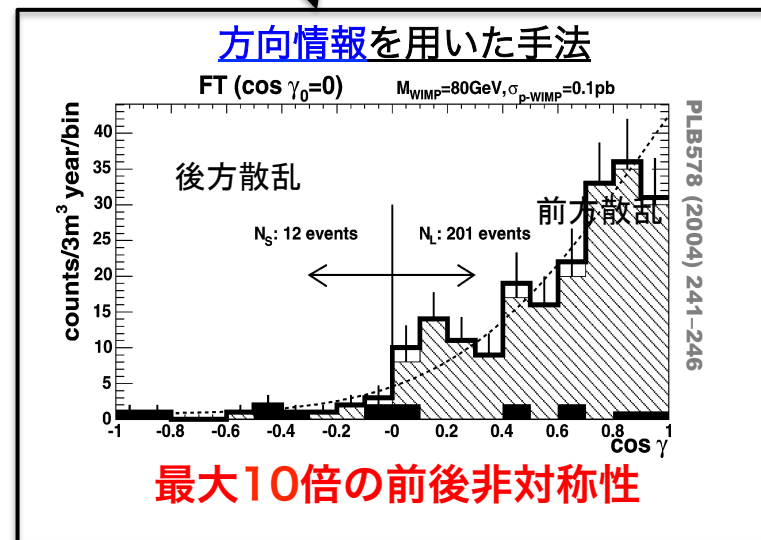
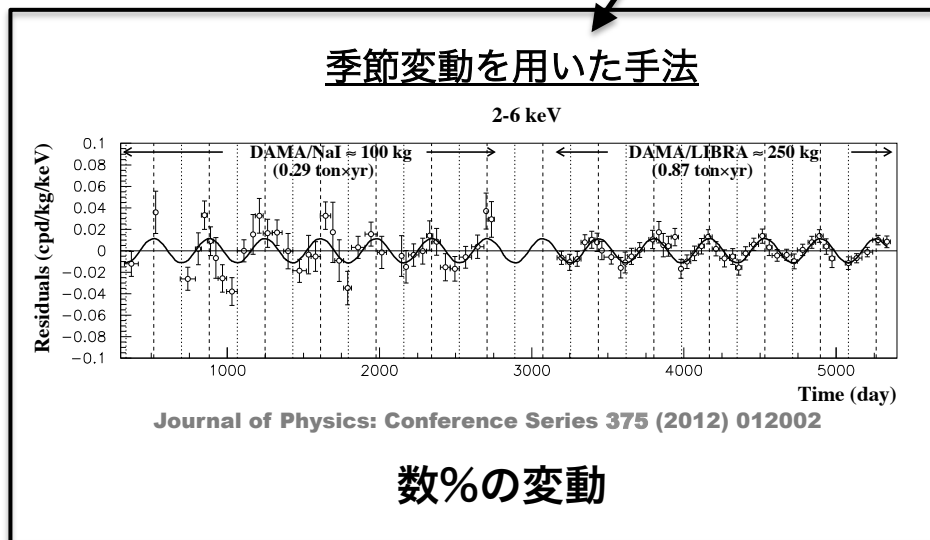
第1回宇宙素粒子若手の会秋の研究会
@東京大学宇宙線研究所柏キャンパス
神戸大学 池田智法

方向に感度を持った暗黒物質探索

□ 暗黒物質の直接探索



- 原子核反跳イベントを
 - シンチレータ検出器(Energy + Time)
 - 原子核乾板(Energy + 3-d)
 - **ガス飛跡検出器**(Energy + Time + 3-d)
 などで取得する



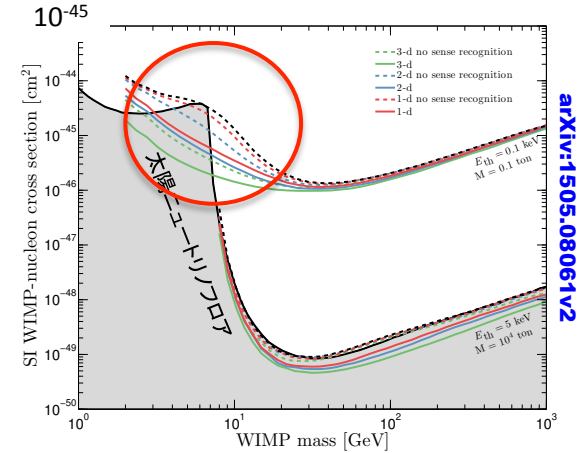
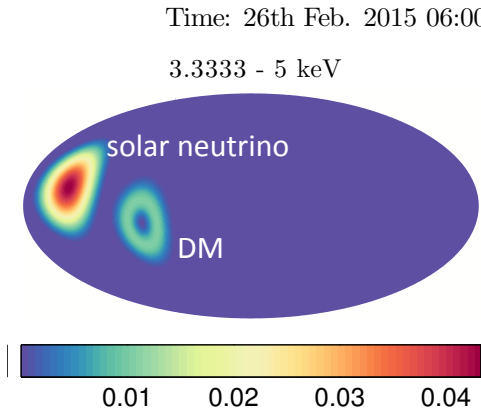
方向情報を用いた手法では**S/N10倍** → 確度の高い証拠となる

方向に感度を持った暗黒物質探索

□ 最近では方向情報を利用した様々な解析手法が提案されて来た

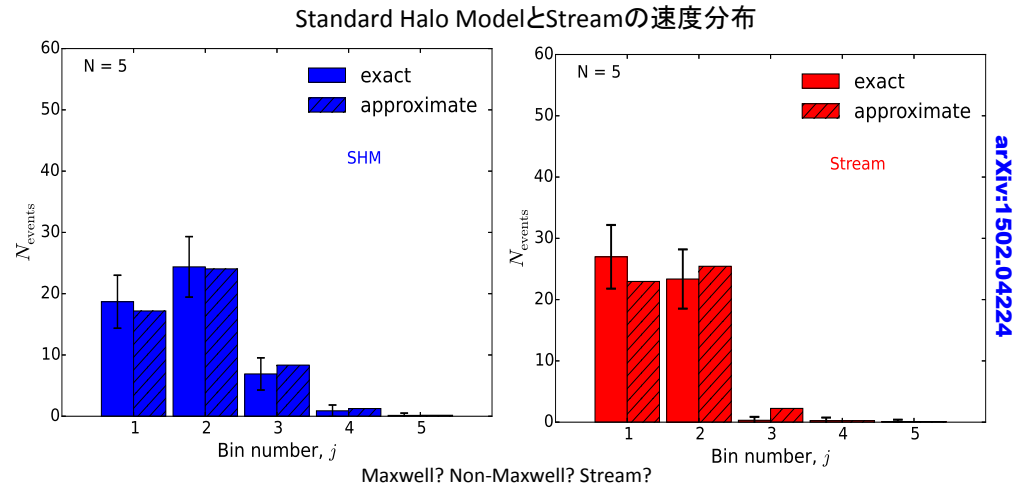
• ニュートリノフロアの探索

方向情報を用いることで太陽ニュートリノと暗黒物質の原子核反跳イベントを分別できる

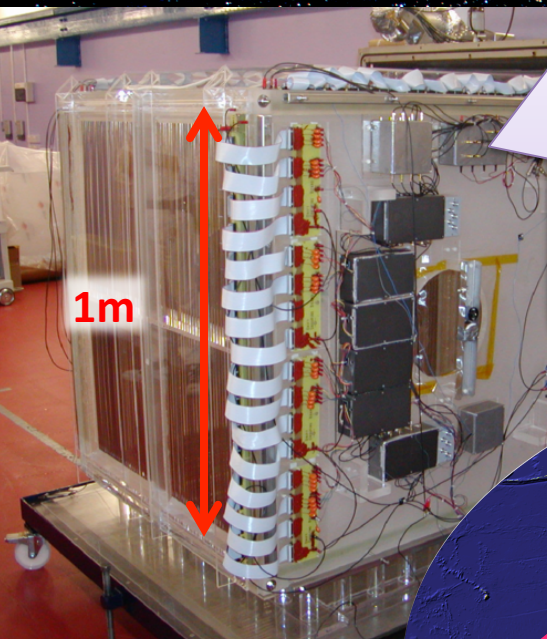


• 暗黒物質の速度分布の検証

暗黒物質が発見された際に、少ない統計量での暗黒物質の速度分布の検証方法なども提案されてきている



ガス検出器と暗黒物質実験の世界情勢

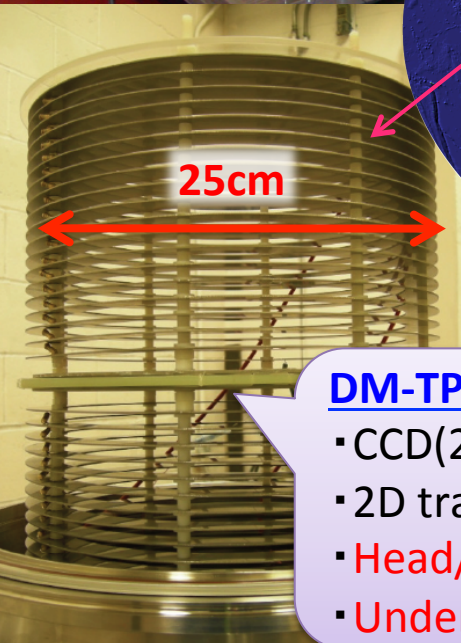


DRIFT

- MWPC(2mm pitch)
- First started gas detector
- **Underground**
- **Low background**
- **Large size(~1m³)**

MIMAC

- MicroMegas(~424um pitch)
- **Underground**
- **10×10×25 cm³**

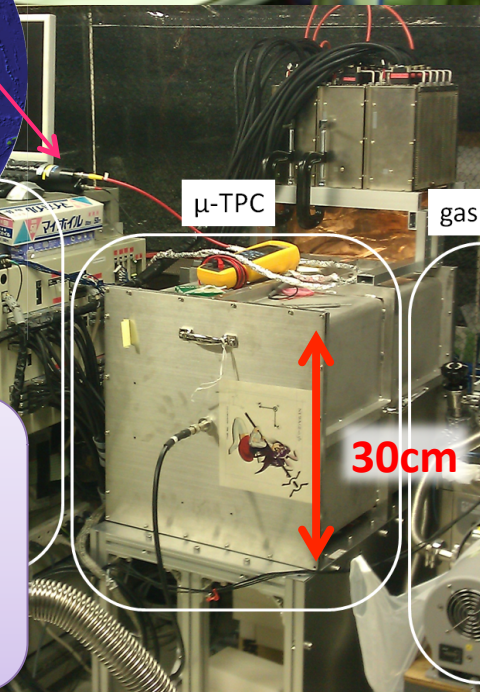


DM-TPC

- CCD(256um pitch)
- 2D track
- **Head/tail recognition**
- **Underground**

NEWAGE

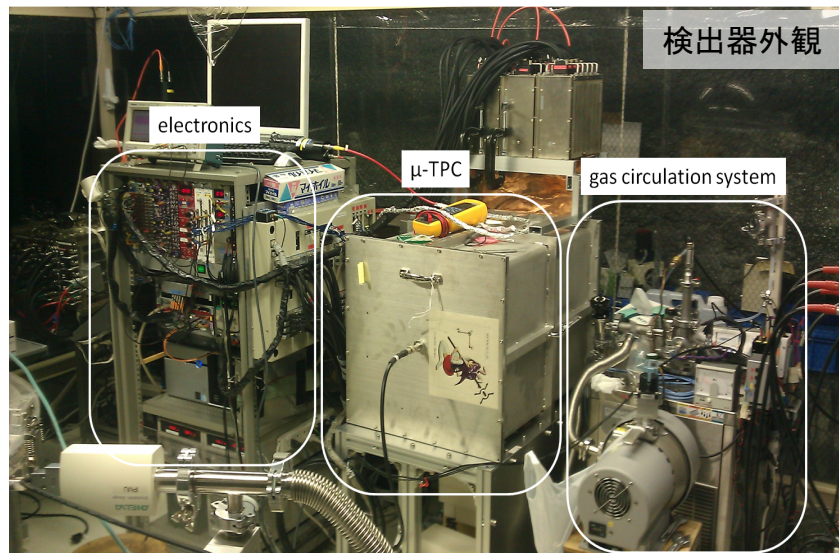
- μ-PIC(400um pitch)
- **3D track**
- **Direction-sensitive limit**
- **Underground**



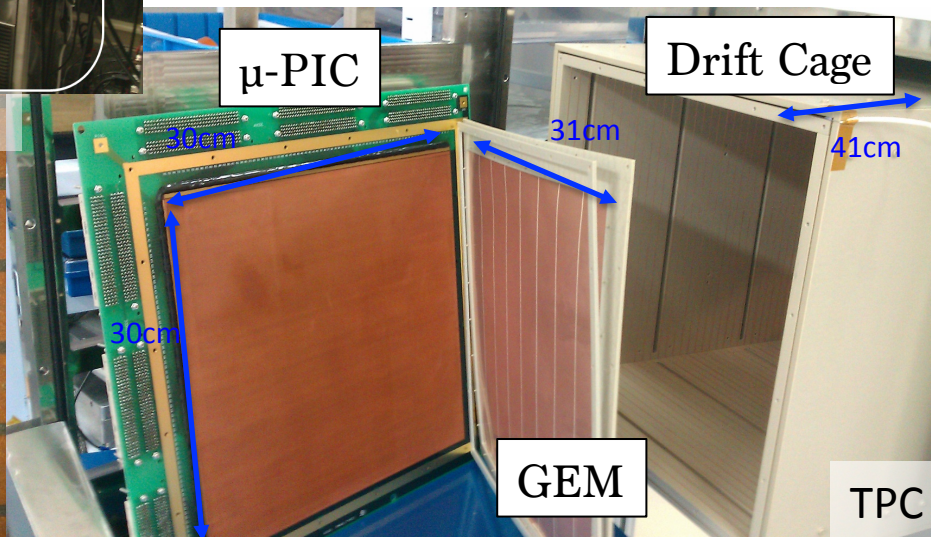
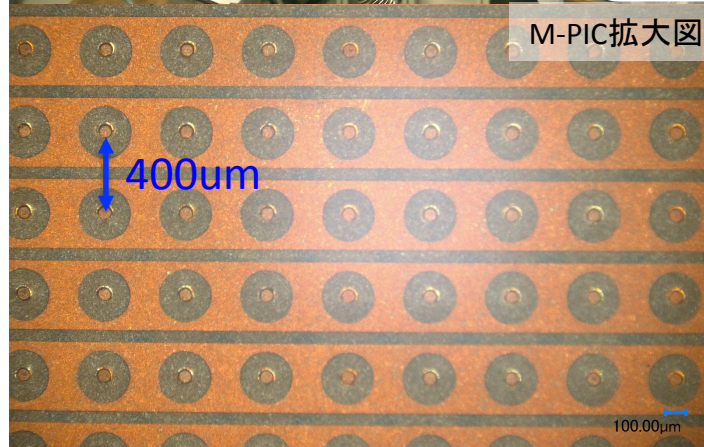
30cm

NEWAGE

□ μ TPC:NEWAGE0.3b'@神岡

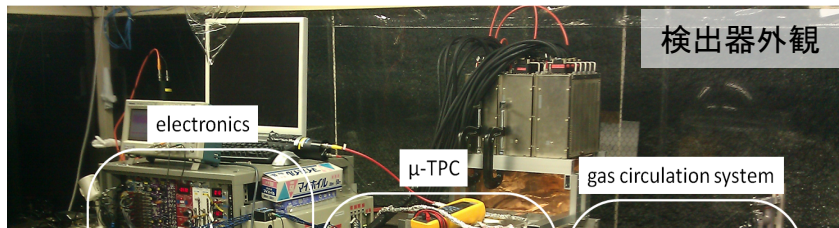


- 2次元飛跡検出器 μ -PIC
- 前置ガス増幅器GEM
- 検出体積 $30 \times 30 \times 41 \text{ cm}^3$
- CF_4 0.1気圧
- 飛跡検出を利用したガンマ線BG除去



NEWAGE

□ μ TPC:NEWAGE0.3b'@神岡

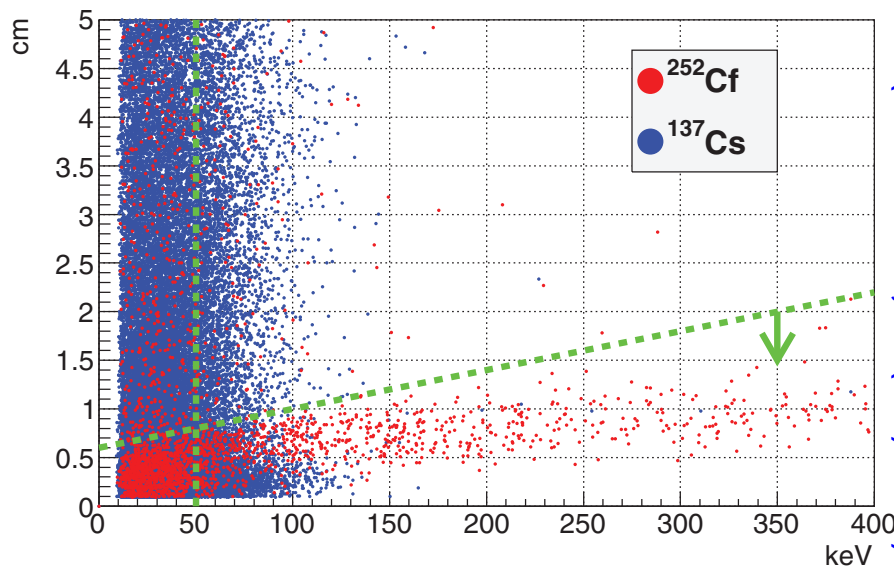


- 2次元飛跡検出器 μ -PIC
- 前置ガス増幅器GEM
- 検出体積 $30 \times 30 \times 41 \text{ cm}^3$

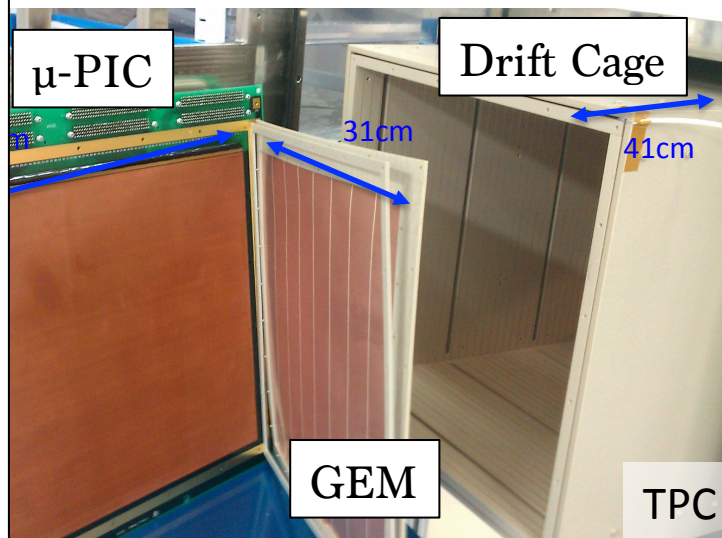
CF_4 0.1気圧

飛跡検出を利用したガンマ線BG除去

dE/dx : nuclear (^{252}Cf) > electron (^{137}Cs)
track length : electron > nuclear



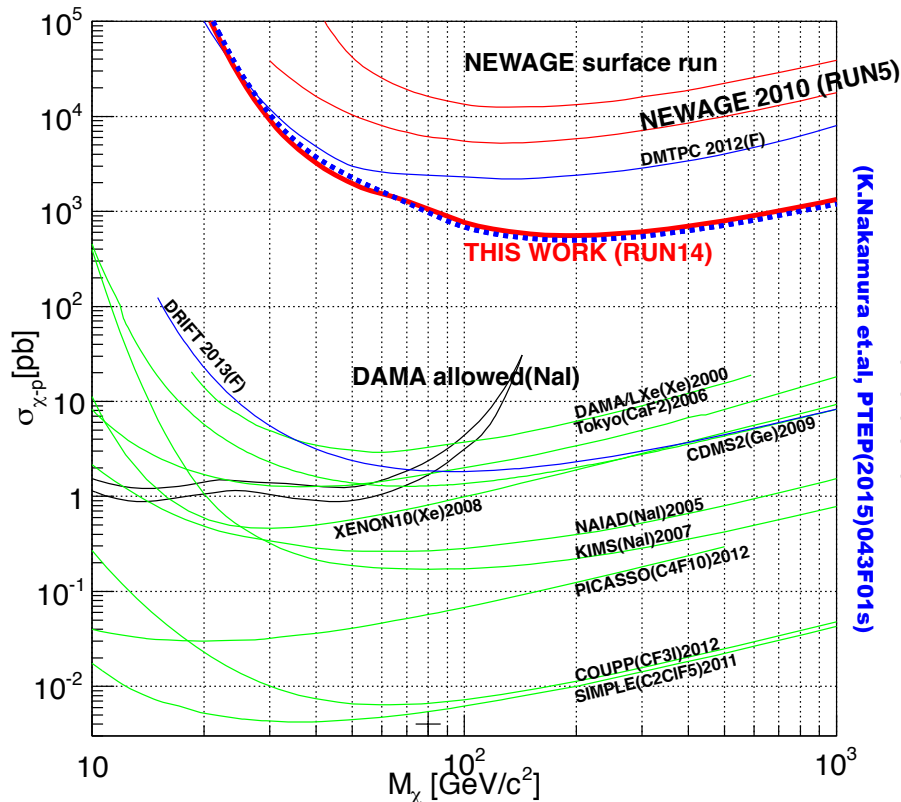
(K.Nakamura et.al, PTEP(2015)043F01(s))



NEWAGEの検出感度

最新結果

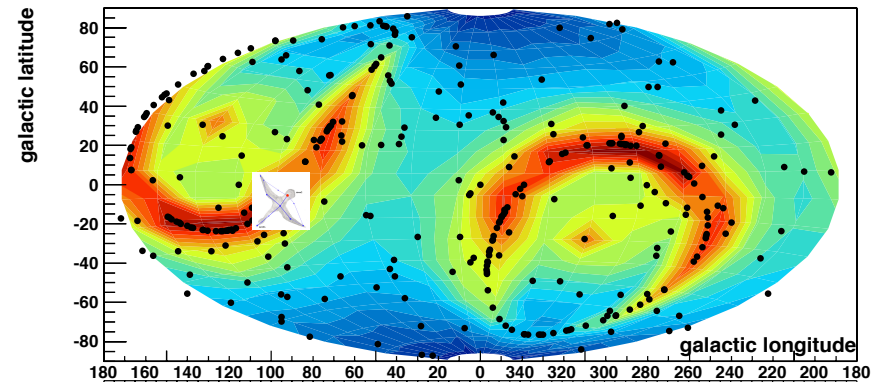
SD 90% C.L. upper limits and allowed region



Conditions RUN14

- period : 2013/7/20~8/11, 10/19~11/12
- live time : 31.6 days
- fiducial volume : 28×24×41 cm³
- CF4 gas(76Torr)
- mass : 10.36 g
- exposure : 0.327 kg · days

銀河座標系のスカイマップ



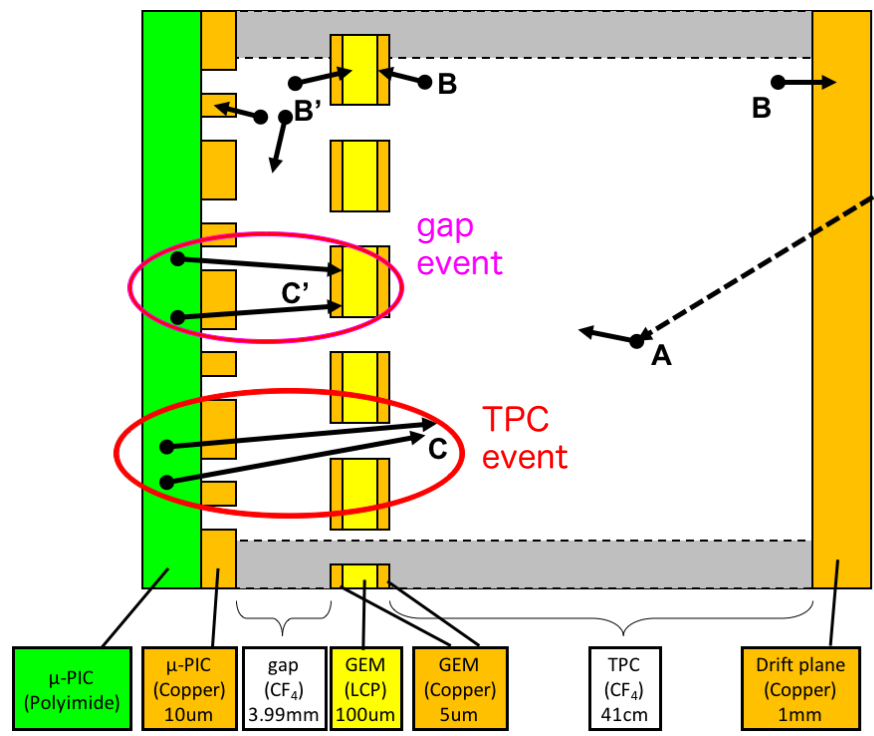
方向感度を用いた実験では世界最高感度を誇るがDAMA領域には感度届かず
現在も観測を継続 31.6days -> 230.2days(2016/8/24時点)

バックグラウンド研究

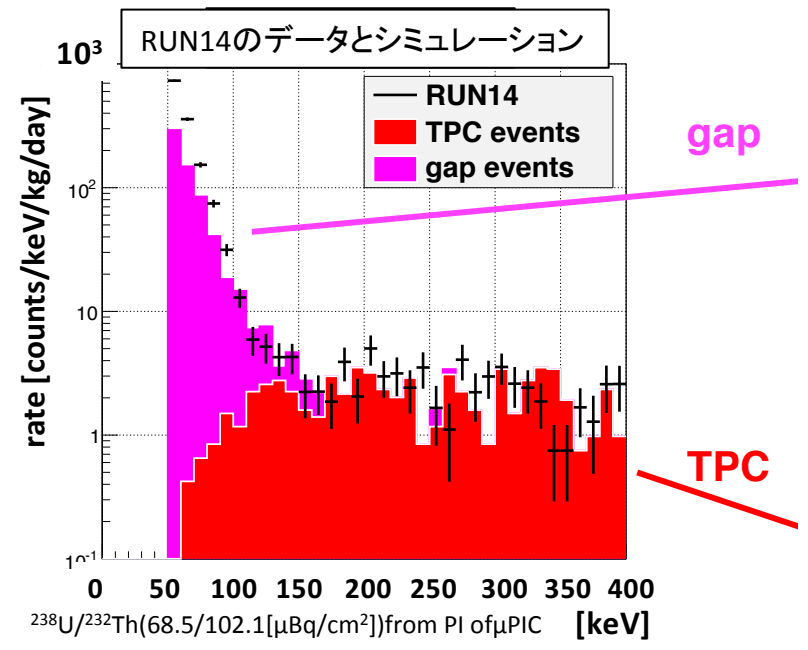
T.Hashimoto@72JPSのスライドから

2013年のデータから、**主なBGは μ -PICの構成物質に含まれる放射不純物のU/Th系列の崩壊によって出てくる α 線(図中C,C')であることが示唆**

- 暗黒物質イベントは原子核反跳イベントであり、 α 線はHe原子核なので解析的に除去しづらい



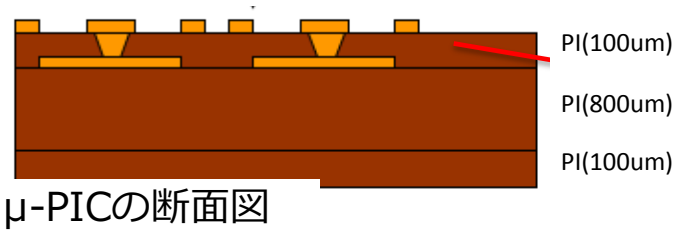
- A: 環境放射線によるイベント
- B, B': ガス中のラドンによるイベント
- C, C': U/Th系列の崩壊により生じる α 線



μ-PICのバックグラウンド

橋本隆(神戸大学)の修士論文から

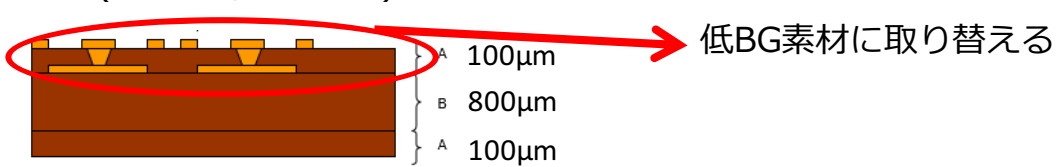
- μ-PIC由来の主なBGは **μ-PIC補強材のガラス繊維**が原因



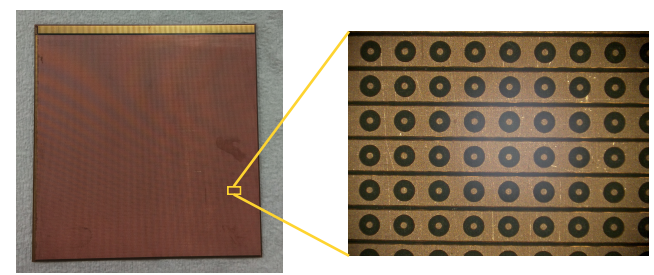
測定試料	²³⁸ U[μBq/cm ²] U系列	²³² Th[μBq/cm ²] Th系列
PI 100μm	68.5 ± 1.5	102.1 ± 2.3
ガラス繊維	64.5 ± 0.8	86.8 ± 1.1

PI100um中のU/Thの約9割はガラス繊維由来

- 低バックグラウンド μ-PICの開発



低BGμ-PIC試作機(10cm角)



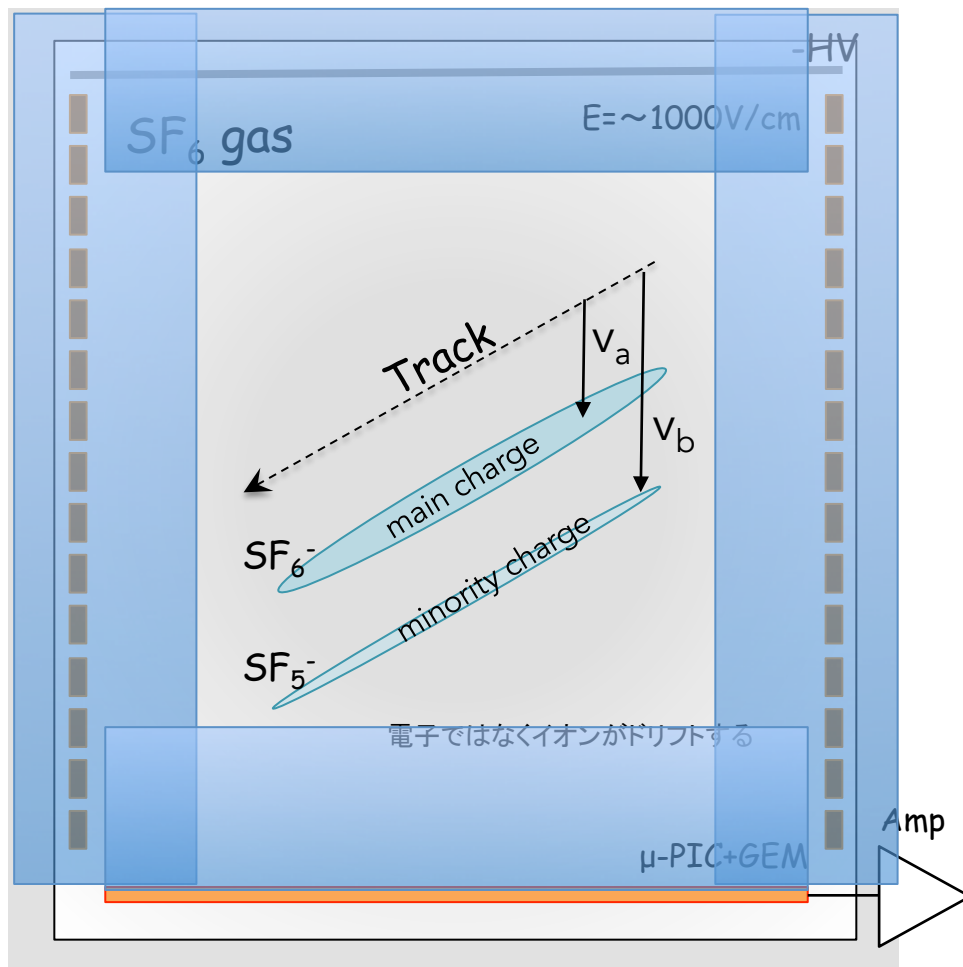
新材料

測定試料	²³⁸ U[ppm]	²³² Th[ppm]	備考
PI100μm	0.39 ± 0.01	1.81 ± 0.04	現行のμ-PIC材料
PI+エポキシ	< 2.98 × 10 ⁻³	< 6.77 × 10 ⁻³	新材料

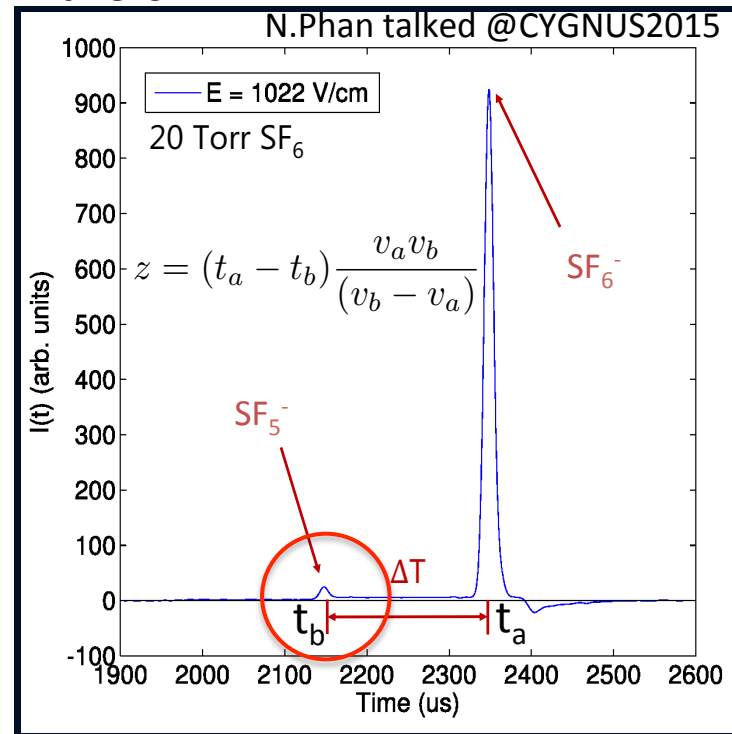
新材料のPI+エポキシは現行のμ-PIC材料よりBGが**100倍以上少ない**

NI μ TPC

解析的に μ -PIC由来のBGを除去する→ 陰イオンガス μ TPC(NI μ TPC)の開発



Waveform

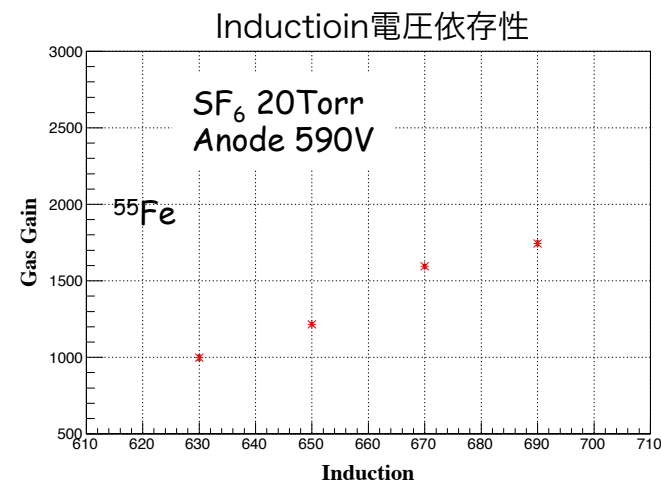
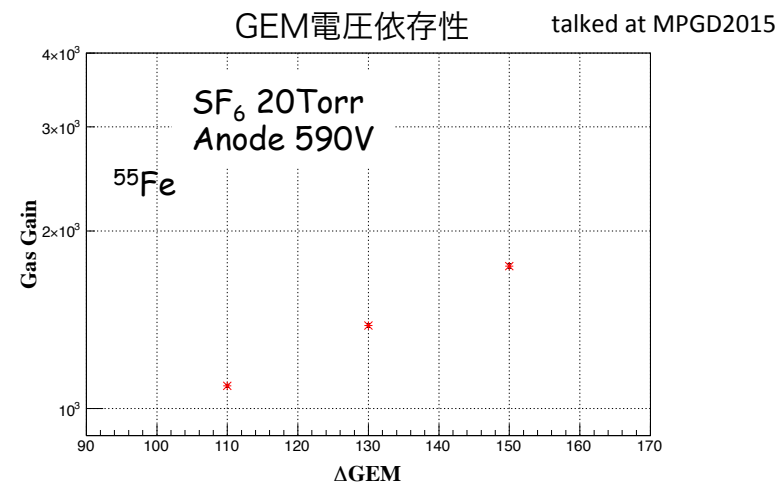
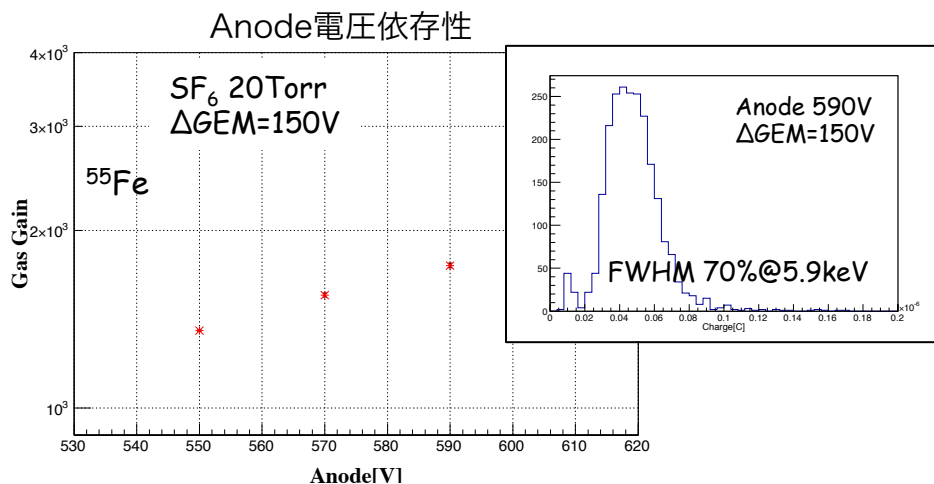


マイノリティチャージの生成
→この時間情報を使ってドリフト方向の絶対位置を測定できる

SF₆ガスゲイン

2015年から自分が研究してきたSF₆ガスを用いたNIμTPCの開発

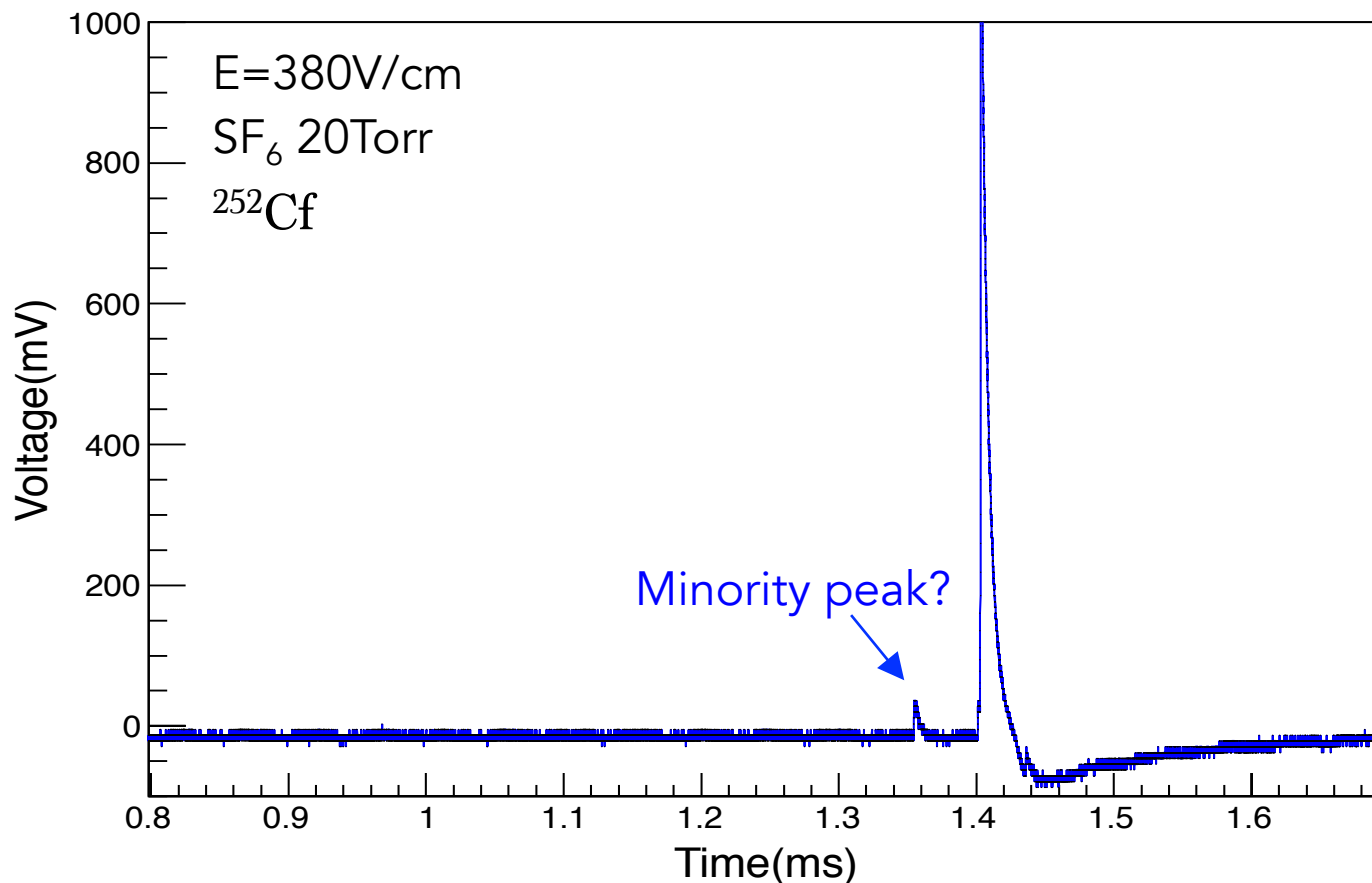
□ SF₆ガスを用いたμ-PIC+GEMのガスゲイン



- SF₆ **20Torr**で最大ガスゲイン2000程度
- エネルギー分解能FWHM70%@5.9keV
- μPIC+GEMシステムは陰イオンSF₆中でも十分なガスゲインが得られている

マイノリティピークの観測

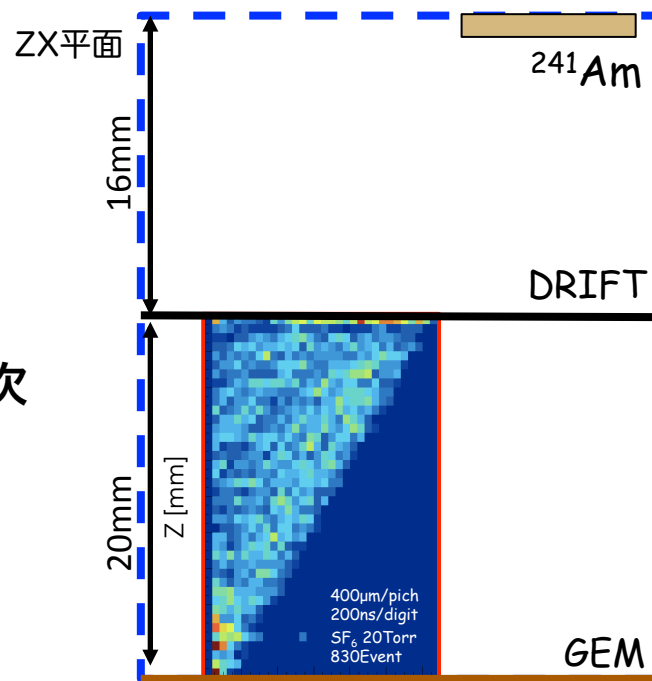
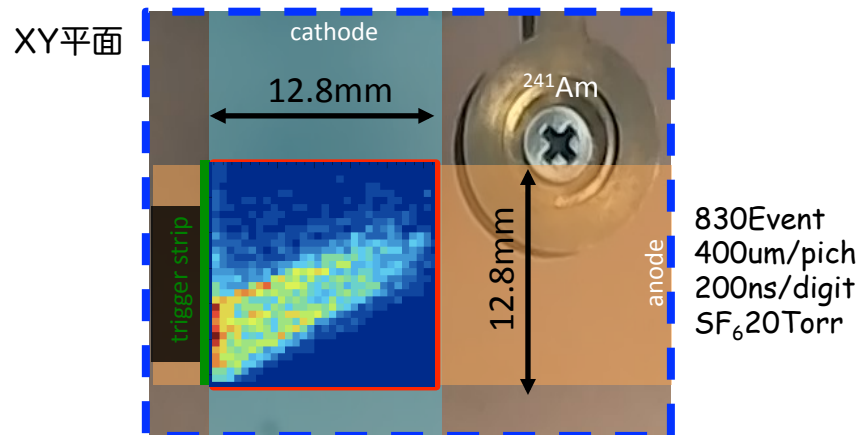
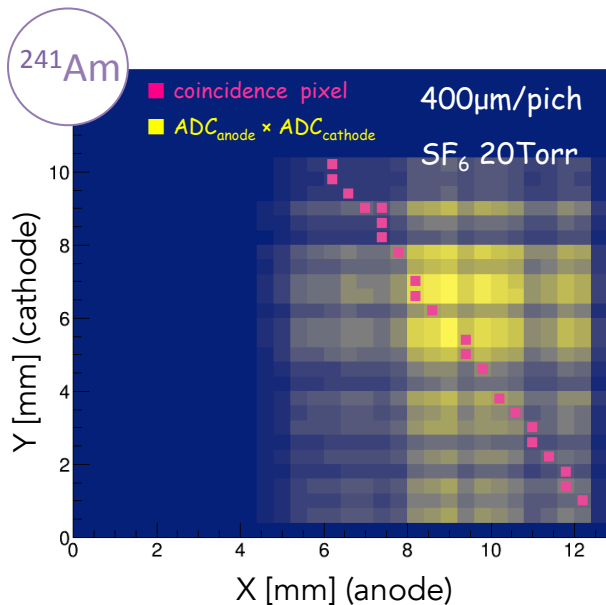
□ ドリフト距離30cmのTPCを用いたマイノリティピークの観測



- 観測できたとは言えない
- これから定量的に評価をしていく予定

SF₆ガスとμ-PICの2次元飛跡検出

□ 241Amのα線の2D飛跡検出



- 陰イオンガスSF₆でも従来の手法で2次元飛跡再構成が可能
- 2次元位置分解能

$$\sigma_{XY}(\text{RMS}) = 130\mu\text{m}$$

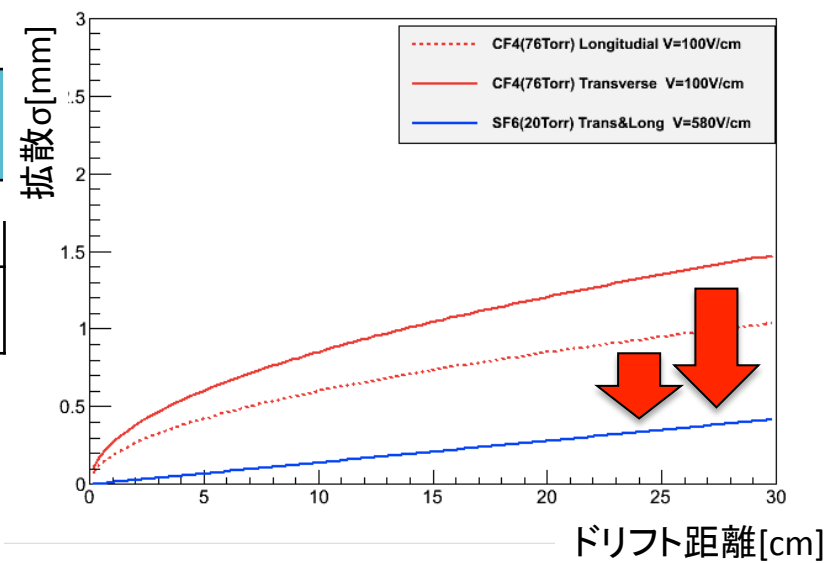
SF₆ガスのおいしいところ(シミュレーションから)

CF₄(76Torr)からSF₆(20Torr)にすることでうれしいことが結構ある

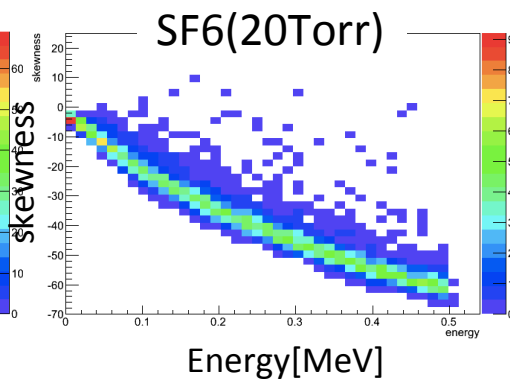
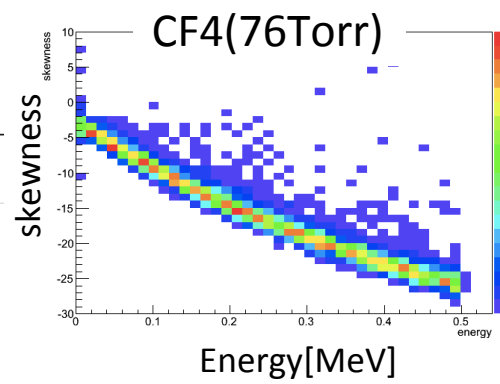
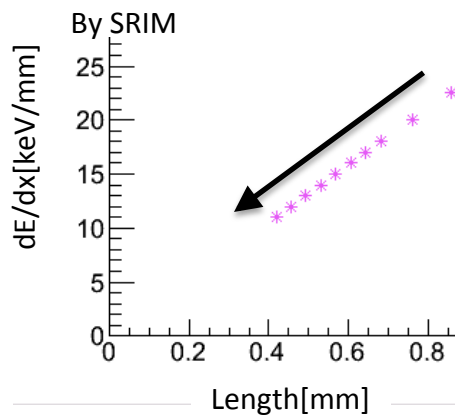
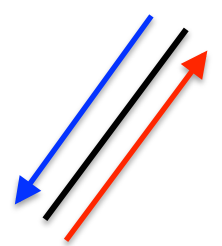
□ 拡散

By SRIM&MAGBOLZ

	拡散@30cmドリフト距離	飛跡長@100keV
CF ₄ (76Torr)	1.7mm	2mm
SF ₆ (20Torr)	0.5mm	4mm



□ Head-Tail

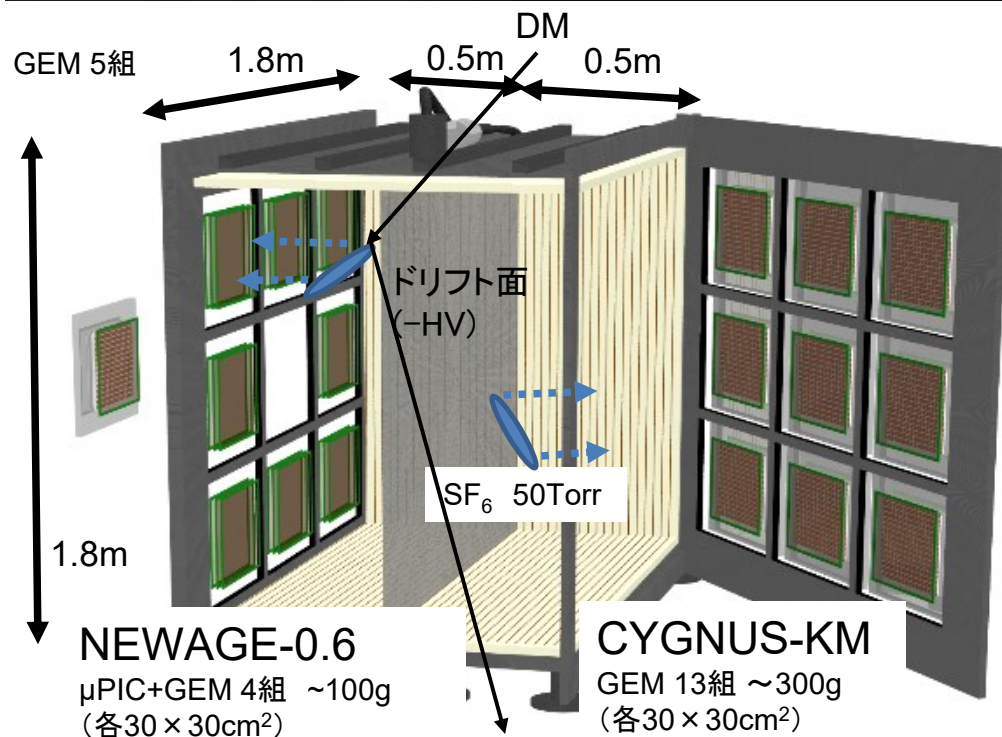


➤ Head-Tailの感度は2倍向上@100keV

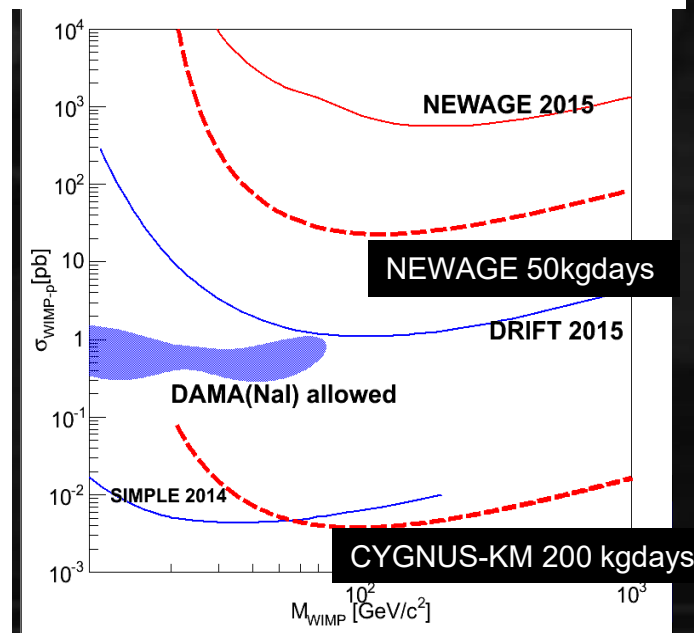
大型化へ

- **CYGNUS 方向に感度を持つ国際共同研究 (proto-collaboration)**
- **新チャンバーを設計中**
NEWAGE-0.6 (3次元方向感度あり)
+ CYGNUS-KM (lowBG, 大容積 方向感度は1次元のみ)

K.Miuchi@第72回JPSのスライドから



目標感度



まとめ&展望

□ NEWAGE実験

- 方向に感度を持った暗黒物質探索実験を行ない、方向に感度を持つ制限を更新している
- 現在はバックグラウンド除去の研究 (NI μ TPC、低BG μ -PIC)が進行中

□ NI μ TPCの開発

- SF₆ガスを用いた μ -PIC+GEMで、ガス気圧20Torrでガスゲイン最大2000程度、2次元位置分解能140 μ mが得られた

□ 展望

- 次期計画ではSF₆ガスを用いた容積60 \times 60 \times 100cm³のNI μ TPCを開発し、方向情報を用いた手法でDAMA領域の探索を目指す

Back up

■ PTEP2015 (RUN14-1,2)以降

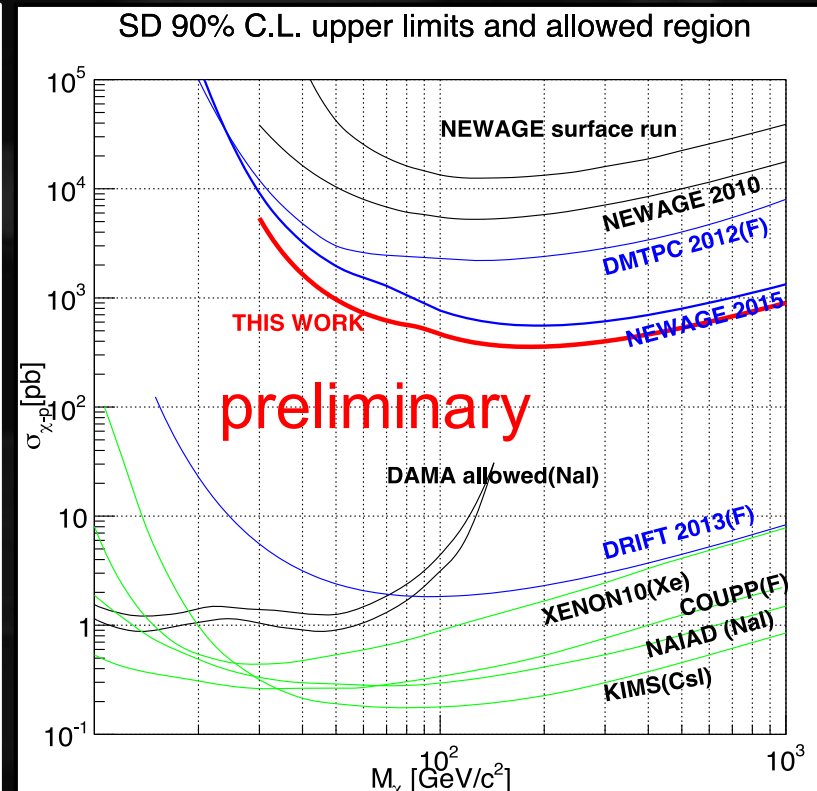
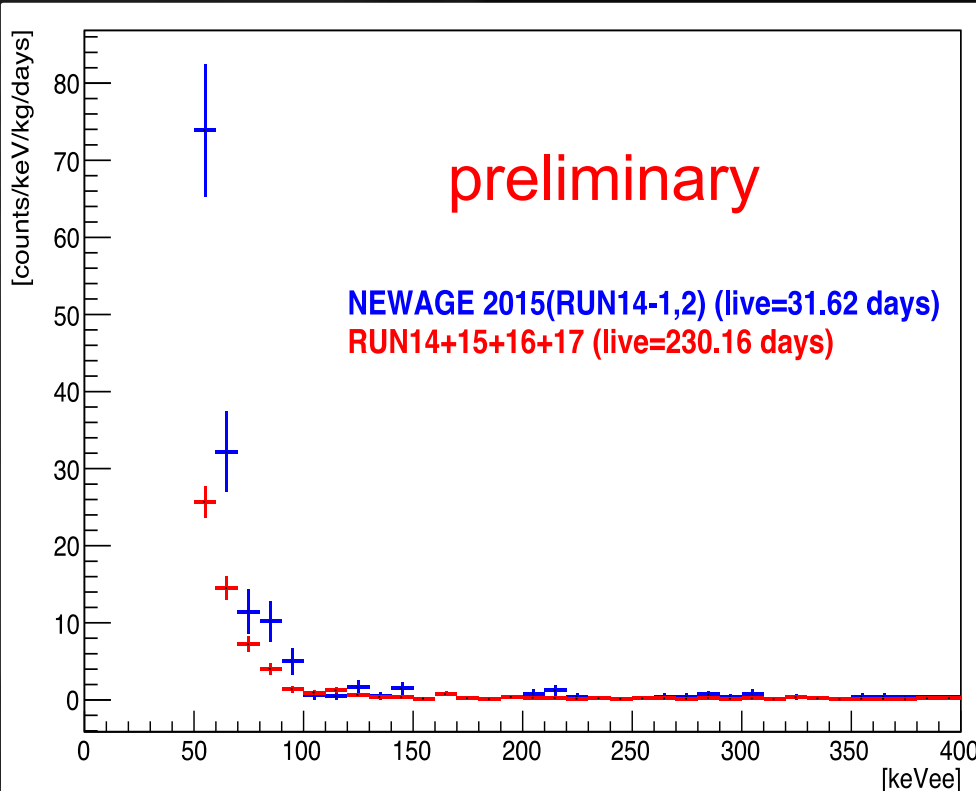
from K.Miuchi's slide@72回JPS

■ DM RUN継続 (RUN 14- RUN17)

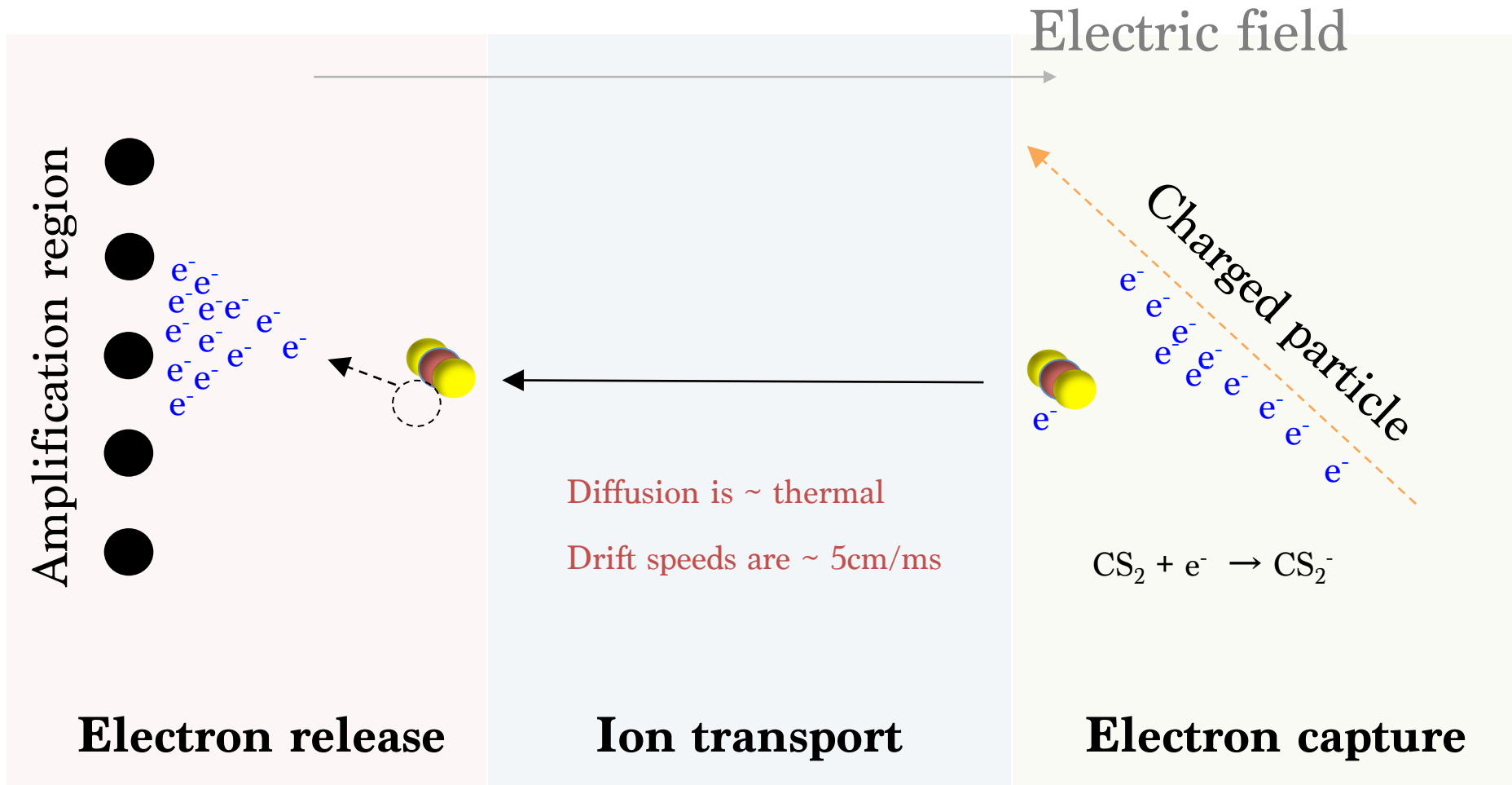
■ 2013/7/20-2016/8/24

■ live time : 31.6 days → 230.2 days

■ 制限 2倍程度更新



陰イオンTPCの原理



三拍子そろう陰イオンガスはあまりない

陰イオンガスの候補

CF₄(electron drift(normal) gas)

- DM実験でターゲットとしても使用
- 典型的なドリフト速度：~cm/μs
- ガスゲイン 3000 (76Torr)
- プリアンプ 160mV/pC(ASDchip)

Negative Ion Gas

CS₂

- 有毒、揮発性、可燃性
- 電子親和力0.89eV
- MWPCでの実績がある
- DM実験ではCF₄ガスを加える必要あり

ガスゲインの要請

$$\sim 480 \cdot \frac{76\text{Torr}}{P}$$

with amplifier(1V/pC)

SF₆

- 無毒、不揮発性、不燃性
- 電子親和力1.1eV
- 絶縁ガスとして用いられる
- THGEMでの実績がある

[N.Phan talk at CYGNUS2015 , June 2015]

ガスゲインの要請

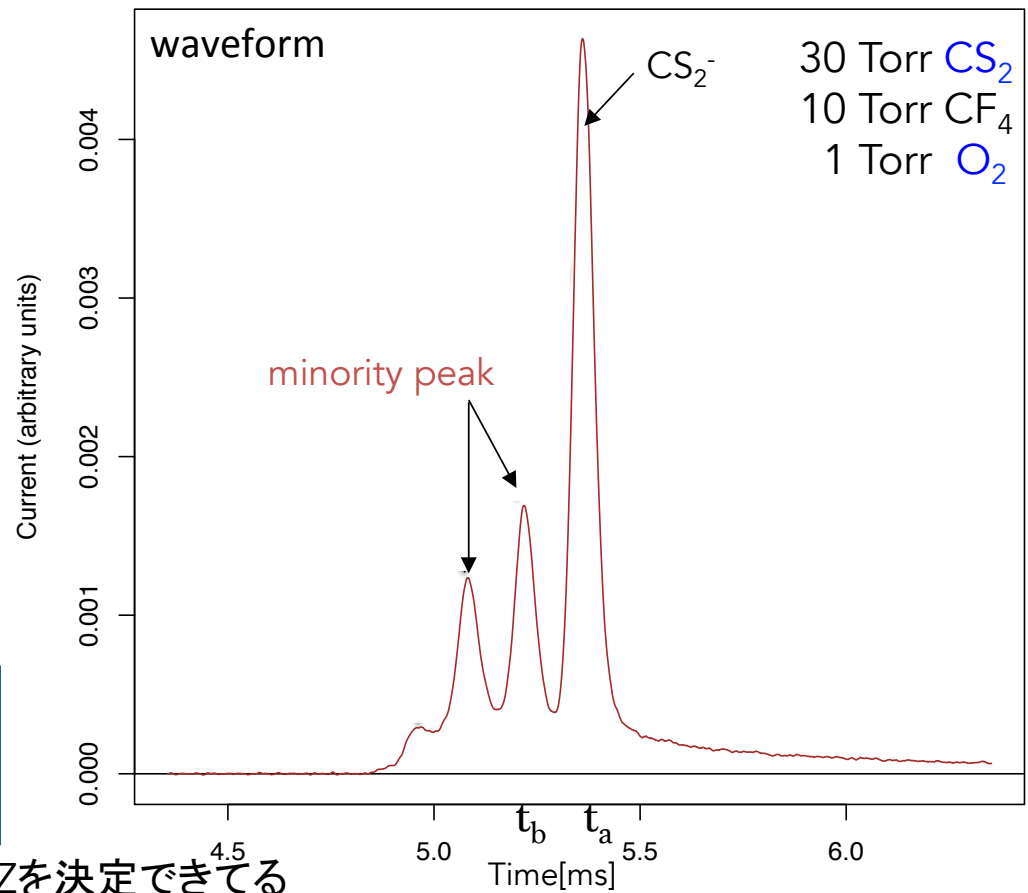
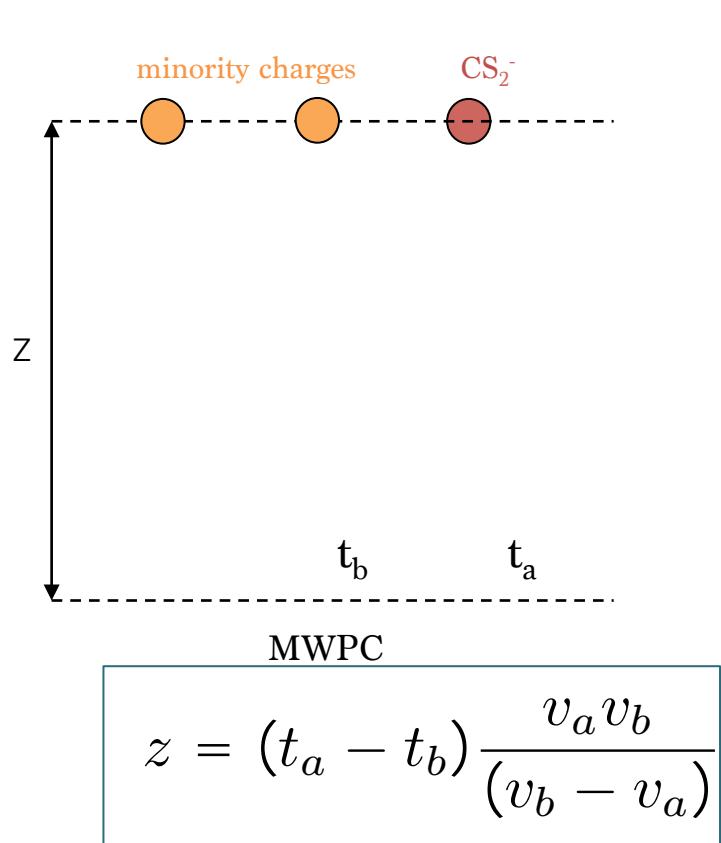
$$\sim 980 \cdot \frac{76\text{Torr}}{P}$$

典型的なドリフト速度: 10⁻²cm/μs

We can use slow shaping time amplifier(good S/N).

陰イオンを用いたTPCのZの絶対位置決定

- DRIFTグループがMWPC-TPCでのZの絶対位置決定に成功
[Physics of the Dark Universe 9-10(2015)1-7]
- 陰イオンガスCS₂にO₂加えることでドリフト速度の異なる陰イオンが複数生成される



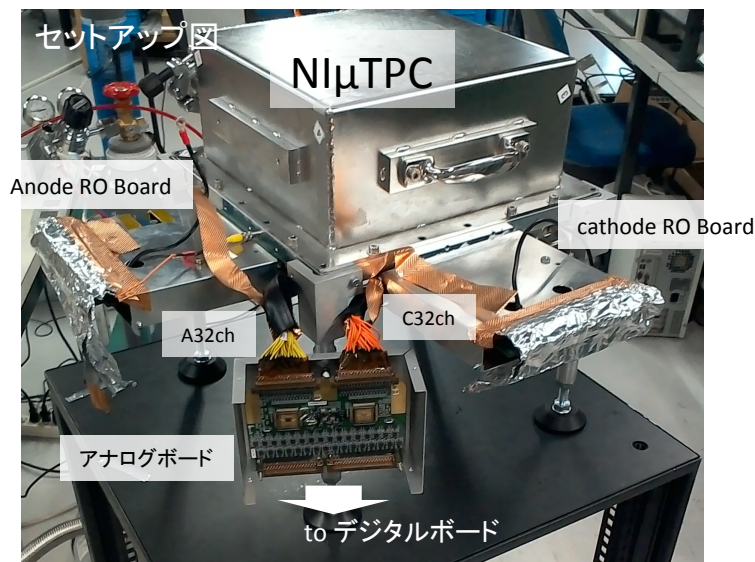
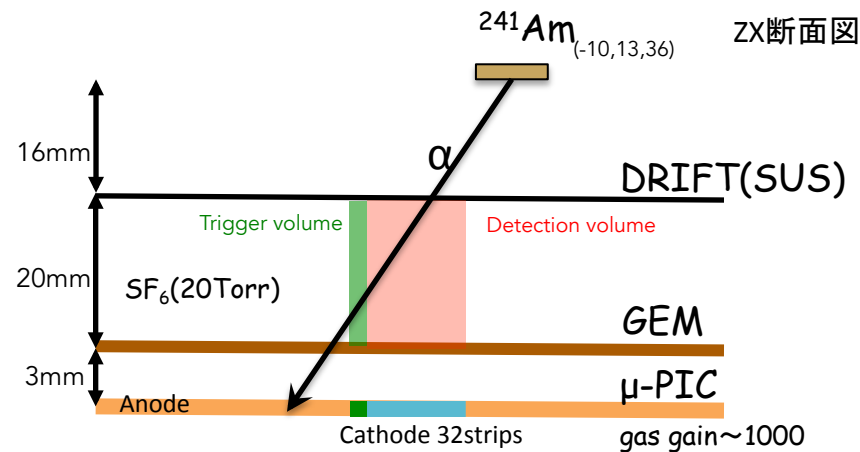
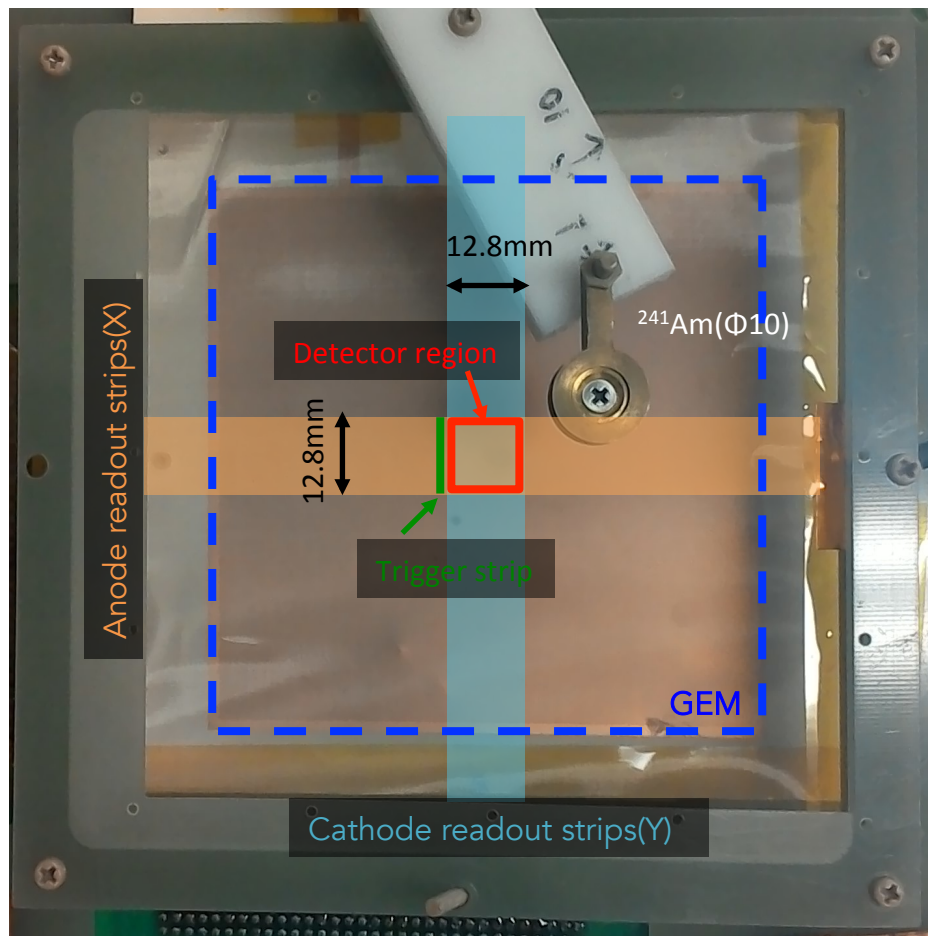
DRIFTグループはσ_z ~ 2mmの精度でZを決定できる

NI μ PIC ASIC

NI μ TPC用ASIC 要請値		
	Minority Charge	Main Charge
detector Cap	300pF	300pF
Minimum signal	3fC(ENC \times 10)	80fC
ENC	2000(0.3fC)以下	6.25 \times 4(10fC)以下
Dynamic range	-300fC \sim 300fC	-10pC \sim 10pC
ゲイン	10mV/fC	0.3-0.5mV/pC
時定数	4us	4us

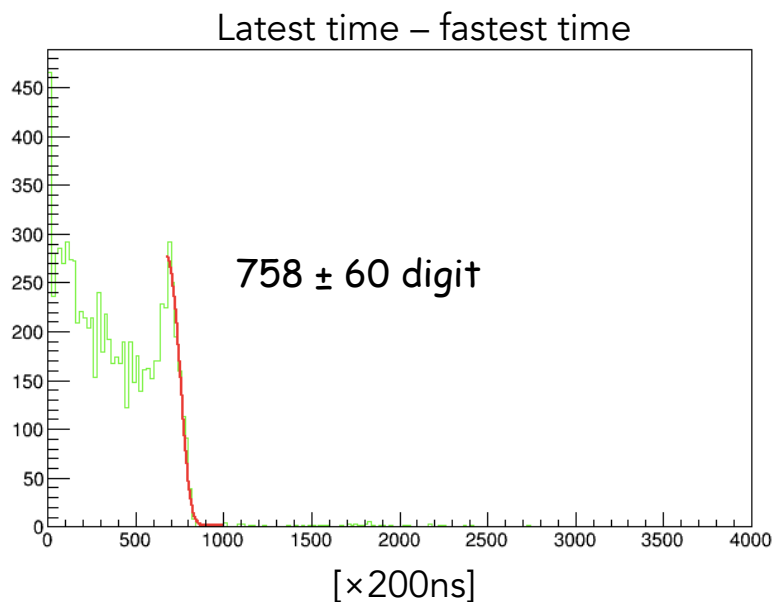
α線の飛跡検出試験

- 12.8mm×12.8mmの検出領域でα線(^{241}Am)の飛跡検出を行なう



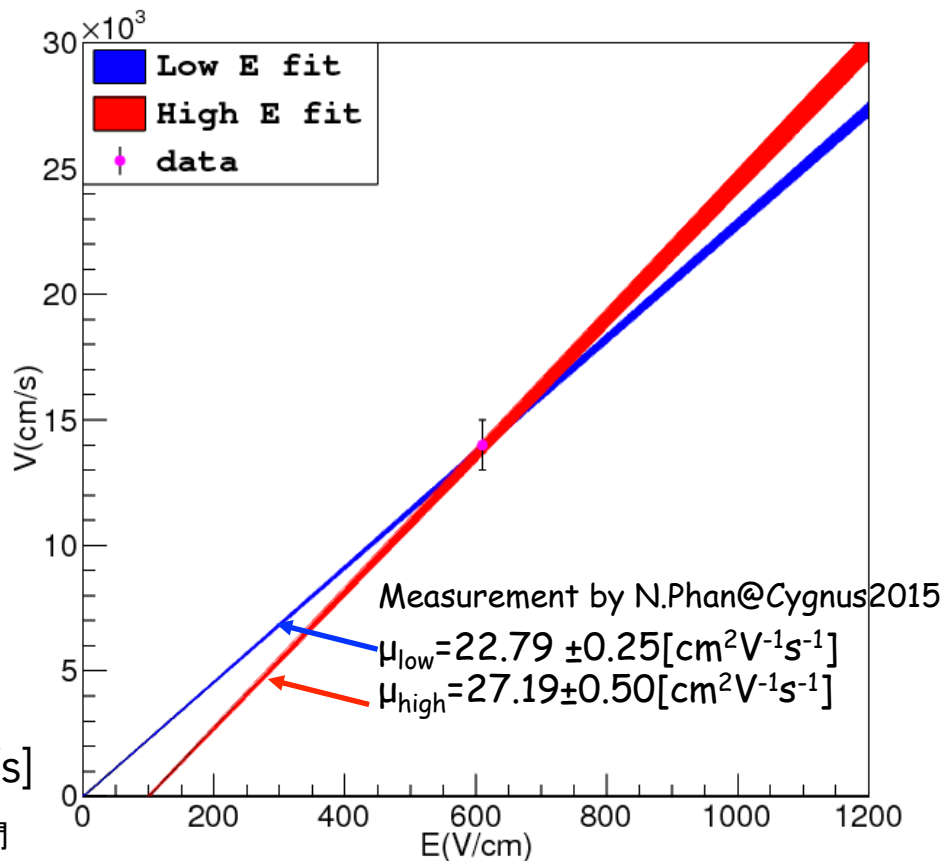
SF₆-Drift Velocity

- カソード信号の最大時間差がドリフト距離2cmを走ったイベントであることを用いてSF₆-イオンのドリフト速度を求める



$$2[\text{cm}] / (152[\mu\text{s}] - 12.5[\mu\text{s}]) = 1.4 \times 10^4 [\text{cm/s}]$$

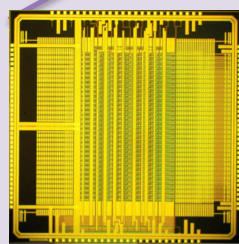
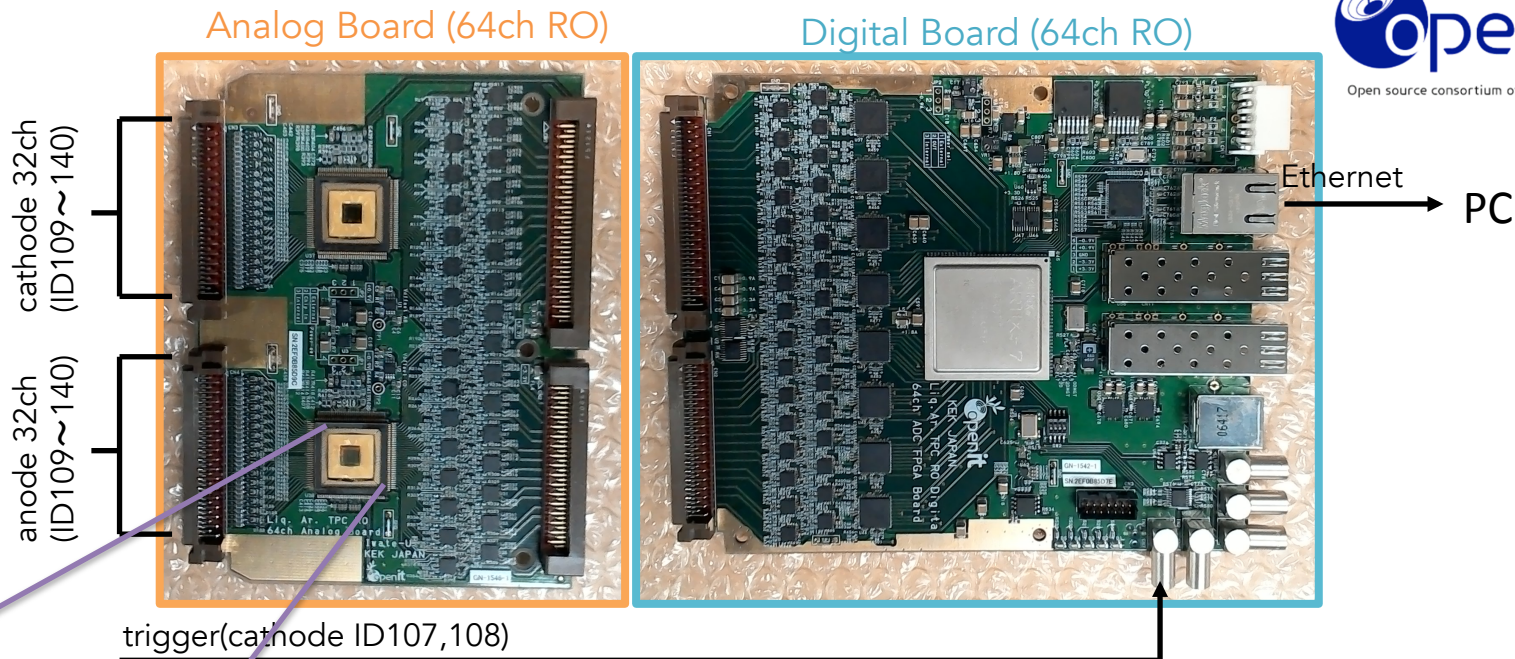
GEM&μPIC間3mmのドリフト時間



エレクトロニクス

Ref: K.Sakashita's slide(KEK)@計測システム研究会2015RCNP
Y.Kuromori's slide(岩手大)@2015JPS秋季大会

- NI μ TPCではシェイピングタイムの長いアンプが必要(O(us))
- KEK・岩手大学で共同開発された液体アルゴンTPC用読み出しエレキを用いる



LTARS2014

Conversion gain 約9.0mV/fc
最大入力電荷 60~100fc
ENC 2000以下@300pF
Shaping time 1us

デジタルボード

32ch differential inputs(2Vpp)
12bits FADC
4000 sampling
サンプリング周波数<20MHz