

NI μ TPCのための MPGD読み出し装置の開発

12/7 MPGD&アクティブ媒質TPC研究会@理研

神戸大学大学院 中村拓馬

KEK(田中真伸氏、坂下健氏、岸下徹一氏、庄子正剛氏)

神戸大学(NEWAGE)、岩手大学

目次

1. NEWAGE

2. NI μ TPC

3. LTARS

4. 今後の展望

5. まとめ

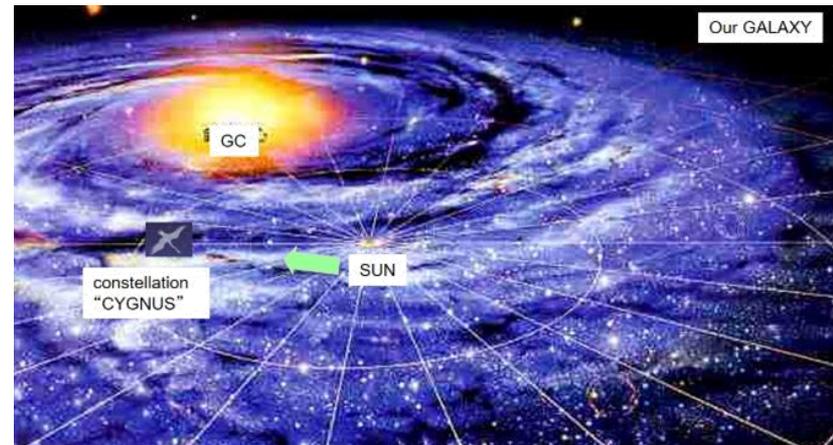
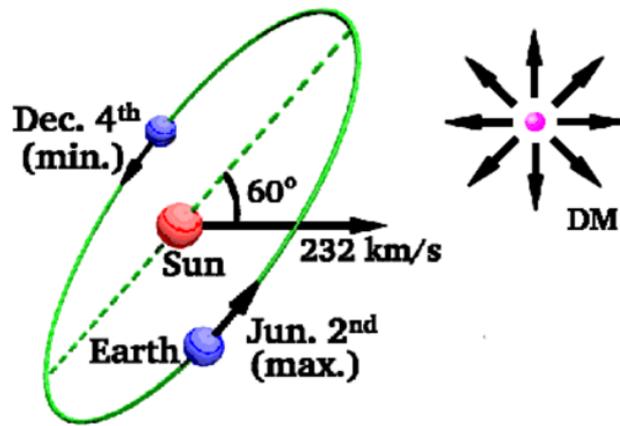


NEWAGE

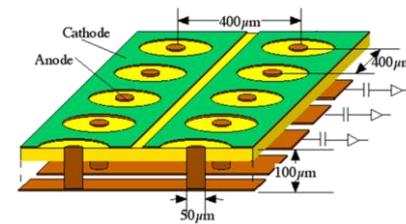
NEWAGE(NEw general WIMP search Advanced Gaseous tracker Experiment) は3次元飛跡検出器 μ TPCを用いた、到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験である。

暗黒物質によって反跳された原子核の飛跡を検出することで「**暗黒物質の風**」をとらえる。

→到来方向異方性は暗黒物質検出の確実性の高い証拠となる！



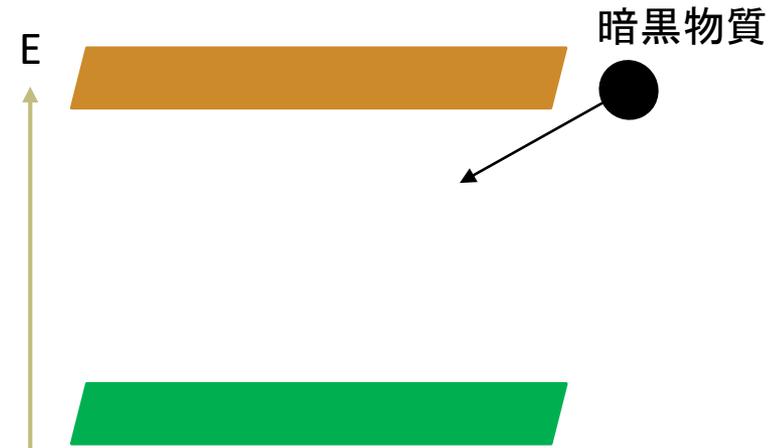
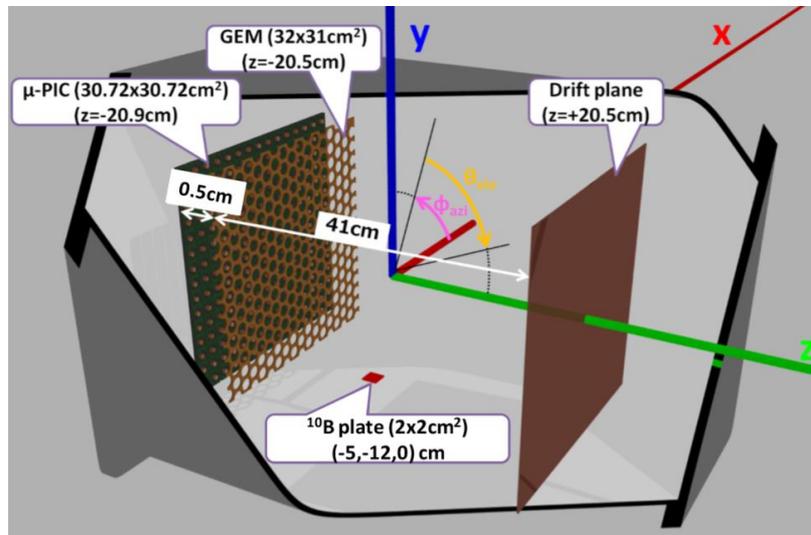
NEWAGE



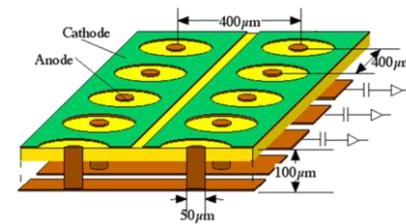
神岡地下でデータ取得を行っている。

現在はNEWAGE0.3b'という検出器を用いており、
二次元飛跡検出器 μ -PICと増幅器GEM、41cmのドリフト領域から
構成されている。

標的となるガスには CF_4 を低圧で使用。



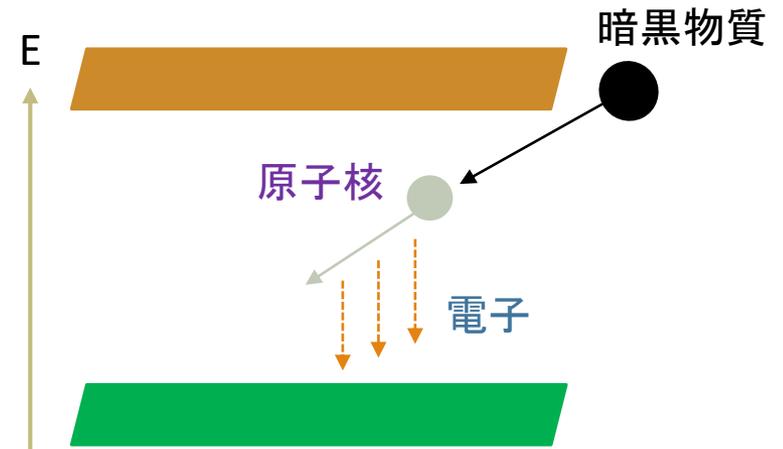
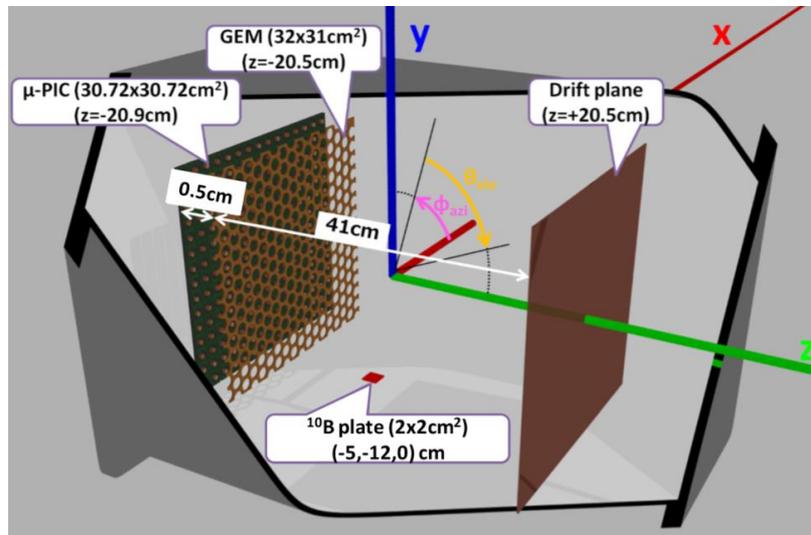
NEWAGE



神岡地下でデータ取得を行っている。

現在はNEWAGE0.3b'という検出器を用いており、
二次元飛跡検出器 μ -PICと増幅器GEM、41cmのドリフト領域から
構成されている。

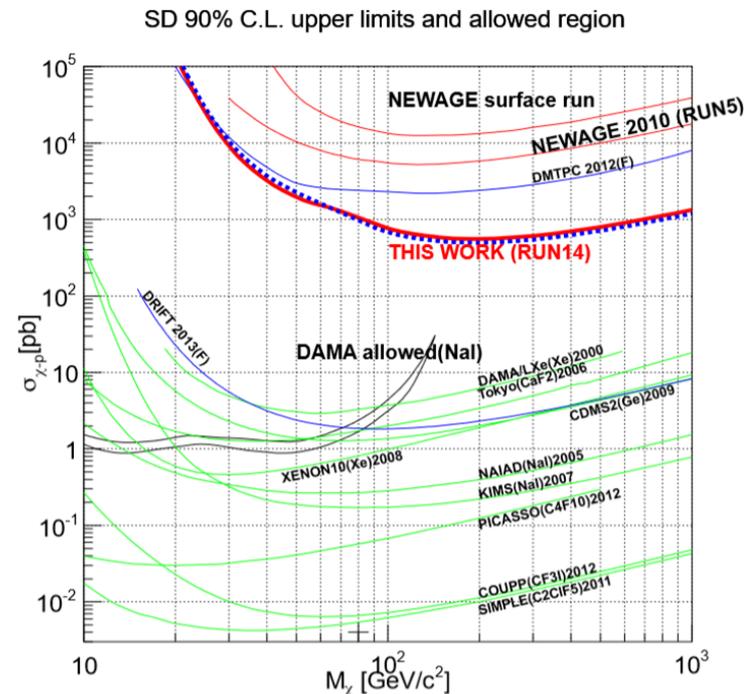
標的となるガスには CF_4 を低圧で使用。



NEWAGE

2013年から観測を行っており到来方向に感度を持つ手法では世界最高感度を得ている。

しかしDAMA領域や従来の手法で得られる感度には届いておらず、さらなる感度向上が求められている。

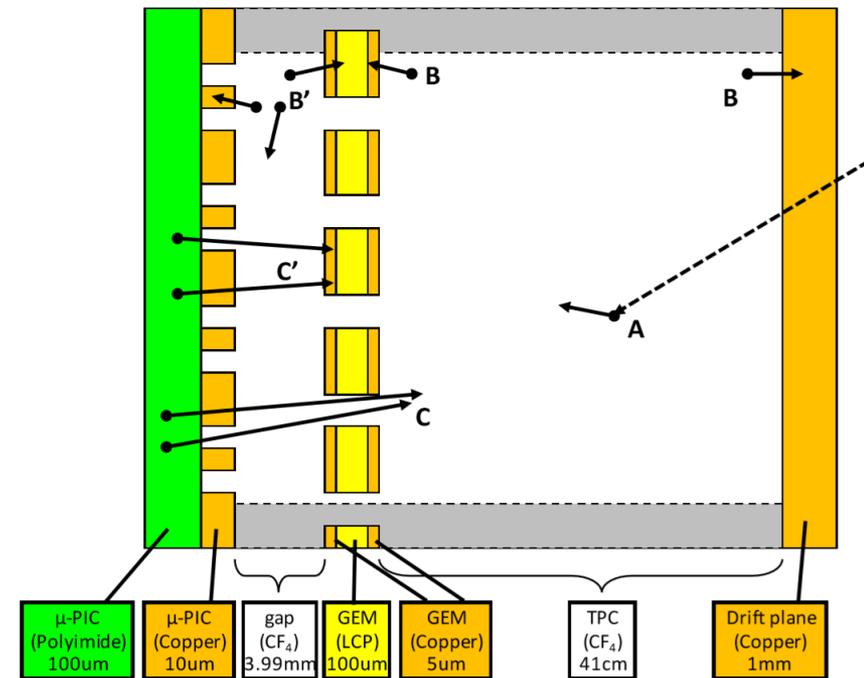
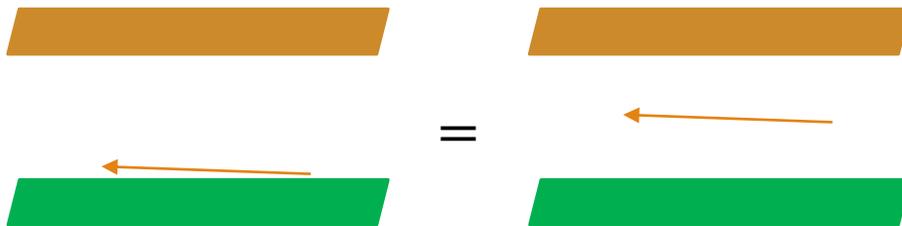


K.Nakamura et al
Progress of Theoretical and
Experimental Physics 2015, 43F01

NEWAGE

現在のNEWAGEの感度を制限しているのはBGであり、それらの低減が必須である。

- ◆ 先行研究により主なBGは μ -PIC由来の α 線であると理解された。
- ◆ BGを除去するため有効体積カットを行いたいが、暗黒物質探索実験では外部トリガーを設けられないため、z方向に対して絶対値を得ることができない。



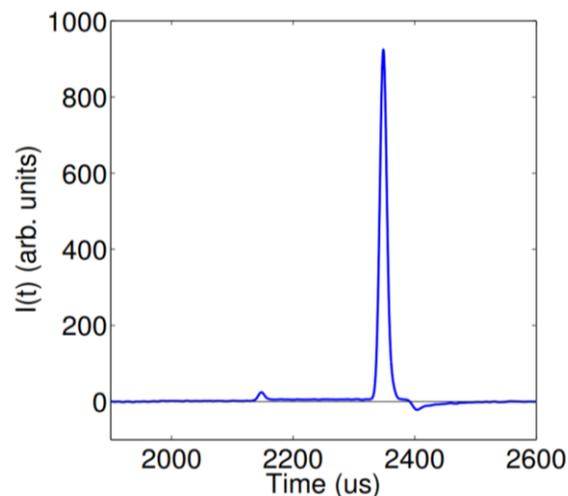
NI μ TPC

NEWAGEの感度を制限しているBGを特定・除去するためにNI μ TPC(Negative Ion micro time projection chamber)を開発中。

NI μ TPCは電子ではなく陰イオンをドリフトさせる。

陰イオンは電子よりはるかに質量が大きいいため、拡散が抑えられる。

SF₆を使用することによりマイノリティーチャージ検出という手法で有効体積カットを行うことができる。



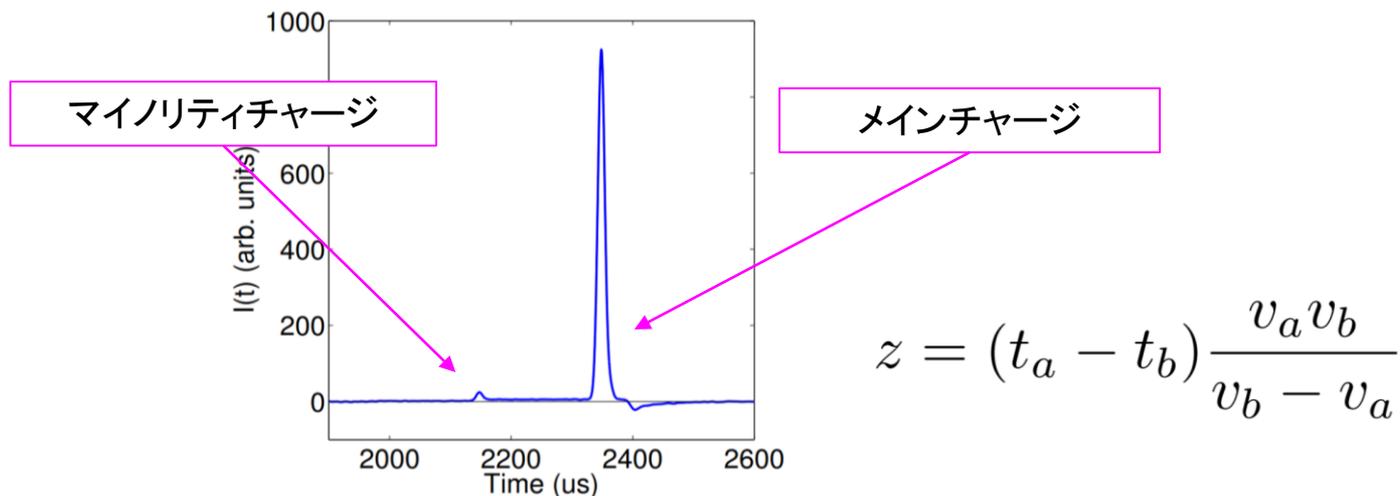
NI μ TPC

NEWAGEの感度を制限しているBGを特定・除去するためにNI μ TPC(Negative Ion micro time projection chamber)を開発中。

NI μ TPCは電子ではなく陰イオンをドリフトさせる。

陰イオンは電子よりはるかに質量が大きいいため、拡散が抑えられる。

SF₆を使用することによりマイノリティーチャージ検出という手法で有効体積カットを行うことができる。



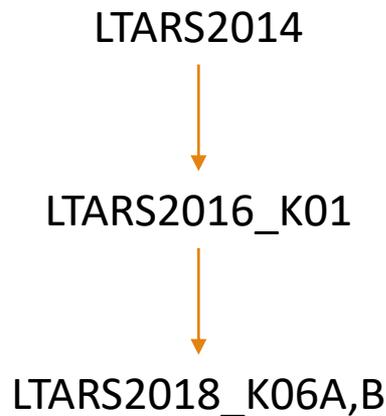
LTARS

NI μ TPCを実現するためには

1. 陰イオンをドリフトさせるため時定数が大きい
2. マイノリティチャージとメインチャージ同時検出のためにダイナミックレンジが大きい

という条件を持つ読み出し回路が必要。

条件を満たす回路の開発をKEKと共同で行っている。



LTARS

NI μ TPCを実現するためには

1. 陰イオンをドリフトさせるため時定数が大きい
2. マイノリティチャージとメインチャージ同時検出のためにダイナミックレンジが大きい

という条件を持つ読み出し回路が必要。

条件を満たす回路の開発をKEKと共同で行っている。

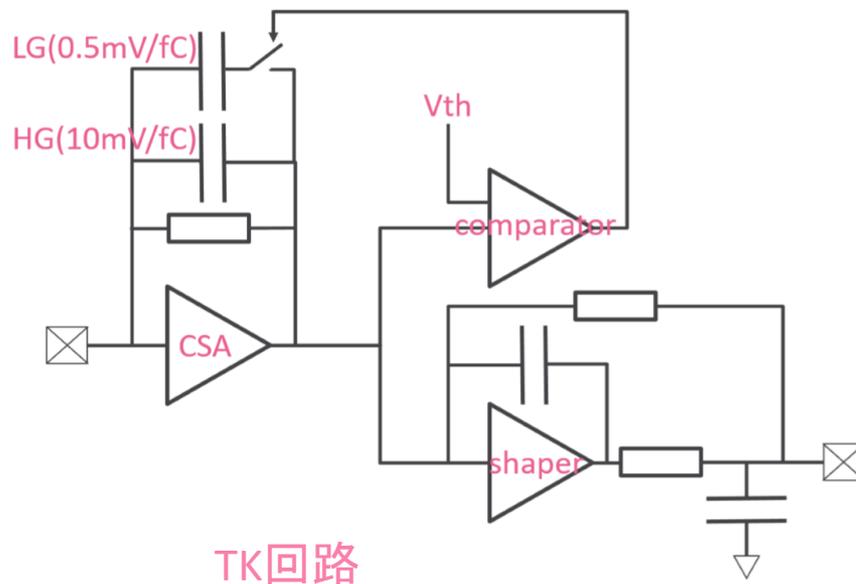
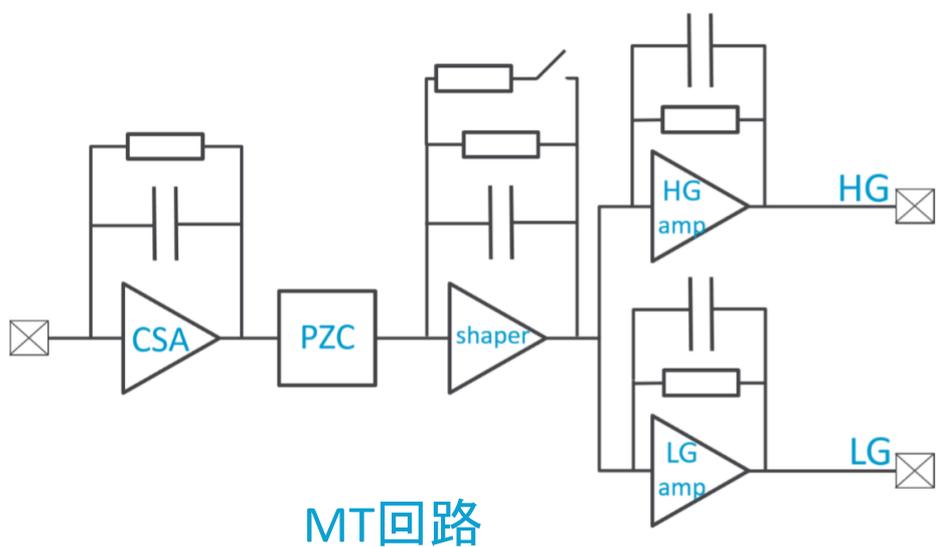


LTARS2016

LTARS2016_K01では広いダイナミックレンジをカバーするためLG・HGという2種類の増幅率とslow・fastという2種類の時定数が存在する。

設計思想の異なる2つの回路を8chずつ搭載している。

1. **MT回路** 1つの入力に対しHG・LG2つの出力
2. **TK回路** 入力大きさに応じてゲインがダイナミックに切り替わる



LTARS2018

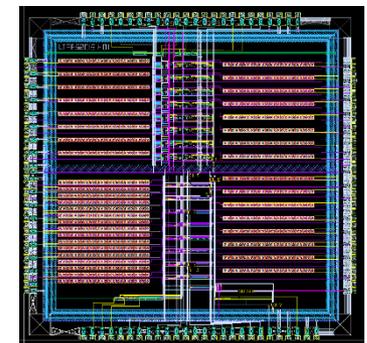
LTARS2016_K01ではノイズに対しての要請を達成することができなかったため、改良としてLTARS2018が設計された。

(2016) ENCの要請値2000に対し5776

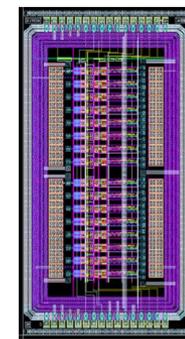
- MT回路 → LTARS2018_K06A (本発表)
- TK回路 → LTARS2018_K06B (岩手大学 五十嵐さん)

	High Gain (マイノリティチャージ)	Low Gain (メインチャージ)
最小信号	3fC	100fC
ENC	<4000(0.6fC)	< 1.3×10^5 (20fC)
ダイナミックレンジ	-80fC~80fC	-1600fC~1600fC
ゲイン	10mV/fC	0.5mV/fC
時定数	1 μ s/4 μ s	1 μ s/4 μ s
検出器容量	300 pF	

LTARS2018_K06A 要請値



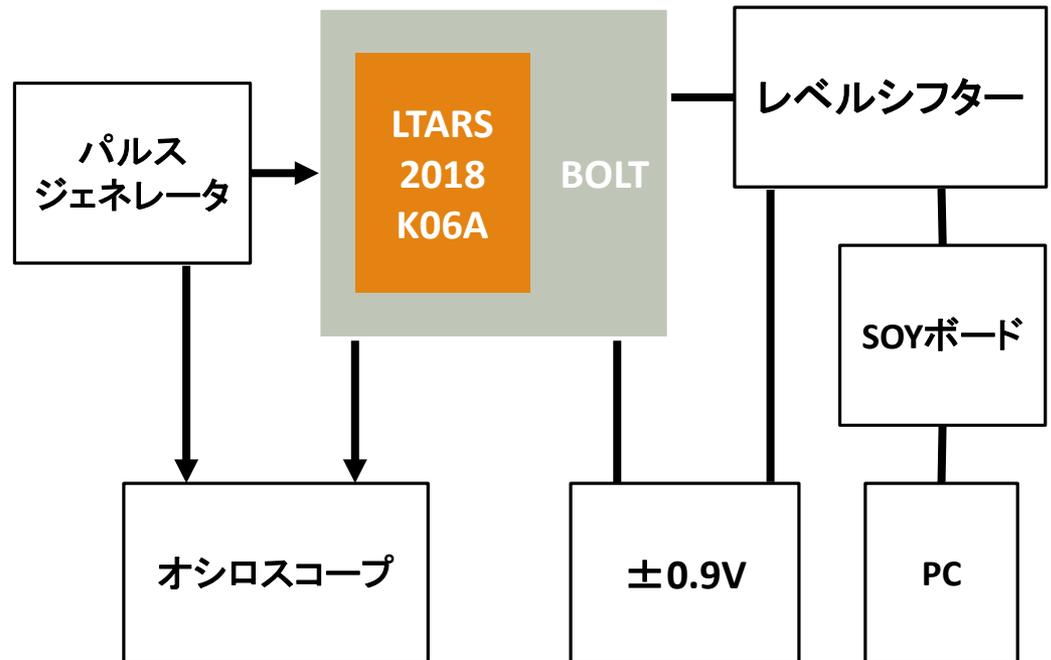
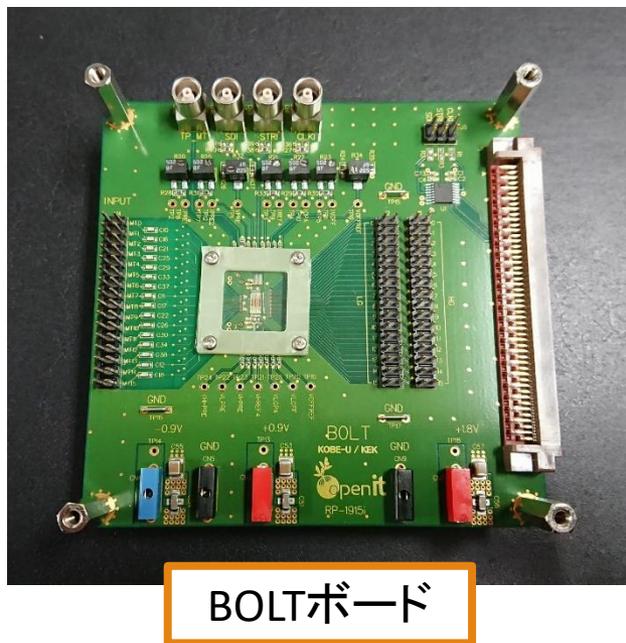
5mm



2.5mm

LTARS2018

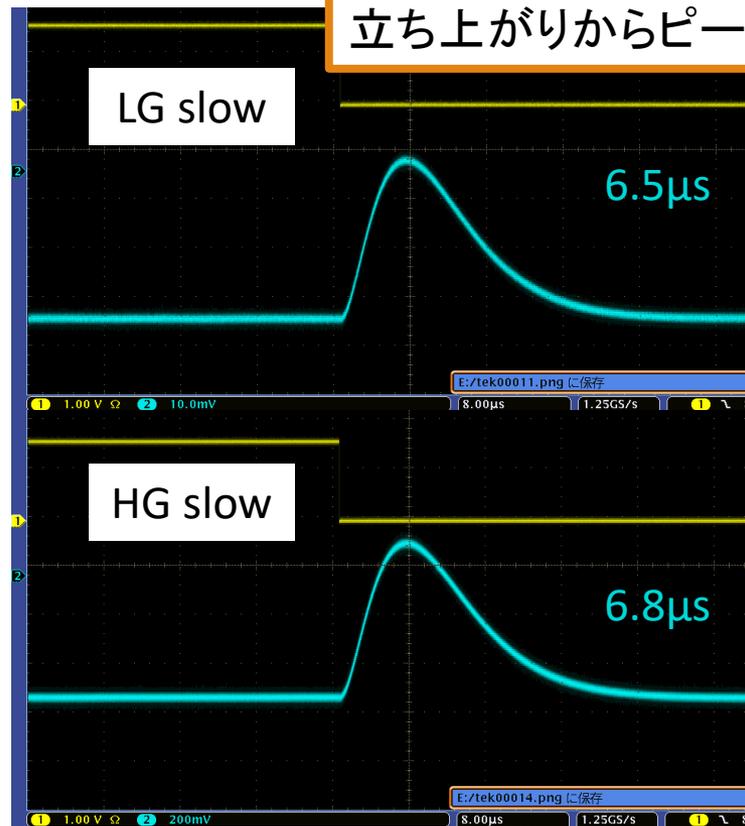
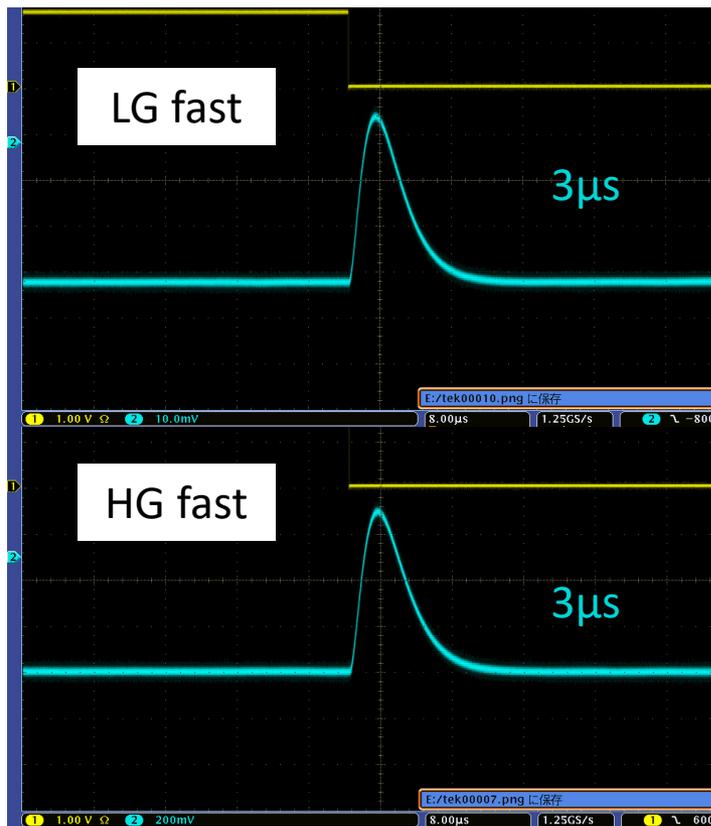
LTARS2018_K06A評価のための基板(BOLTボード)を作成。



図のような回路を組んで測定をし、性能評価を行った。

LTARS2018(Wave Form)

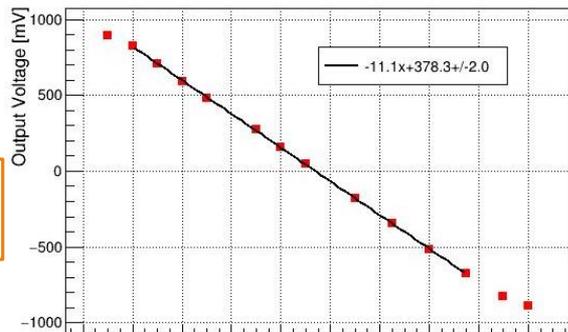
時定数
立ち上がりからピークまで



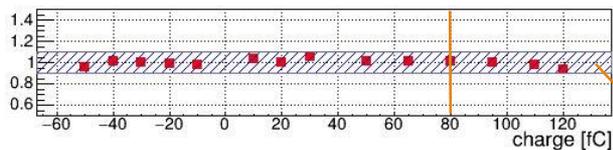
要請値 fast 1 μ s slow 4 μ s Ni μ TPCに対しては大きくなる分には問題ない
液体アルゴン検出器に対しては大きすぎる時定数は問題となるため調整が必要

LTARS2018(Dynamic Range)

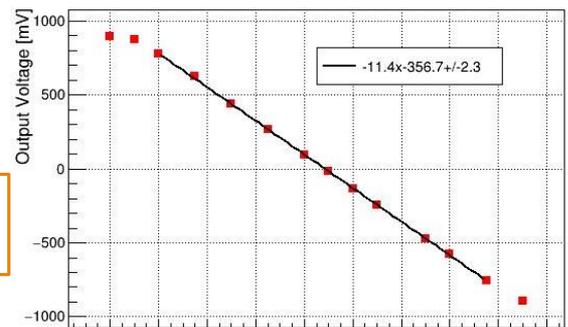
HG



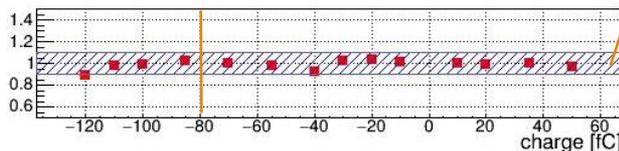
ratio



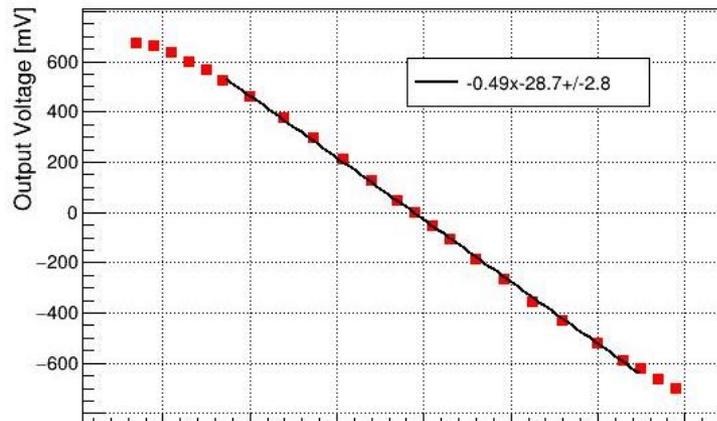
HG



ratio

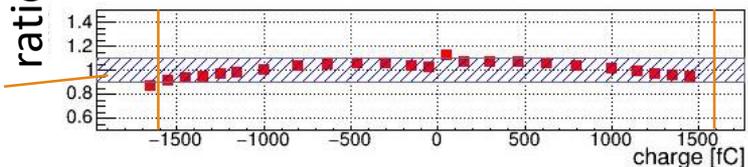


±10%



LG

ratio



Ratio = 測定値/フィット値

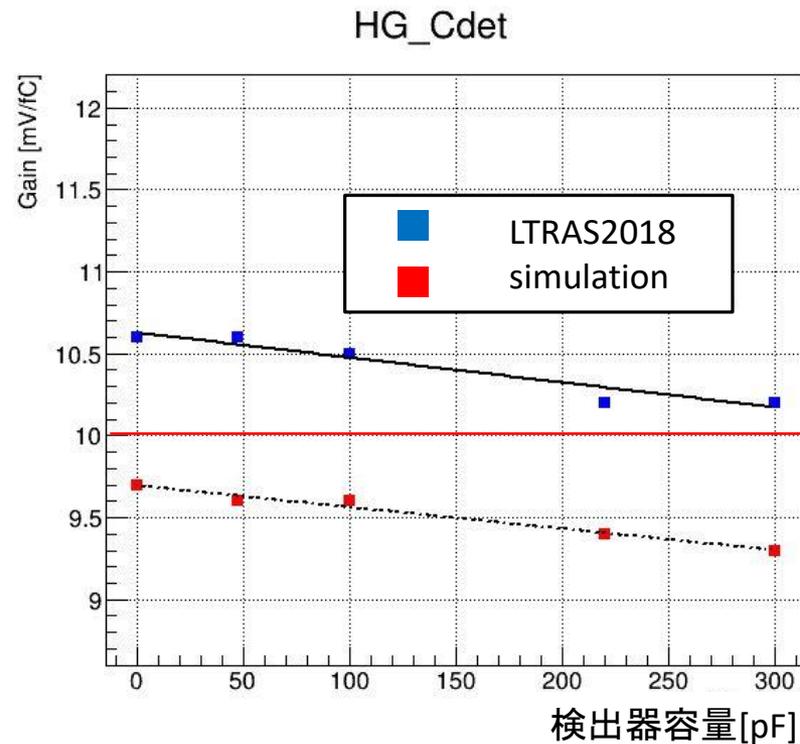
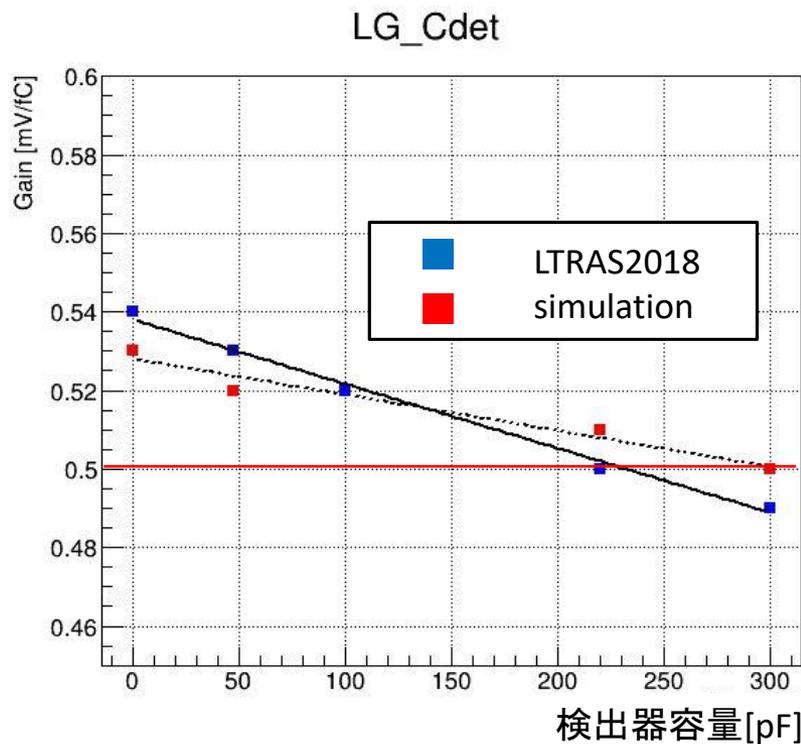
ダイナミックレンジ

LG -1550fC~1450fC

HG |120fC|(片側ずつ)

HGは要請値を達成

LTARS2018(Gain)

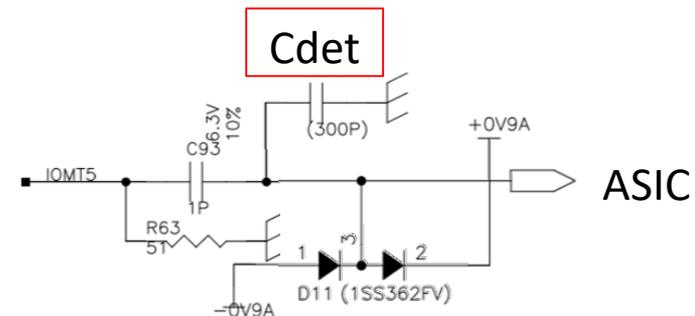
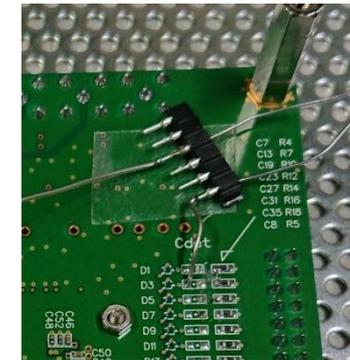
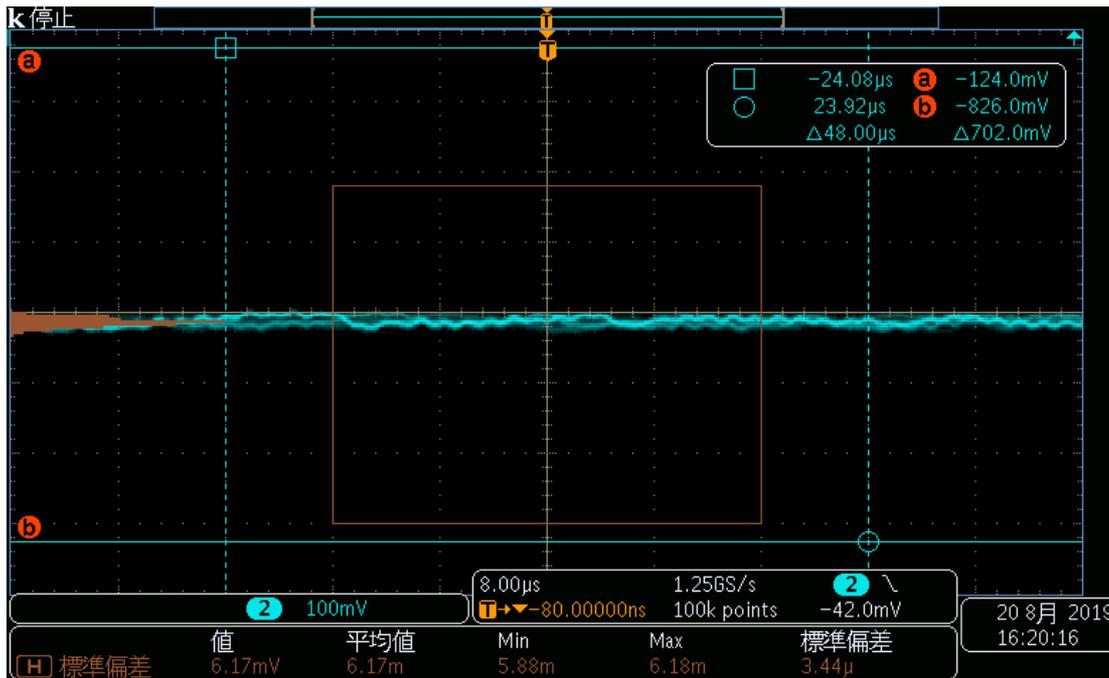


検出器容量を変化させてゲインを確認した。

300pFでおおむね要請値を満たしている。

(シミュレーションにはcadence社のvirtuosoを使用)

LTARS2018(ENC)

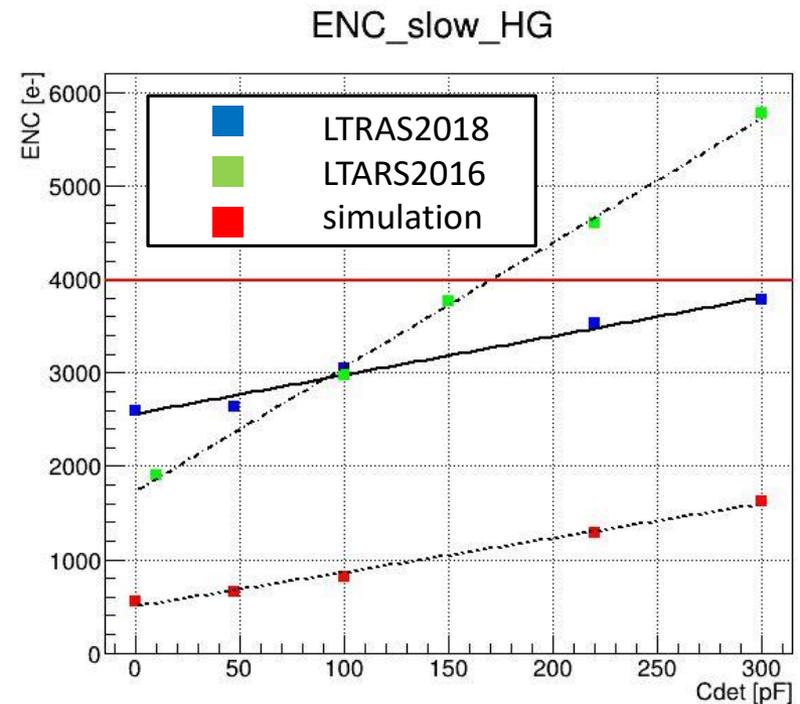
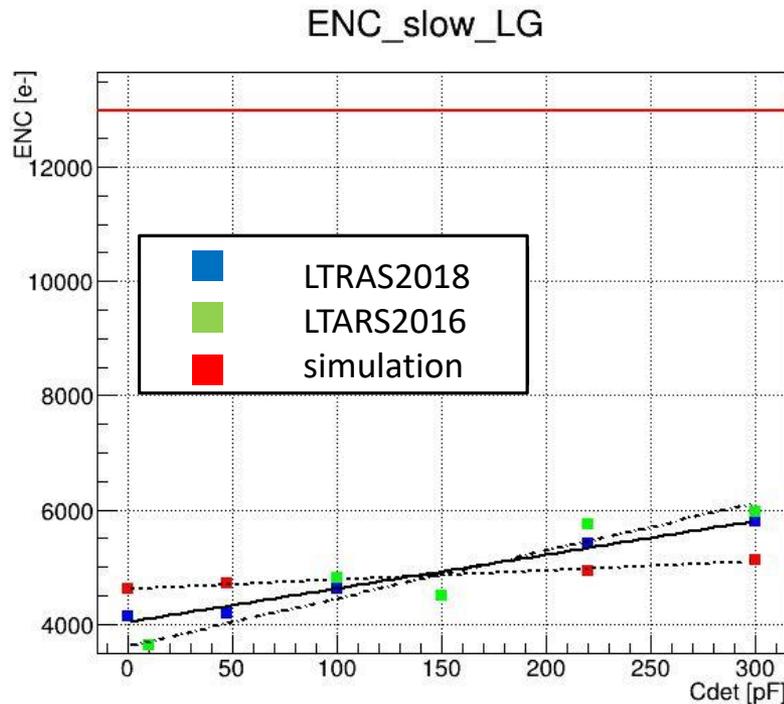


オシロスコープ(MDO3000)のヒストグラム機能を使用して

Inputがないときのベースラインの標準偏差を測る

$$\text{ENC} = \text{noise [mV]} / \text{gain [mV/fC]} / \text{elementary charge [C]}$$

LTARS2018(ENC)

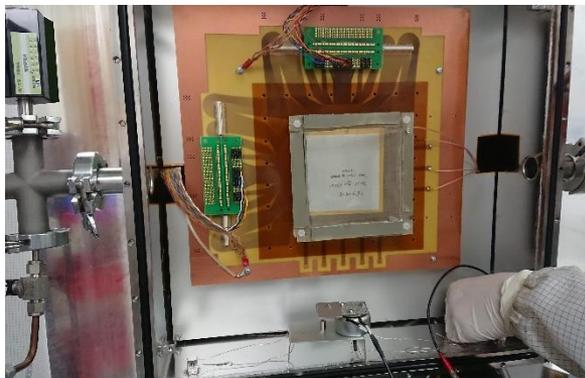
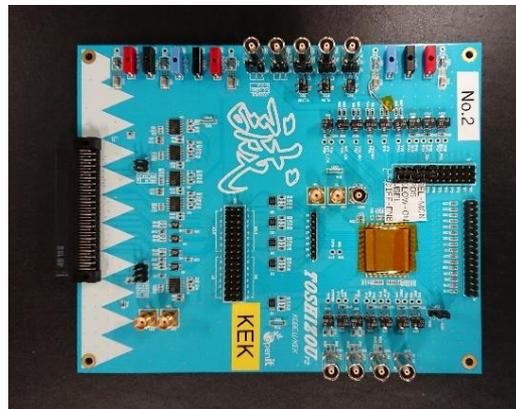


検出器容量を変化させてENCを測定した。

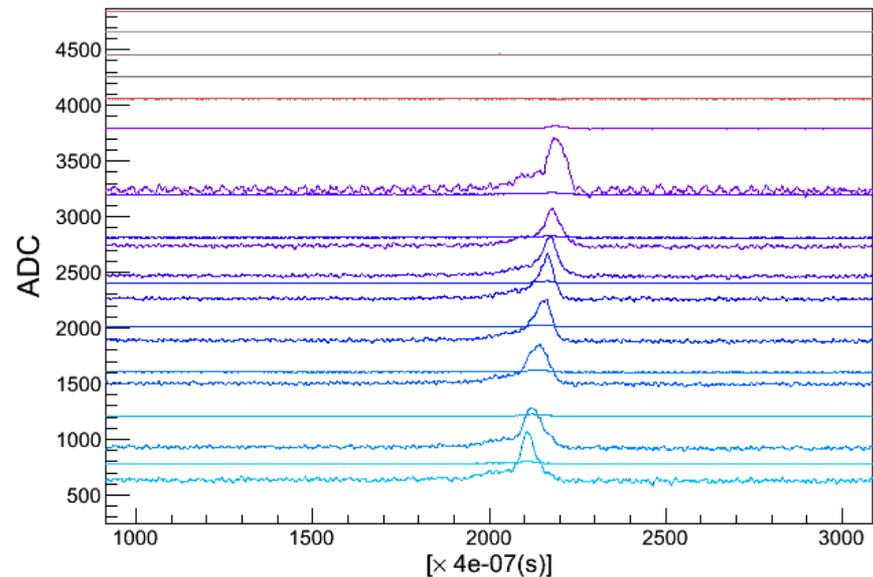
LG,HGともに300pFで要請値を満たすことが確認できた。

HGは基板配線を最適にすることでさらに良くできると考えられる。

今後の展望①



Wave Form



LTARS2016でマイクロメガスと接続試験を行い、波形を取得することができた。

同様の試みをLTARS2018でも行っていきたい。

今後の展望②



左図は現在NEWAGEで使用しているアナログ信号処理ボード。

LTARS2014が実装されている。

液体Ar検出器のために作られたもの。

デジタルボードと組み合わせて使用することで

- ✓ 64ch
- ✓ サンプリングレート 2.5MHz
- ✓ 4000 (sample/ch)/event

のデータ取得が可能。

今後の展望②

<現状>



外来ノイズを抑えるため信号伝送には差動信号を使用している

↓ LTARS2018の仕様に合わせた改版を行いたい。

<改版後>



→回路の修正はほぼ終了、製作に向けて始動中

まとめ

- LTARS2018K06Aについて性能評価を行い、おおむね要請値を満たすことが確認された。
- 要請値を満たしたLTARSでNEWAGEの検出感度を大幅に更新し、大型化による将来的な感度向上につながると期待。
- 今後測定用のボードの開発や検出器との接続試験を行っていく。

到来方向異方性

暗黒物質の弾性散乱による角度スペクトル

$$\frac{d^2 R}{dE_R d \cos \theta} \simeq \frac{1}{2} \frac{R_0}{E_0 r} \exp \left[-\frac{(v_E \cos \theta - v_{\min})^2}{v_0^2} \right]$$

SD, F, $M_D=100$ [GeV], $\sigma=1$ [pb]

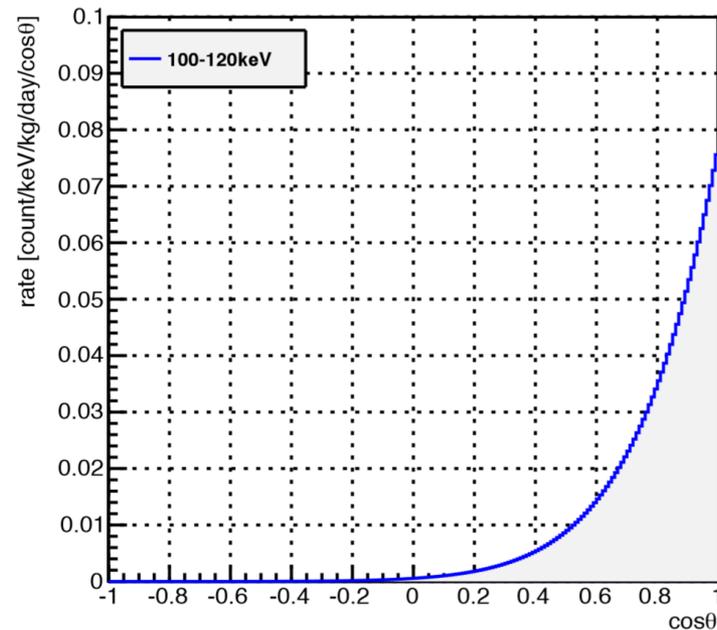
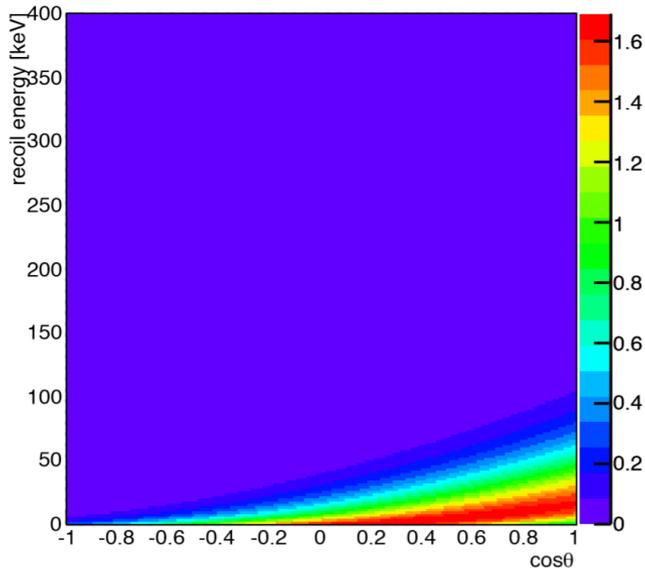
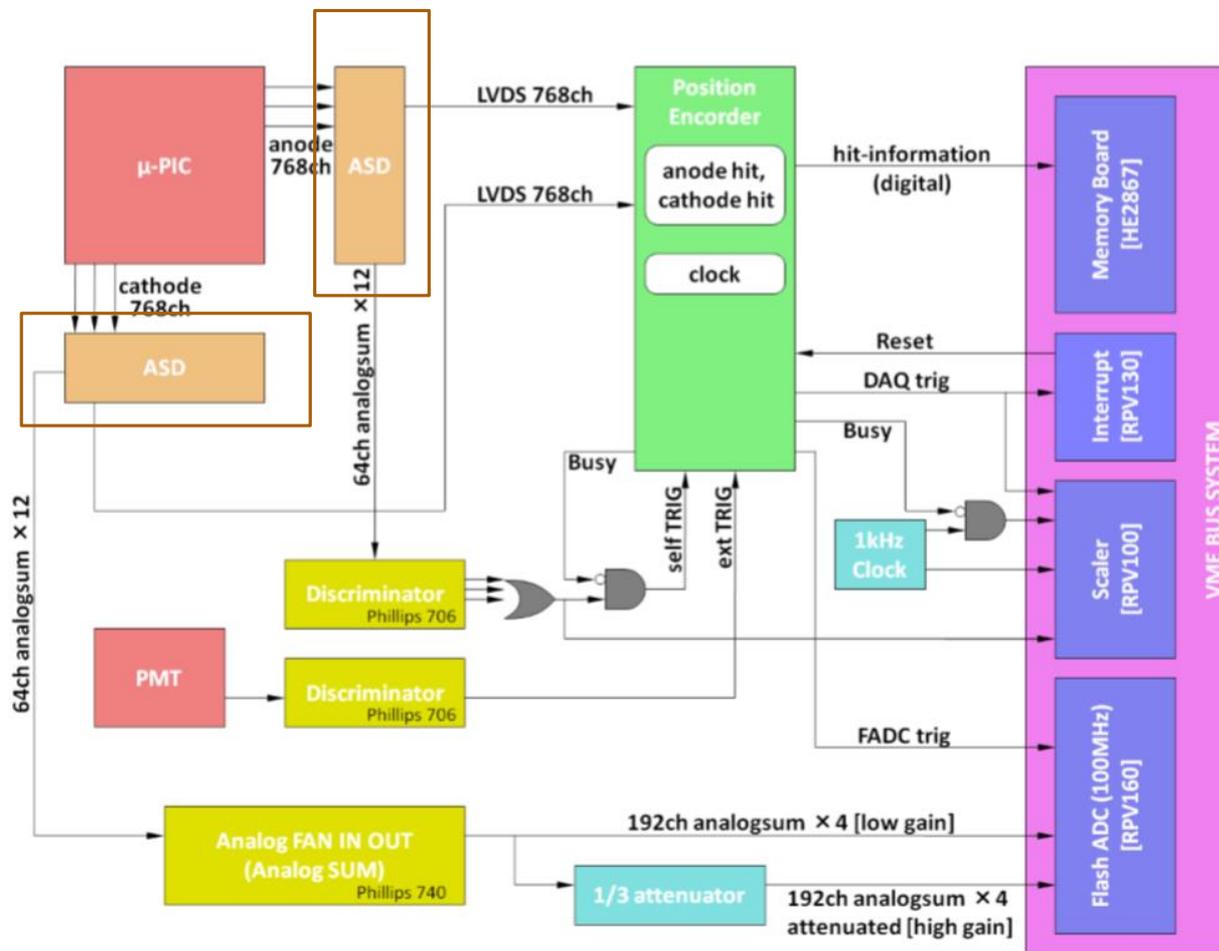


表 2.1 標的原子核ごとの J 、天然存在比、 $\lambda^2 J(J+1)$ の計算値 [69]。

元素	J	自然存在比 (%)	$\lambda^2 J(J+1)$	スピンの寄与する核子
^1H	1/2	100	0.750	proton
^7Li	3/2	92.5	0.244	proton
^{11}B	3/2	80.1	0.112	proton
^{15}N	1/2	0.4	0.087	proton
^{19}F	1/2	100	0.647	proton
^{23}Na	3/2	100	0.041	proton
^{127}I	5/2	100	0.007	proton
^{133}Cs	7/2	100	0.052	proton
^3He	1/2	1.0×10^{-4}	0.928	neutron
^{17}O	5/2	0.0	0.342	neutron
^{29}Si	1/2	4.7	0.063	neutron
^{73}Ge	9/2	7.8	0.065	neutron
^{129}Xe	1/2	26.4	0.124	neutron
^{131}Xe	3/2	21.2	0.055	neutron
^{183}W	1/2	14.3	0.003	neutron

SD の断面積は $\lambda^2 J(J+1)$ に比例



読み出した後ASDで処理

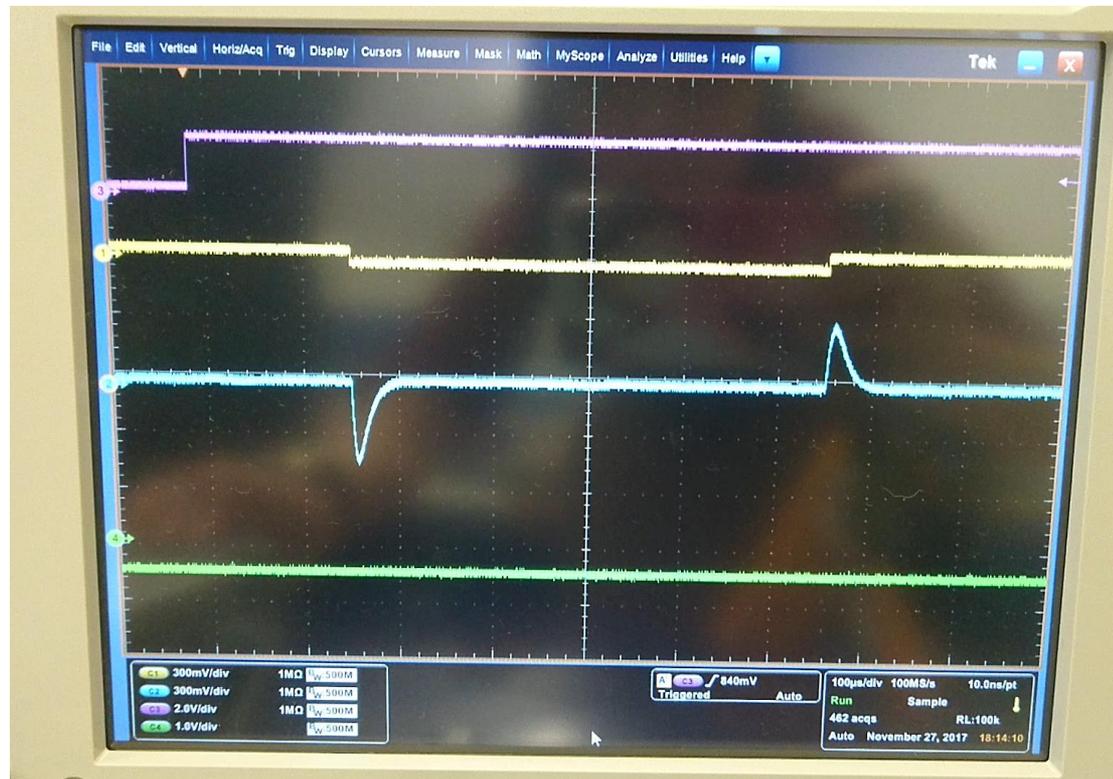
処理後は電荷情報と飛跡情報のみを残す。

飛跡情報にはToT(time over threshold)を用いる。

ToT = 波形が閾値を超えている時間

LTARS2016(評価)

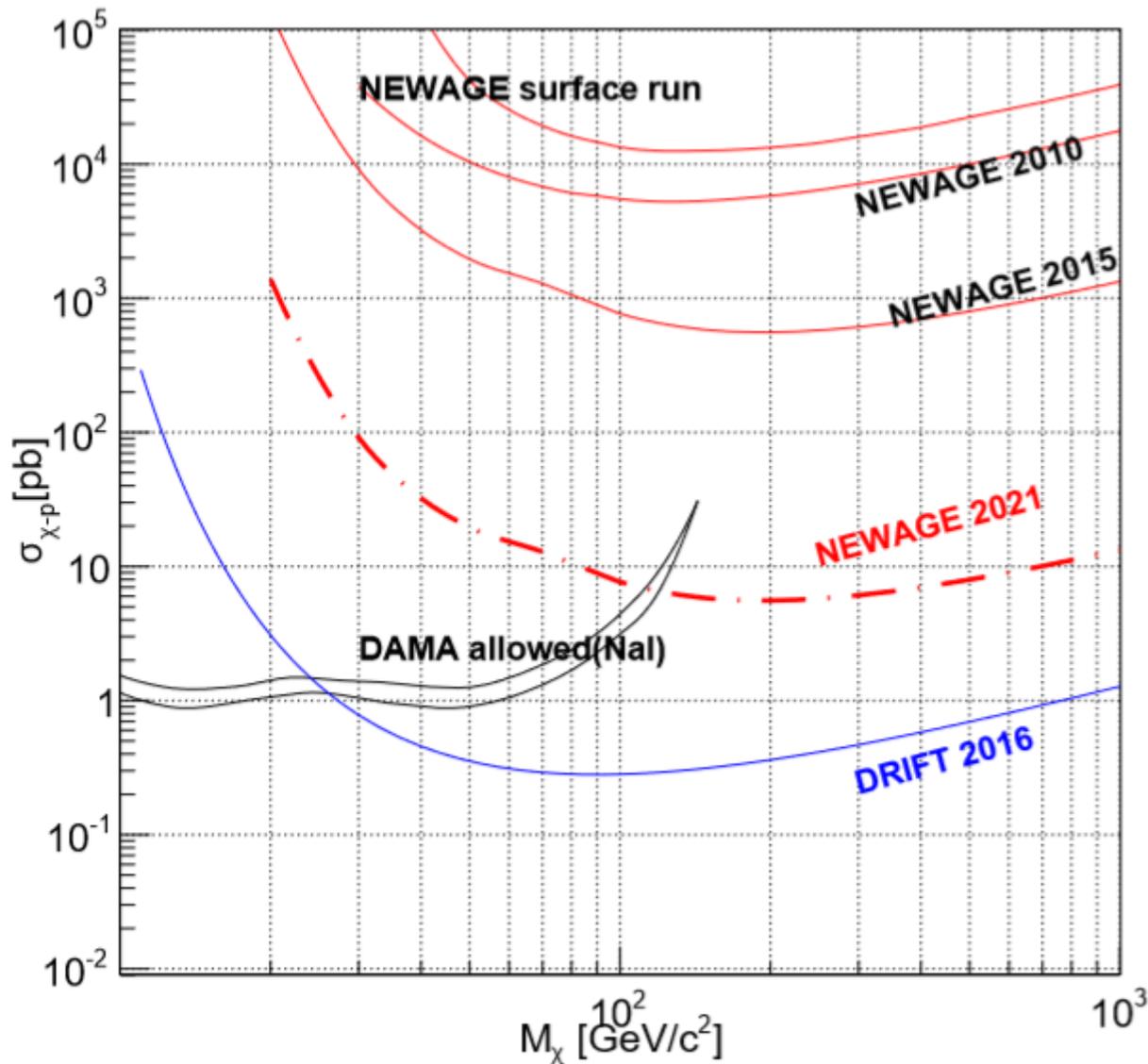
入力する信号を大きくしていったときにゲインがダイナミックに切り替わるかどうかを確認した。



黄色:入力
青色:出力

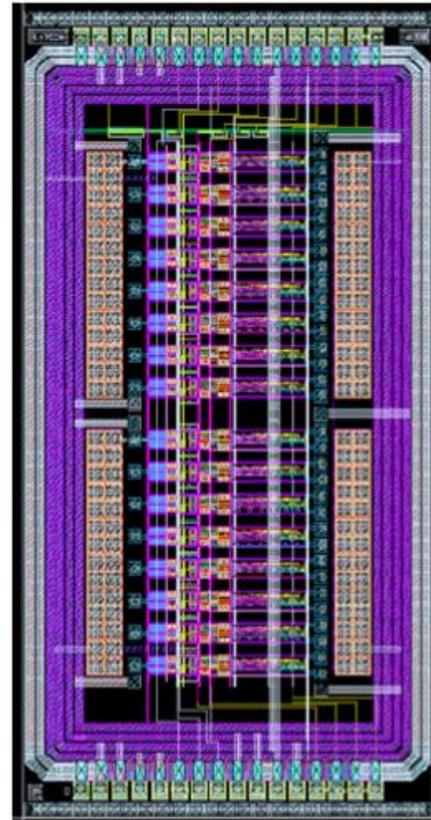
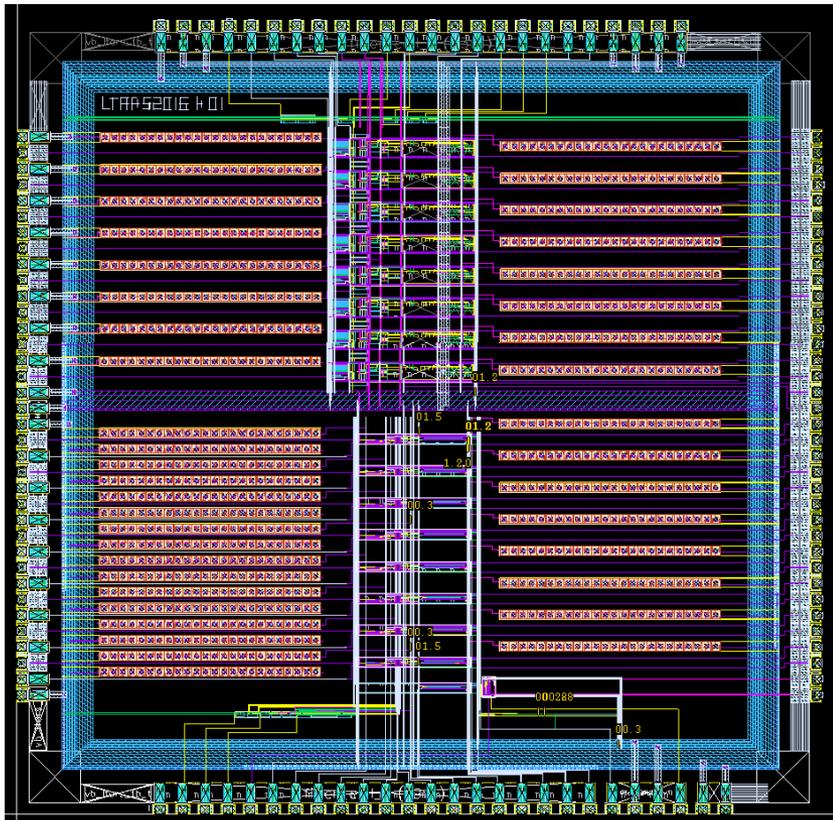
緑:
comparator

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



検出器容量(exposure)
100倍

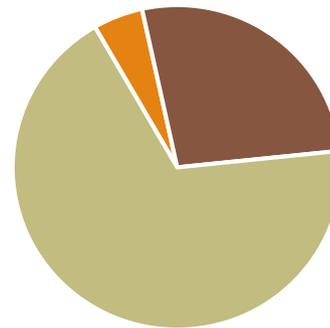
バックグラウンド
100分の一



暗黒物質とは

- ◆宇宙のさまざまな観測から存在することが予測されている謎の物質で、宇宙のエネルギーの約27%を占めていることがわかっている。
- ◆ほとんど物質と反応することがない。
- ◆現在の素粒子理論の枠組みを超えた粒子であるとされている。
- ◆暗黒物質の主要な候補とされているものとして**WIMPs**と呼ばれるものがある。

(Weakly Interacting Massive Particles)

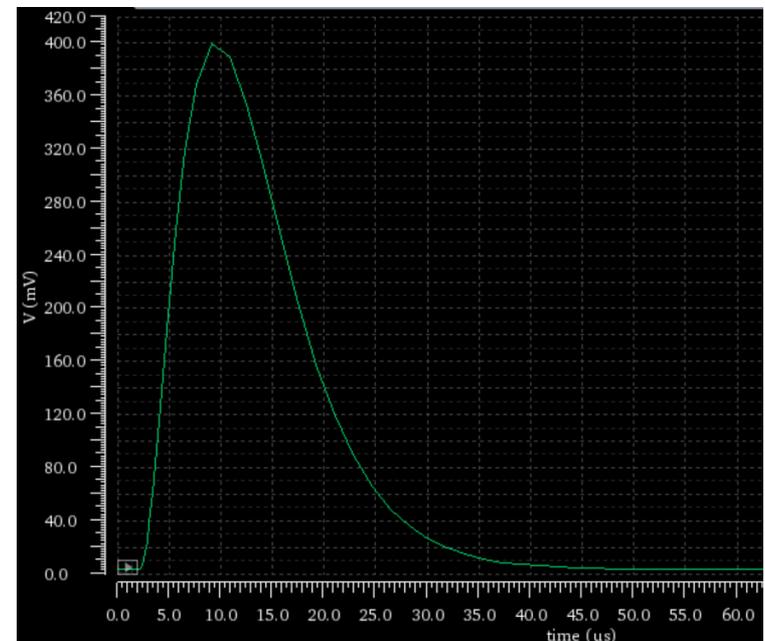
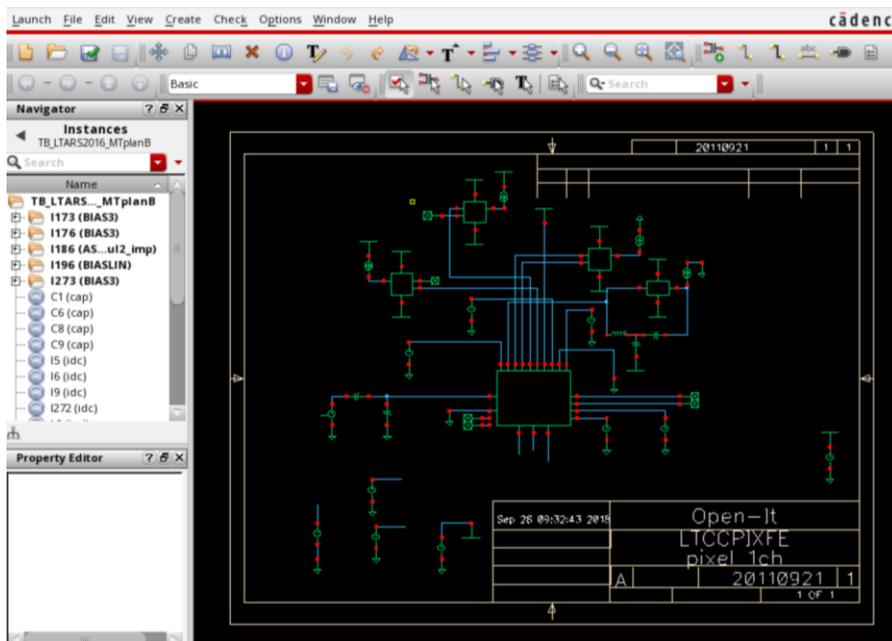


■普通の物質 ■暗黒物質 ■暗黒エネルギー

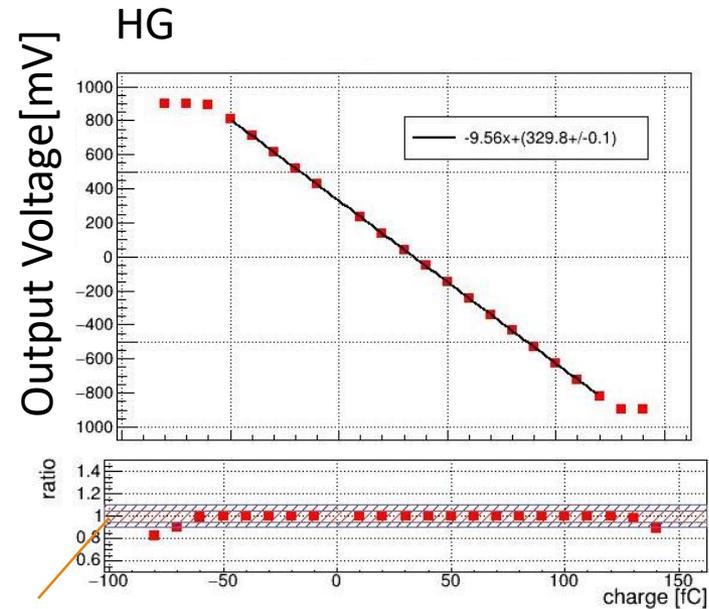
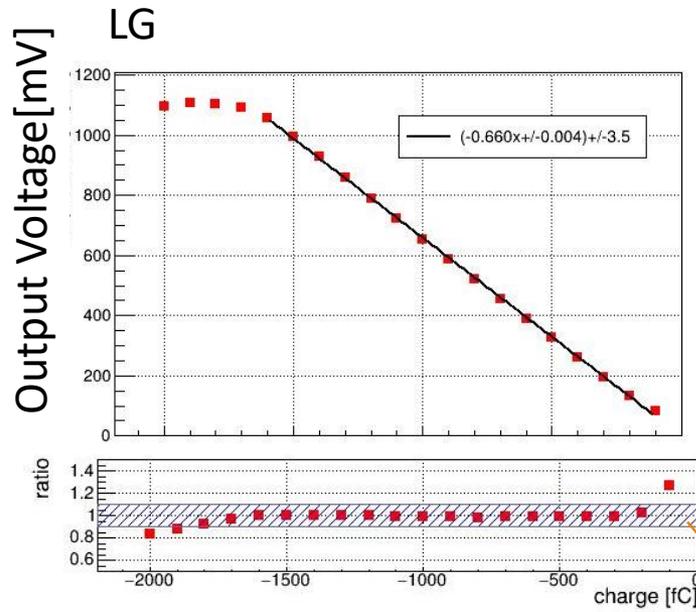
LTARS2018

KEKで設計されたチップに対してcadence社のvirtuosoというプラットフォームを用いた回路シミュレーションにより、性能評価を行っている。

virtuoso: シミュレーションからチップのレイアウトまで可能



LTARS2018 (デザインシミュレーション)



±10%

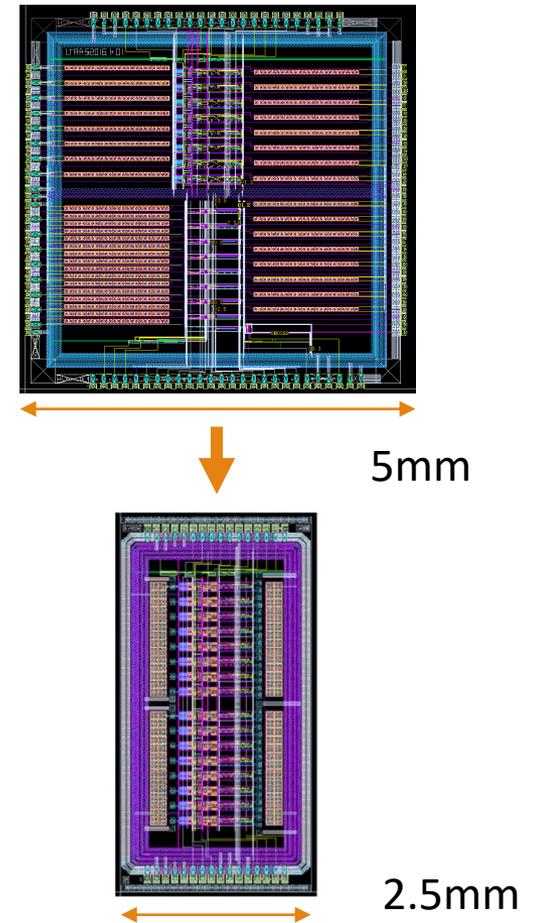
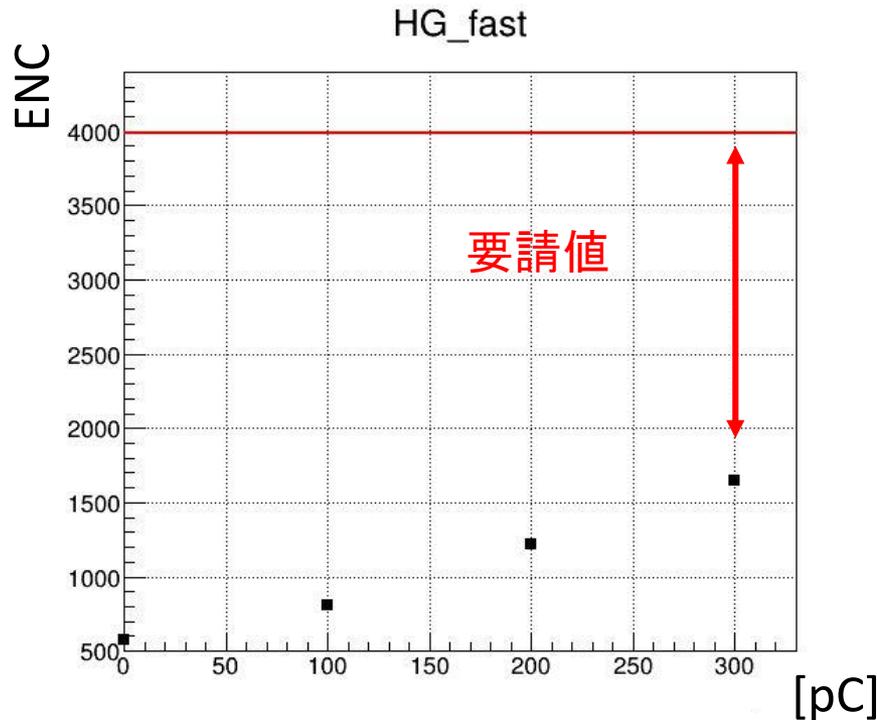
ゲイン 0.66 mV/fC
ダイナミックレンジ
2200fC

Ratio = 測定値 / フィット値

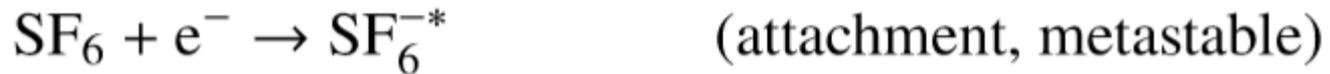
ゲイン 9.56 mV/fC
ダイナミックレンジ
-100fC ~ 100fC

→ダイナミックレンジも要請値を満たすことが確認された

LTARS2018 (デザインシミュレーション)



- ◆ ノイズも要請値を達成していることが確認された。
- ◆ レイアウト上での距離を短くし、シミュレーション上で予期せぬノイズも低減できるようにした。



The novel properties of SF6
for directional dark matter experiments
N.S.Phan et al 2017 JINST12 P02012

20Torr
58cm
1029V/cm

