

# 方向に感度を持つ暗黒 物質探索実験における 読み出し装置の開発

神戸大学大学院 粒子物理学研究室

中村拓馬

# 目次

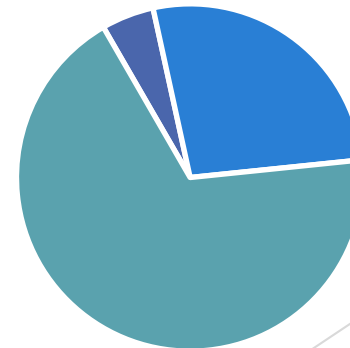
1. 暗黒物質とは
2. NEWAGE
3. NI $\mu$ TPC
4. LTARS2016 (評価)
5. LTARS2018 (デザインシミュレーション)
6. まとめ



# 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。

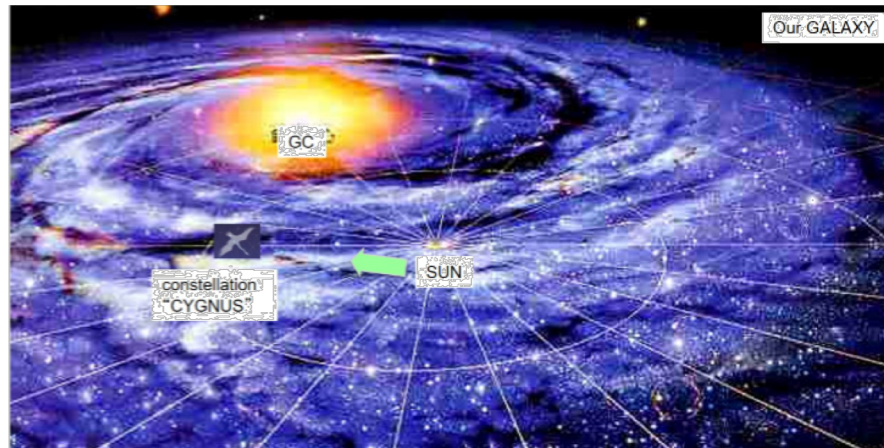
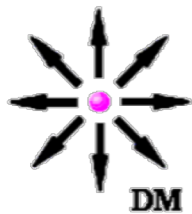
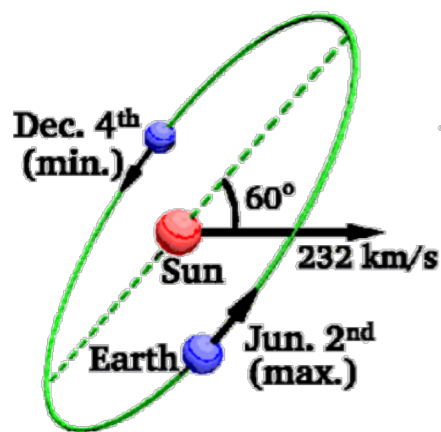
(Weakly Interacting Massive Particles)



■ 普通の物質 ■ 暗黒物質 ■ 暗黒エネルギー

# NEWAGE

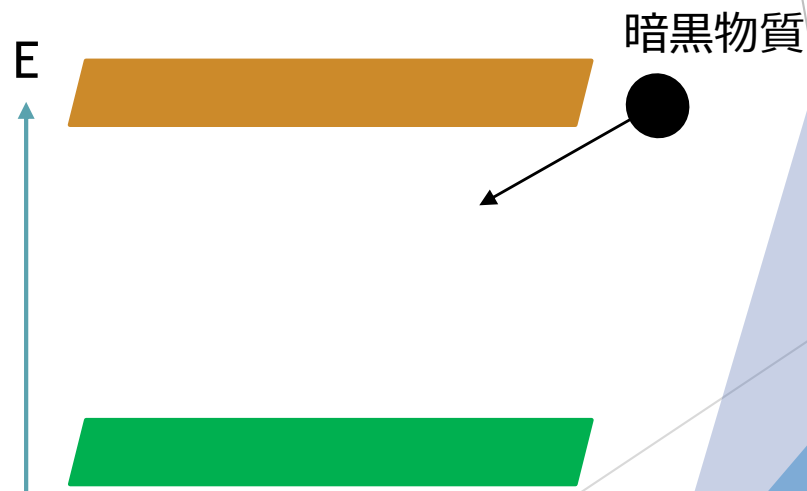
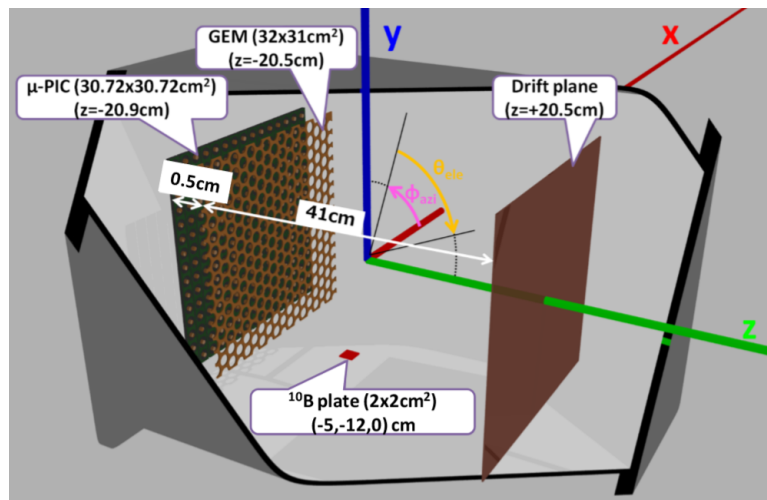
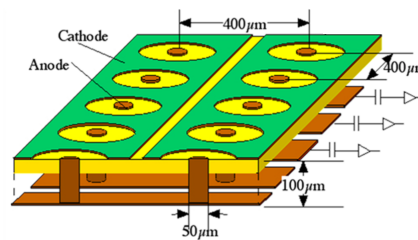
- ◆ NEWAGE( NEw general WIMP search Advanced Gaseous tracker Experiment ) は3次元飛跡検出器 $\mu$ TPCを用いた、到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験である。
- ◆ 暗黒物質によって反跳された原子核の飛跡を検出することで「**暗黒物質の風**」をとらえる。





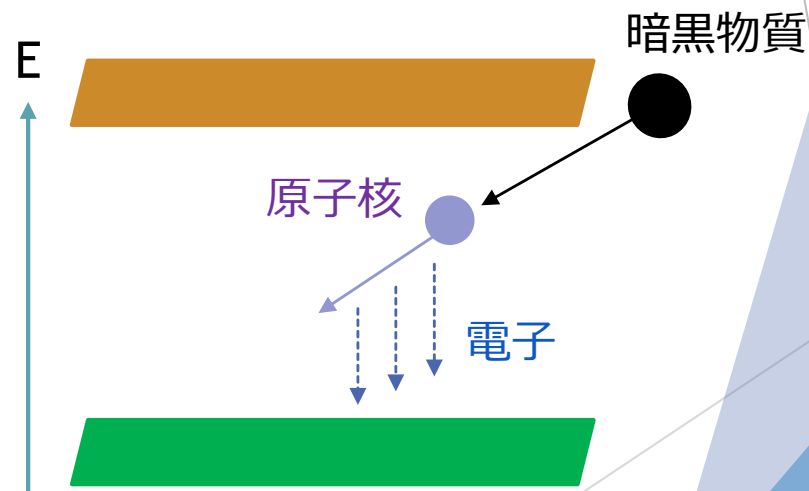
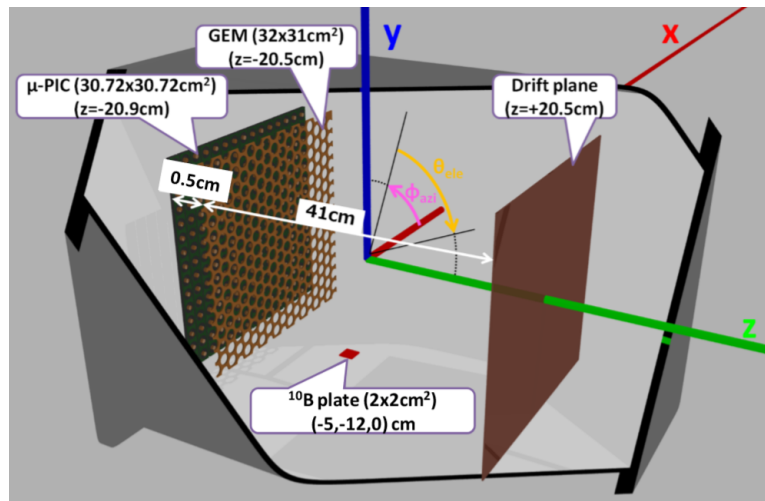
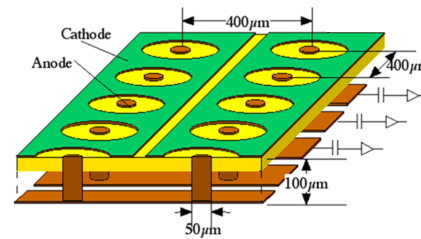
# NEWAGE

- ◆ 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 $\mu$ -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 $\text{CF}_4$ を低圧で使用。



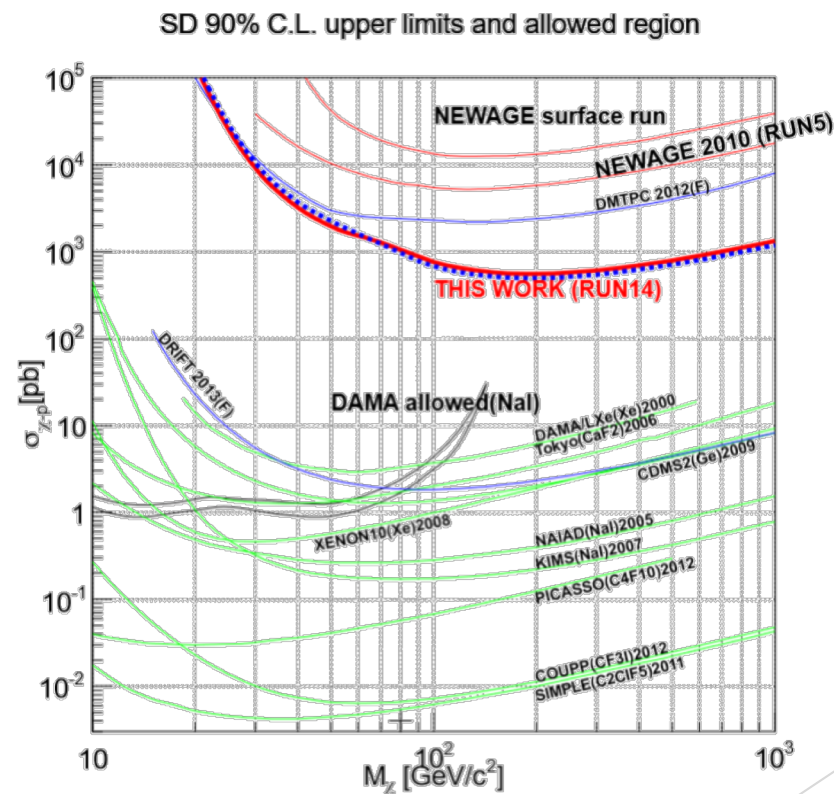
# NEWAGE

- ◆ 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 $\mu$ -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 $\text{CF}_4$ を低圧で使用。



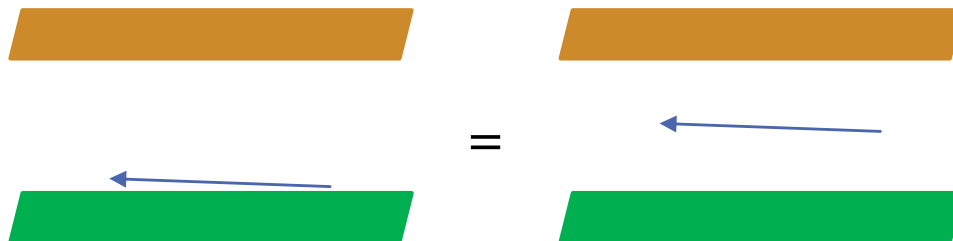
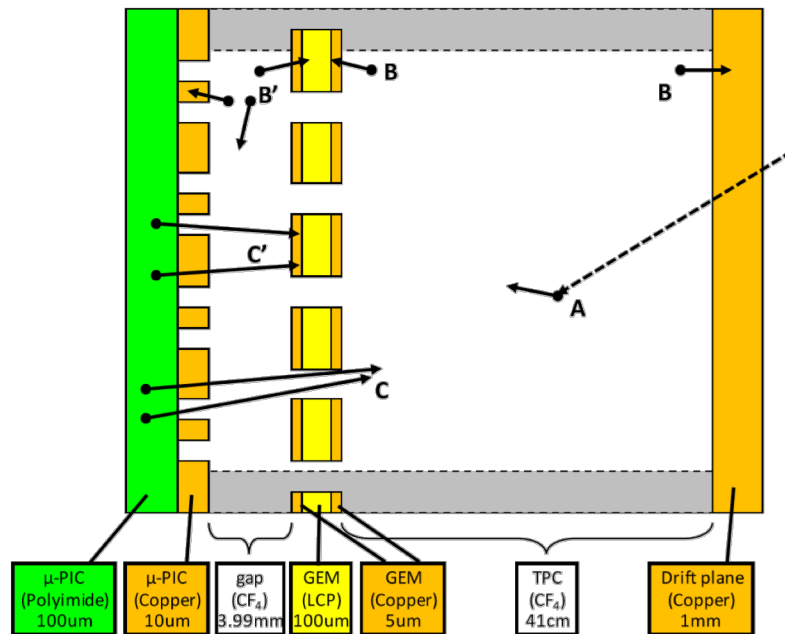
# NEWAGE

- ◆ 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。



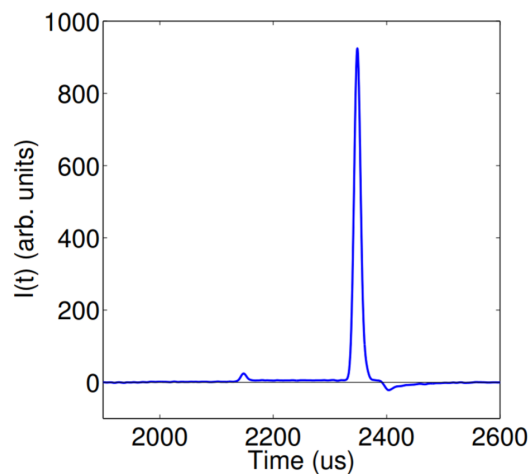
# NEWAGE

- ◆ 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 $\mu$ -PIC由来の $\alpha$ 線であると理解された。
- ◆ 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方向に対しては絶対値を得ることはできない。



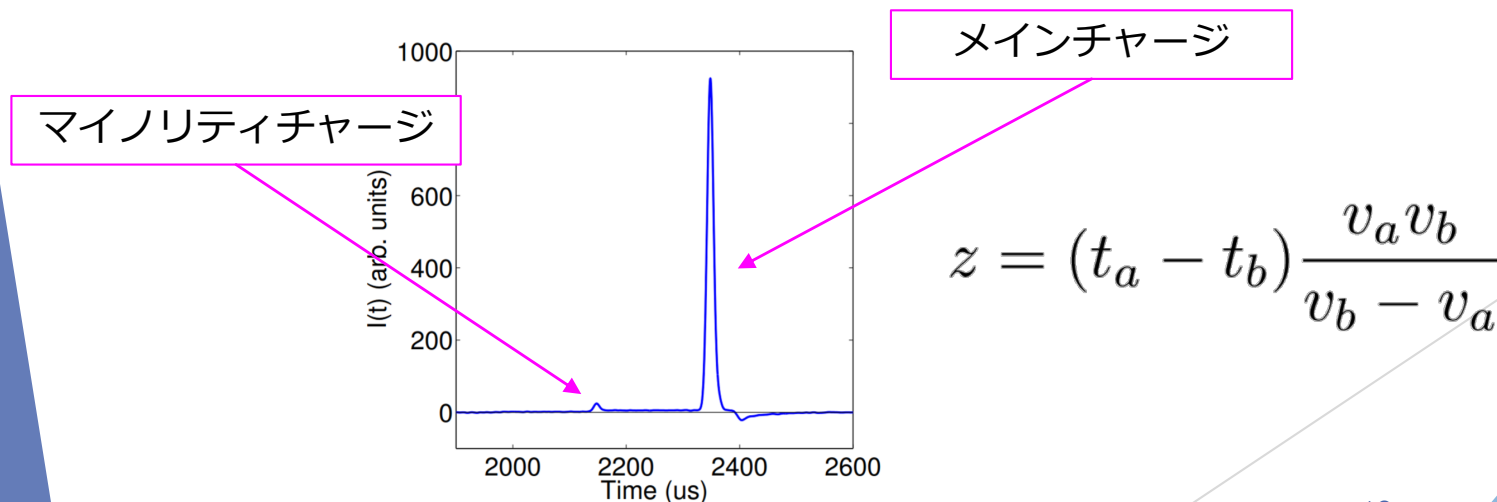
# NI $\mu$ TPC

- ◆ BGを特定・除去するためにNI $\mu$ TPC(Negative Ion micro time projection chamber)を開発中。
- ◆ NI $\mu$ 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。
- ◆ SF<sub>6</sub>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 $\mu$ TPC

- ◆ BGを特定・除去するためにNI $\mu$ TPC(Negative Ion micro time projection chamber)を開発中。
- ◆ NI $\mu$ 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。
- ◆ SF<sub>6</sub>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。



# LTARS2016

- ◆ NI $\mu$ 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ASIC(LTARS2016\_K01)が先行研究によりKEKと共同で開発された。

# LTARS2016

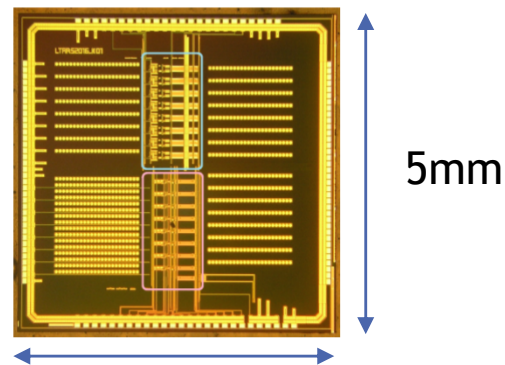
- ◆ NI $\mu$ TPCを実現するためには
  1. 陰イオンをドリフトさせるため時定数大きい
  2. マイノリティチャージとメインチャージ同時検出のためにダイナミックレンジ大きい

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ASIC(LTARS2016\_K01)が先行研究によりKEKと共同で開発された。

ASIC (Application specified integrated circuit)

= 小面積で多チャンネルの読み出しが可能なICチップ





# LTARS2016

- ◆ LTARS2016\_K01ではダイナミックレンジを大きくとるためにLGとHGという増幅率の異なる回路を実装している。

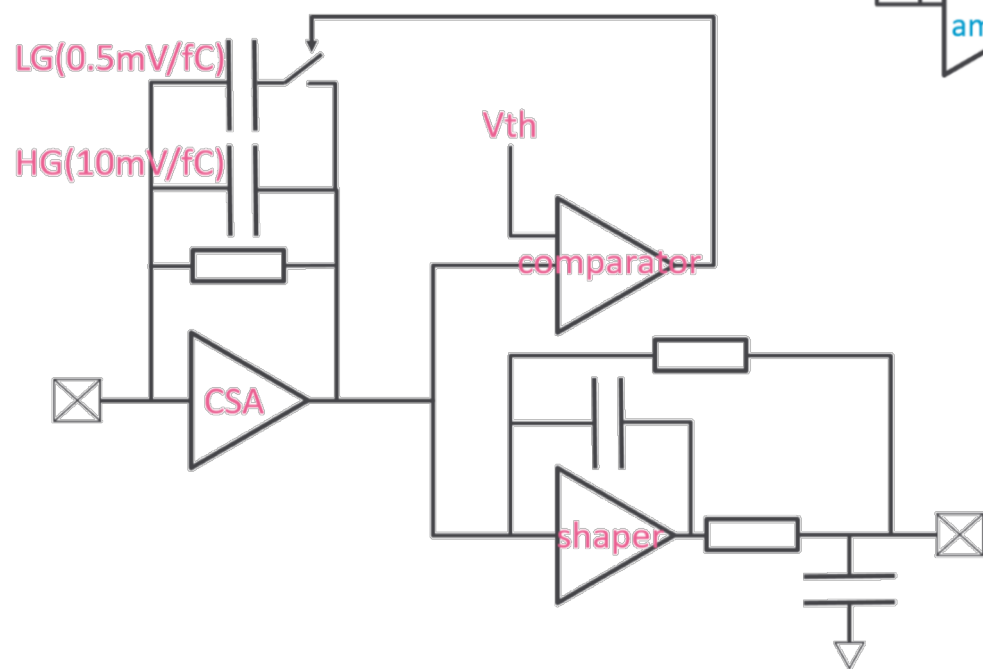
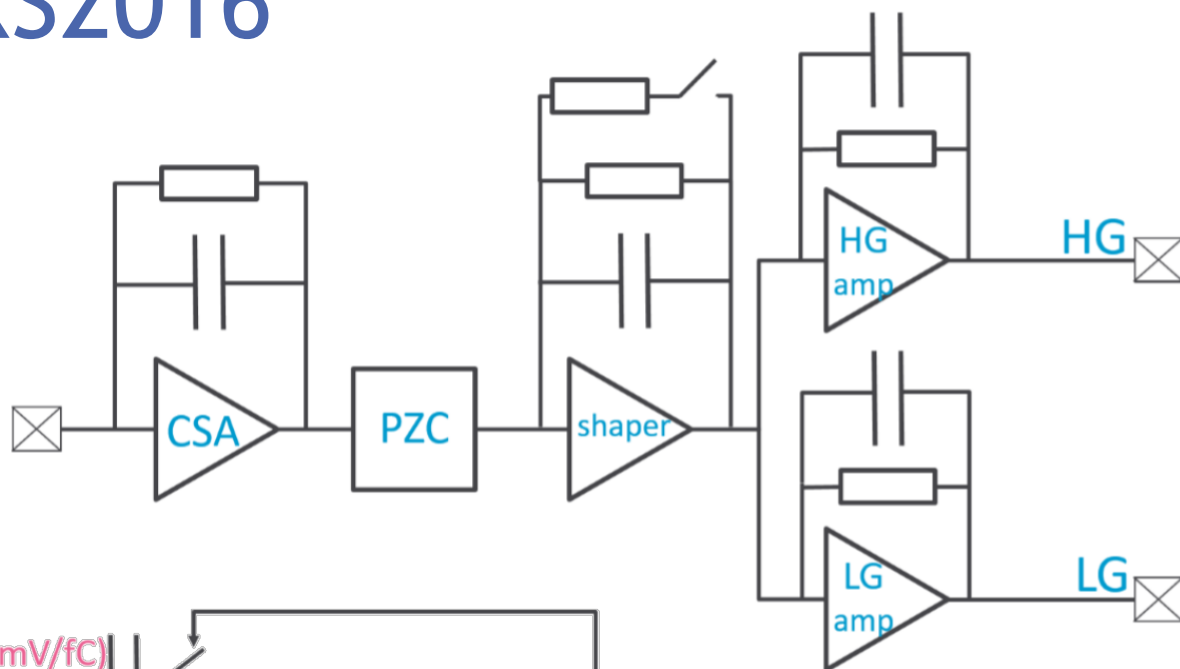
	High Gain (マイノリティチャージ)	Low Gain (メインチャージ)
最小信号	3fC	100fC
ENC	<2000(0.3fC)	<6.4×10 <sup>4</sup> (10fC)
ダイナミックレンジ	-80fC~80fC	-1600fC~1600fC
ゲイン	10mV/fC	0.5mV/fC
時定数	4μs	4μs

## LTARS2016 要請値

- ◆ 設計思想の異なる2つの回路を搭載している。
  1. **MT 回路** 1つの入力に対しHG・LG2つの出力
  2. **TK 回路** 入力の大きさに応じてゲインがダイナミックに切り替わる

# LTARS2016

MT回路



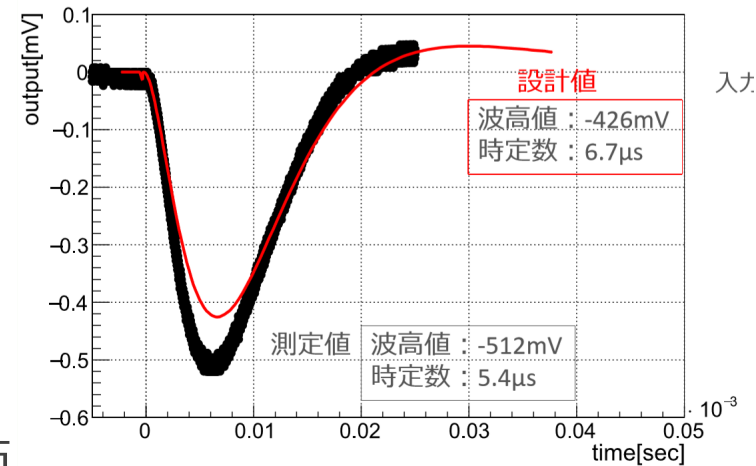
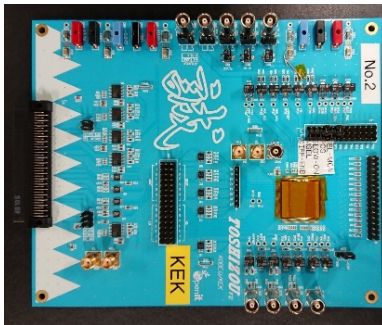
TK回路

LG(0.5mV/fC)

HG(10mV/fC)

# LTARS2016 (評価)

- ◆ チップ単体では評価できないためテストボードを用いて評価を行う。



- ◆ 先行研究による性能評価

	High gain		Low gain	
ENC	<2000	○	<6.4×10 <sup>4</sup>	○
ダイナミックレンジ	-80fC~80fC	○	-1600fC~1600fC	○
ゲイン	10mV/fC	○	0.5mV/fC	○
時定数		4μs		○

○ MT回路の達成項目      ○ TK回路の達成項目

# 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。

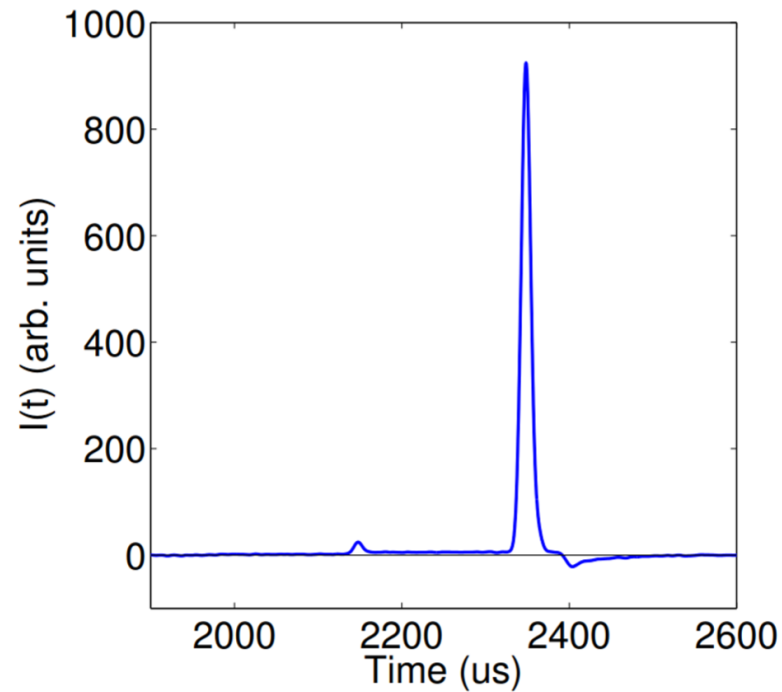


黄色 : 入力  
青色 : 出力

緑 :  
comparator

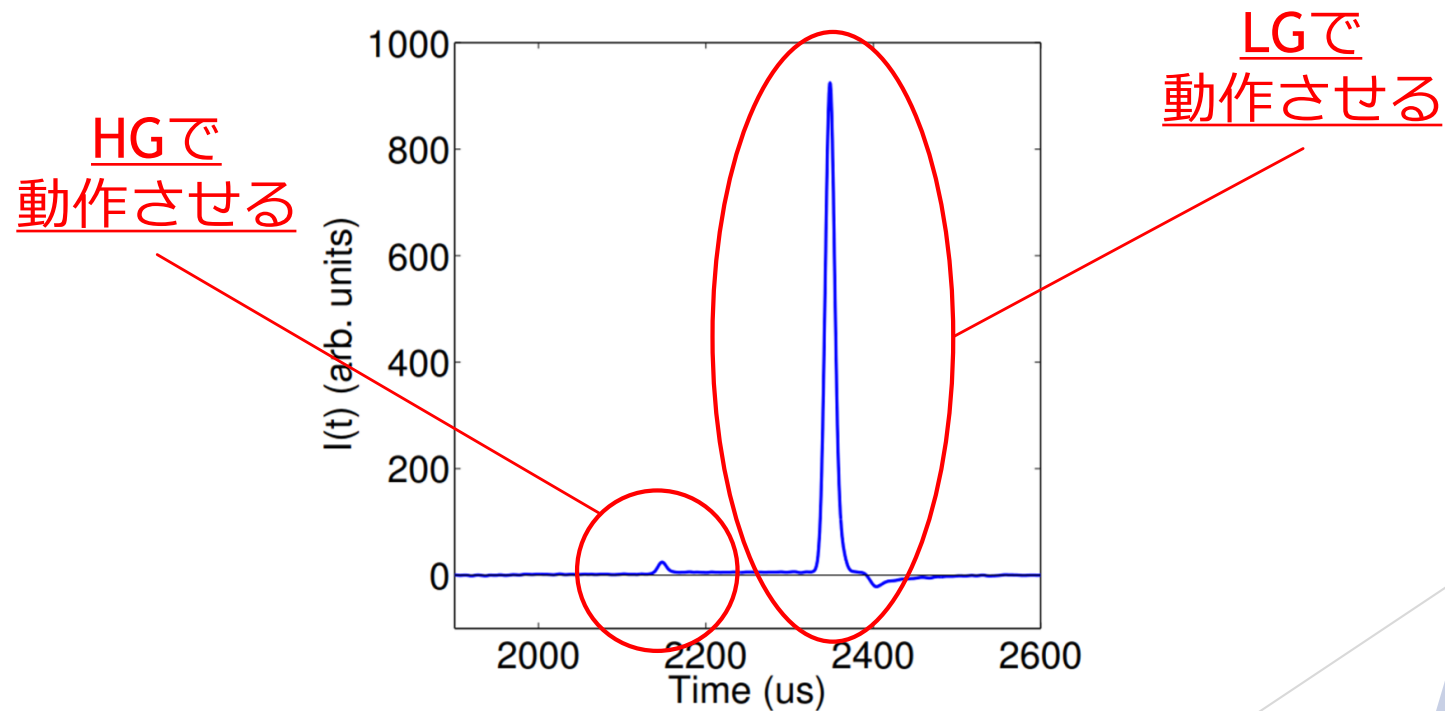
# LTARS2016 (評価)

- ◆ 先行研究では確かめられていなかった、実際にマイノリティーチャージを測定することを想定した試験を行った。



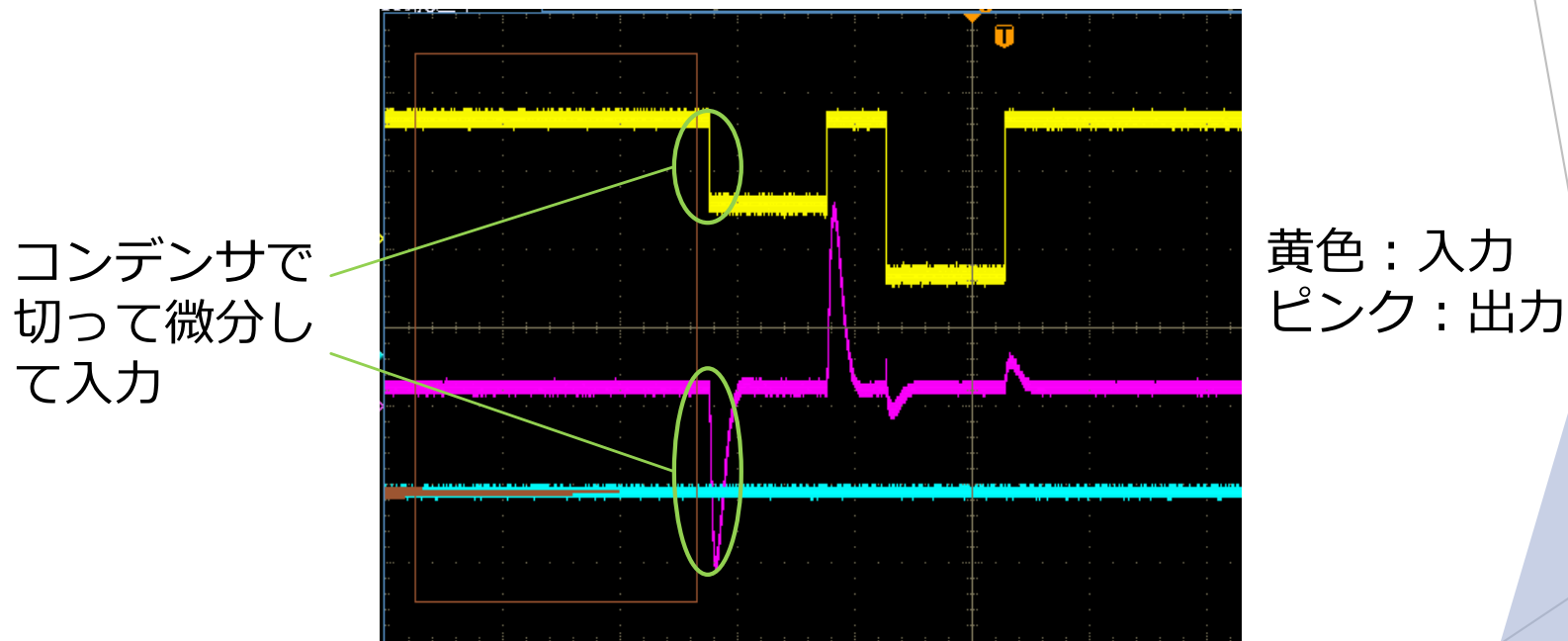
# LTARS2016 (評価)

- ◆ 先行研究では確かめられていなかった、実際にマイノリティーチャージを測定することを想定した試験を行った。



# LTARS2016 (評価)

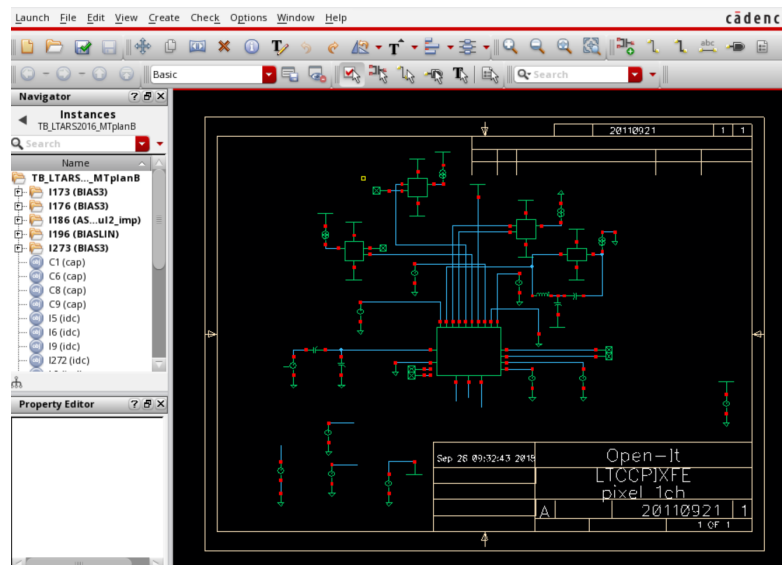
- ◆ 先行研究では確かめられていなかった実際にマイノリティーチャージを測定することを想定した試験を行った。



→入力では2つ目の方が大きいのにに対し、出力では1つ目の方が大きくなっている！

# LTARS2018

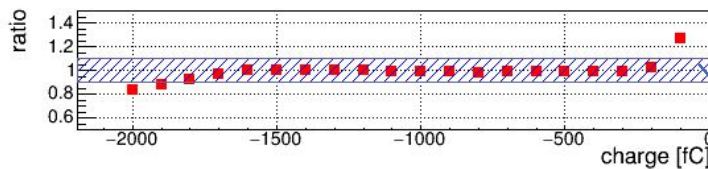
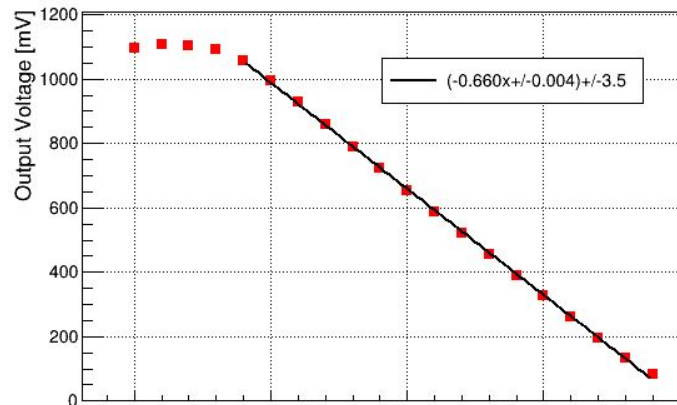
- ◆ LTARS2016ではENC、ダイナミックレンジといったいくつかの要請値を達成することができなかった。
- ◆ 現在、新たなASIC(LTARS2018\_K06)を開発中である。
- ◆ KEKで設計されたチップに対してケイデンス社のvirtuosoというプログラムを用いたシミュレーションにより、性能評価を行っている。



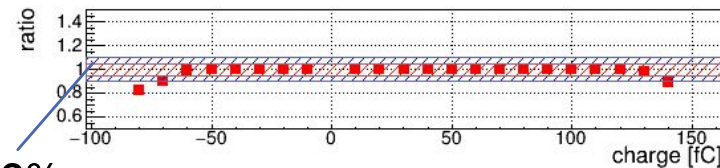
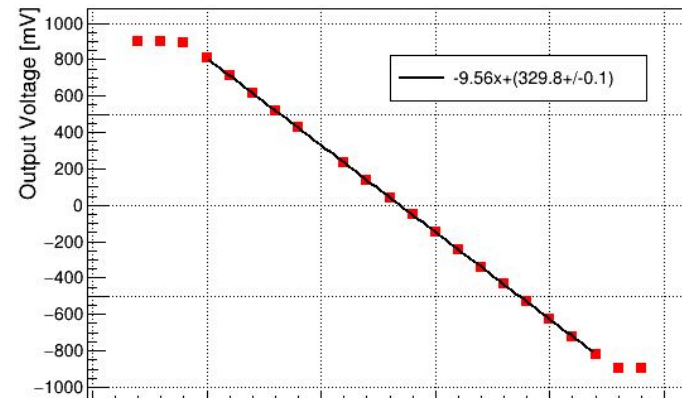


# LTARS2018 (デザインシミュレーション)

LG



HG



±10%

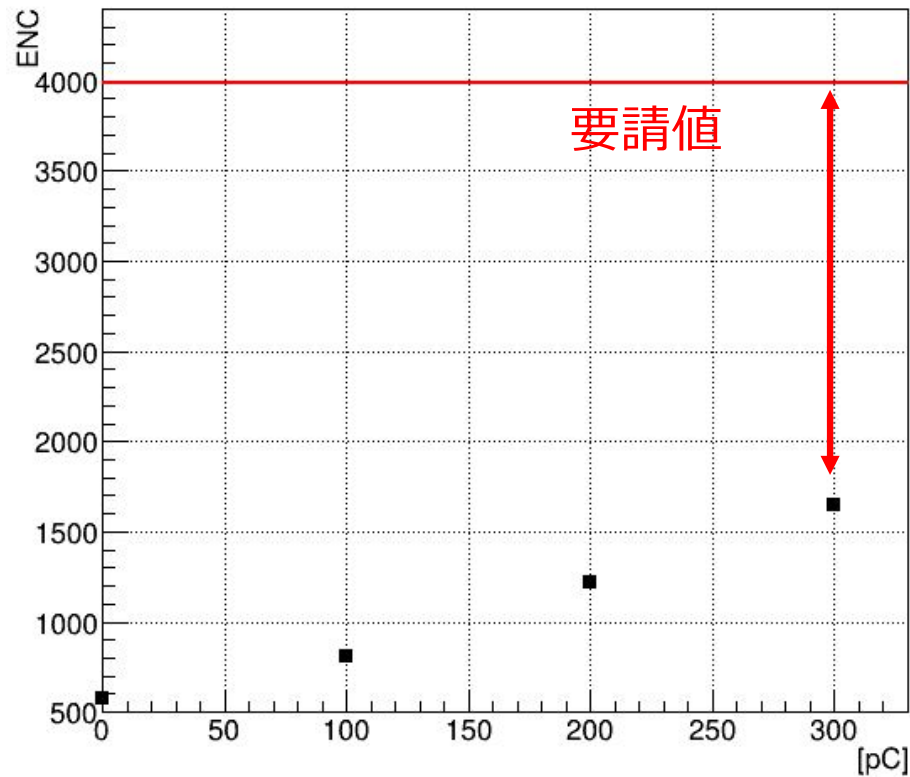
Ratio = 測定値 / フィット値

ゲイン 0.66 mV/fC  
ダイナミックレンジ  
2200fC

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

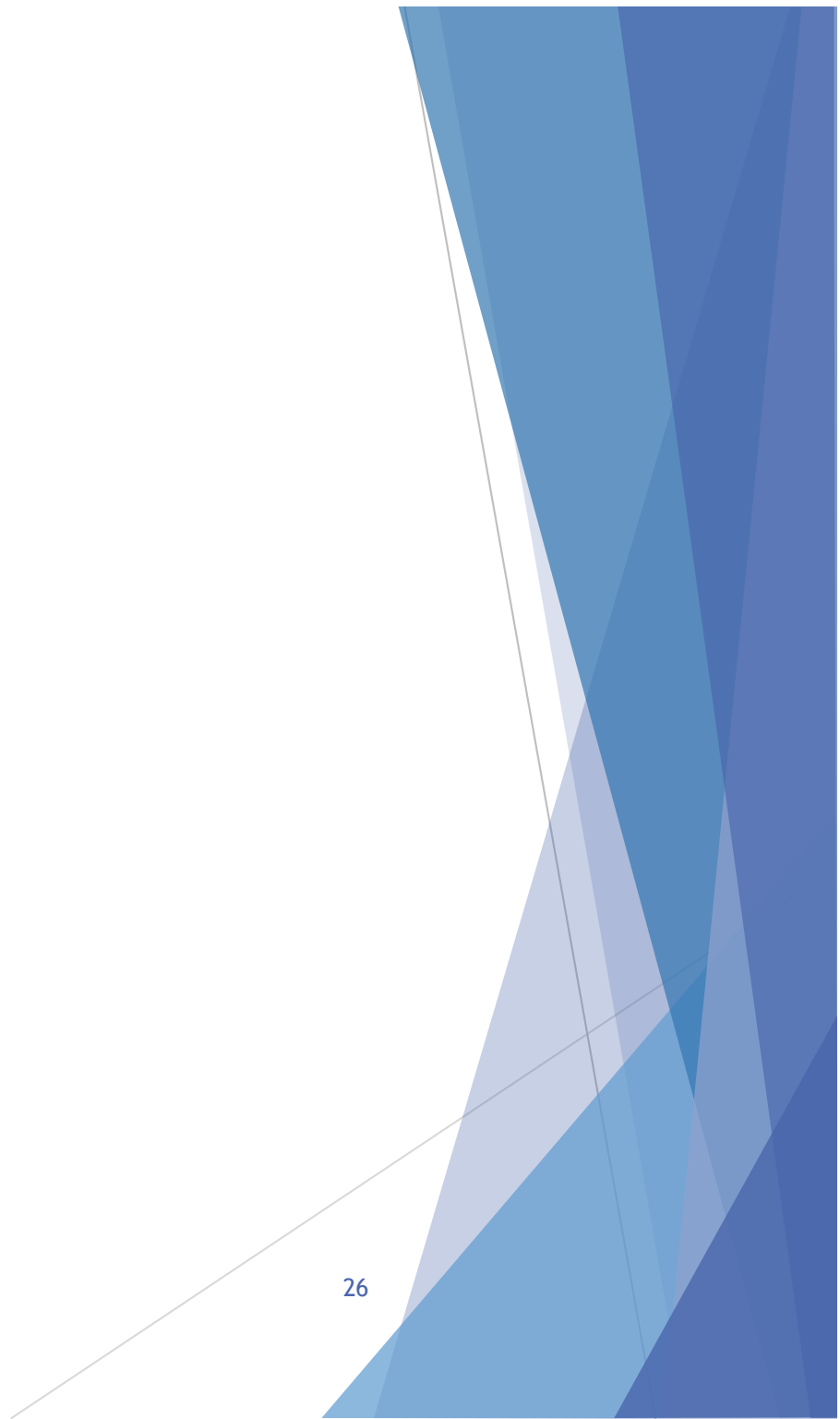
# LTARS2018 (デザインシミュレーション)



- ◆ 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。

# まとめ

- ◆ LTARS2016を用いてダイナミックレンジの切り替えができることが確認された。
- ◆ LTARS2018について性能評価を行い、要請値を満たすことが確認された。  
→今後、テストボードを設計し動作確認を行っていく。
- ◆ 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。



# 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

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

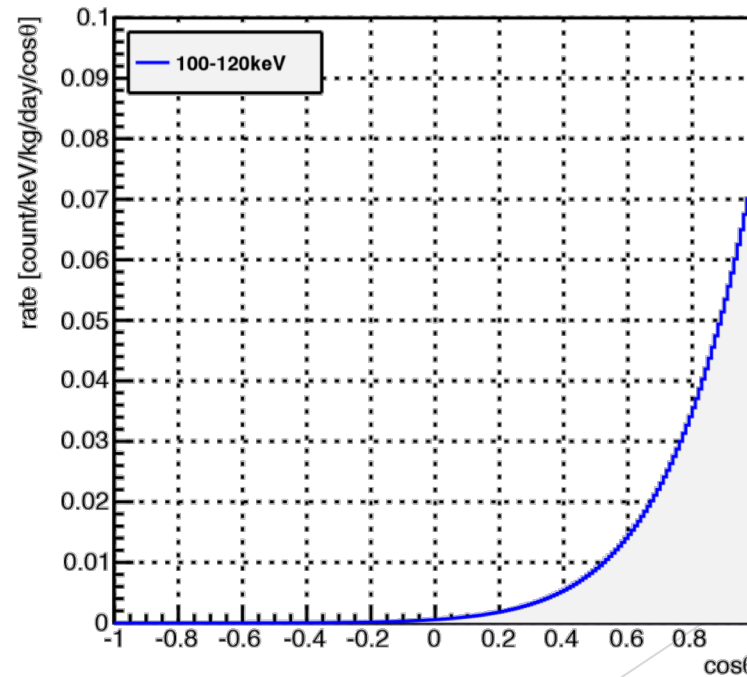
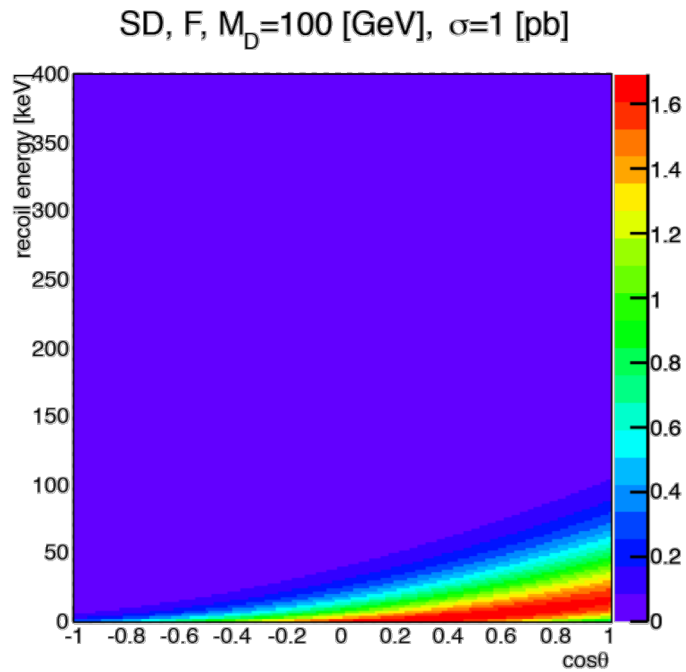
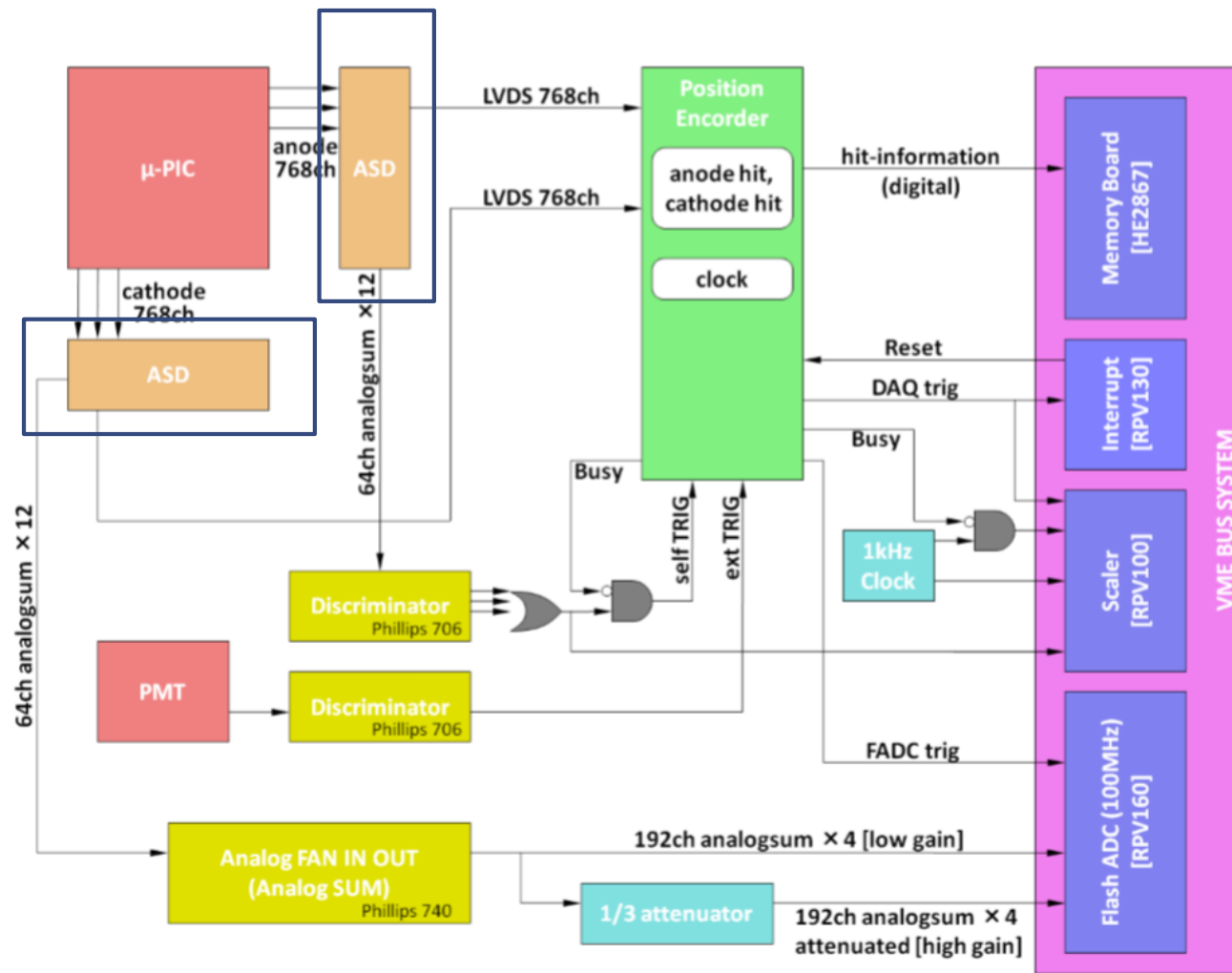


表 2.1 標的原子核ごとの  $J$ 、天然存在比、 $\lambda^2 J(J+1)$  の計算値 [69]。

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