

SRS/APV25 を利用したTPC X線偏光計の開発と 偏光観測に最適な APV 25設定の調査

武田 朋志
(東理大/理化学研究所)

岩切渉³, 内山慶祐^{1,2}, 榎戸輝揚⁴, 大久保美穂^{1,2}, 北口貴雄², 周圓輝^{1,2},
玉川徹¹, 堤まりな^{1,2}, 早藤麻美⁶, 吉田勇登^{1,2}, 佐藤宏樹^{2,5}

1. 東理大 2. 理研 3. 中央大 4. 京都大 5. 芝浦大 6. JAXA

宇宙X線偏光観測

- これまで宇宙X線偏光はほぼ未検出

- 軟X線帯域では一例のみ
 - > OSO-8/ブラッグ偏光計 (1976年)

- IXPE 衛星 (2021年 ~)

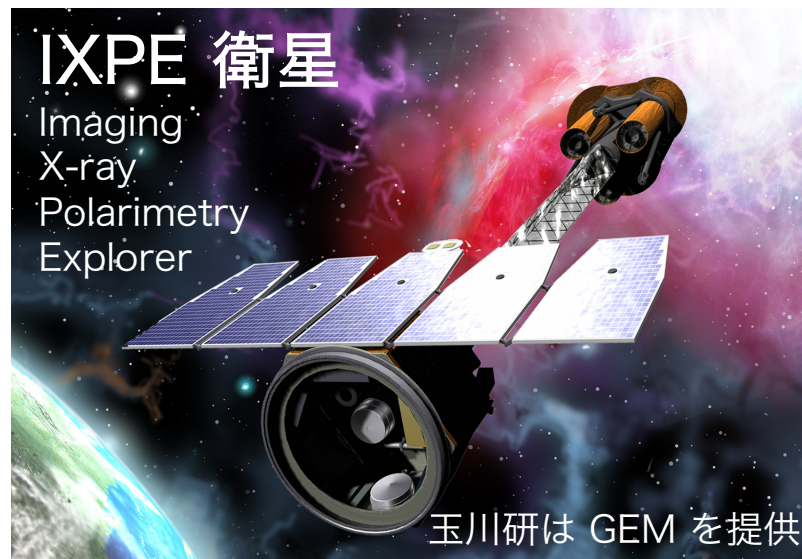
- 世界初の高感度X線偏光観測衛星
- 検出効率：4 keV 以上で 5 % 以下

- 理研の偏光計開発実績

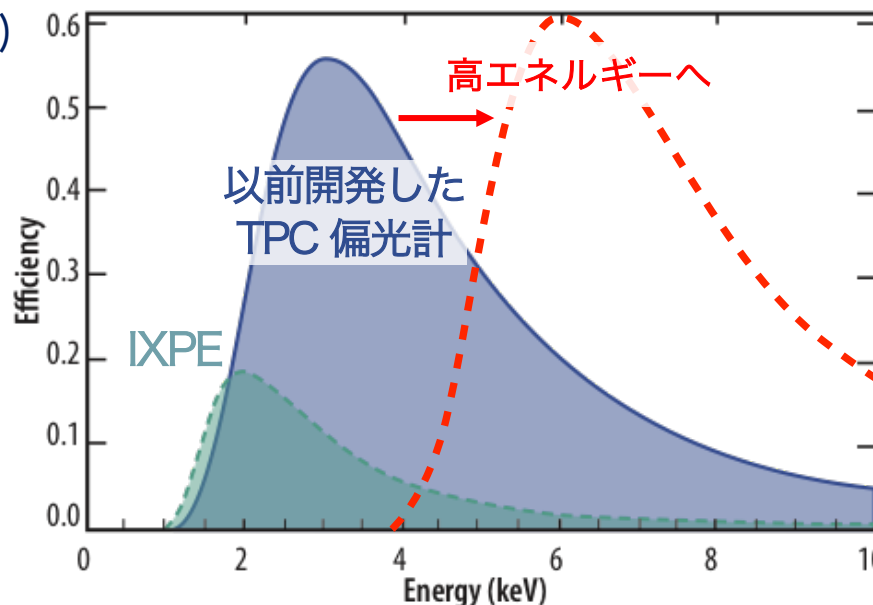
- 2-10 keV 観測用 TPC 偏光計 (Iwakiri +17)

本研究の目的

- より高エネルギーに感度を持つ
TPC 偏光計の開発
- 偏光検出性能向上のための読み出し
システムの調整



検出効率の比較

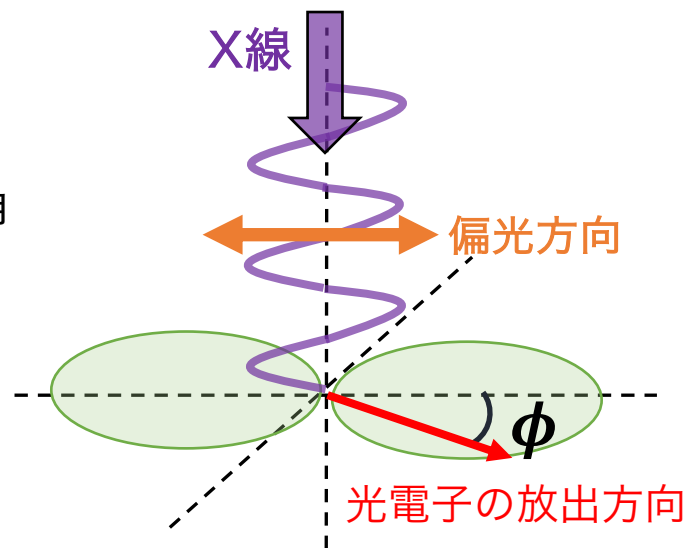


光電効果を利用した偏光の検出原理

• 光電子の放出角度分布

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \cos^2 \phi \quad \phi : \text{偏光方向からの方位角}$$

- 各イベントの ϕ を求めて角度分布を作成
- 角度分布を元に偏光角、偏光度を推定

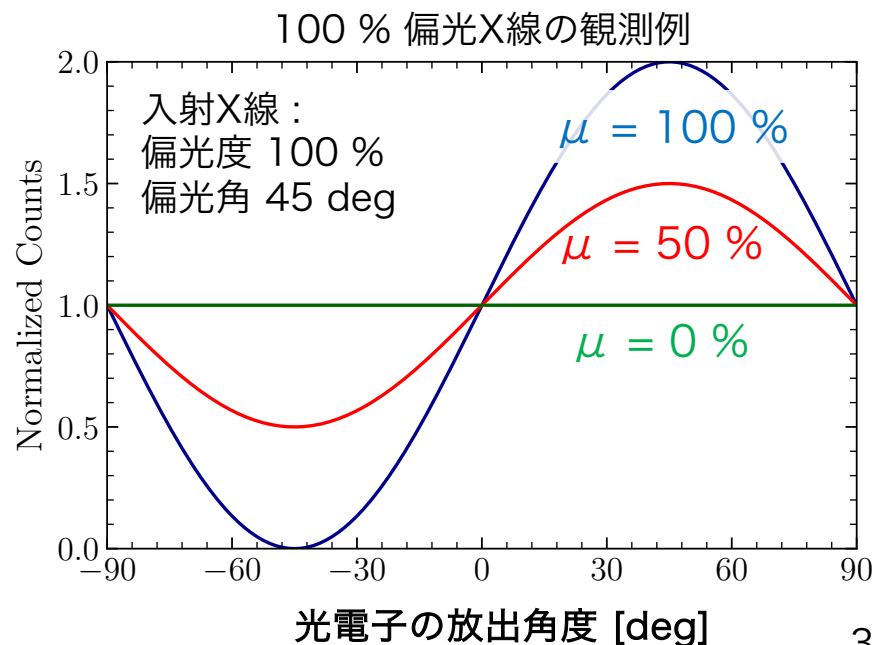


モジュレーションカーブ (MC)

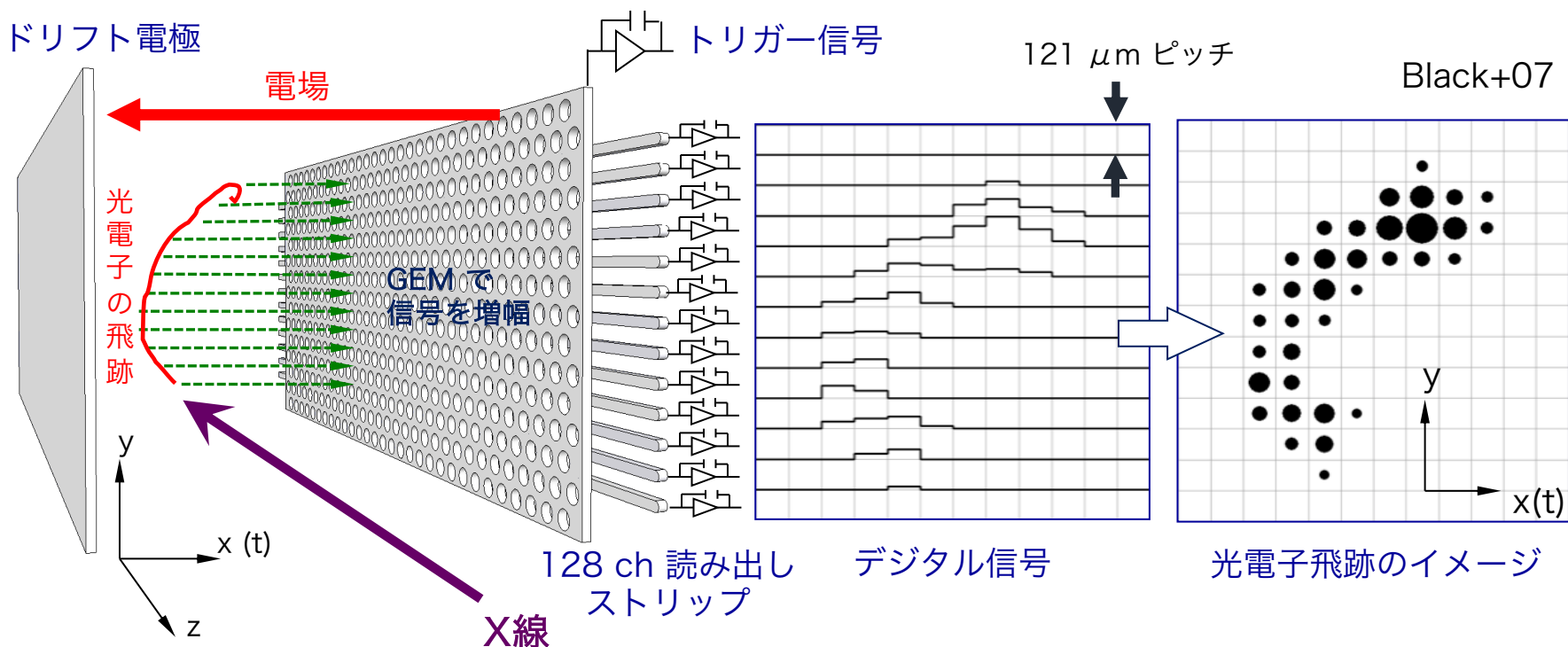
$$MC(\phi) = \underbrace{C}_{\text{オフセット}} \left[1 + \frac{\mu}{100} \cos 2(\phi - \underbrace{\phi_{\text{peak}}}_{\text{X線の偏光角}}) \right]$$

• 偏光計の変調因子 μ

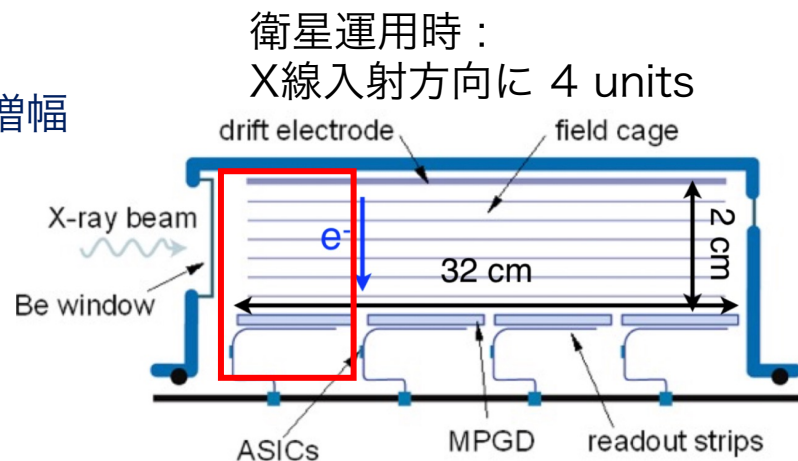
- 100 % 偏光したX線に対する偏光検出性能



TPC 偏光計

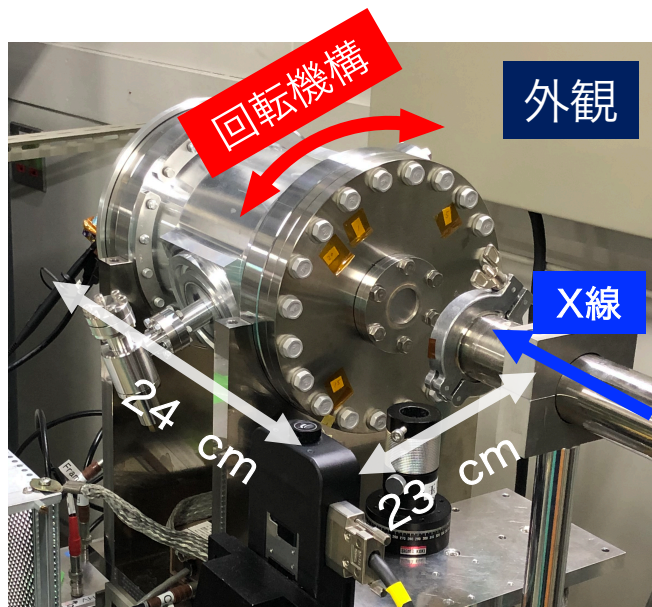


- 光電子の飛跡に沿って一次電子が生成 > GEM で増幅
- 信号を 128 ch のストリップで 1次元読み出し
- トリガーは GEM カソード信号から生成
- TPC 技術を利用により、2次元の飛跡画像を取得
- 飛跡画像から光電子放出方向を推定



我々は 1 unit を製作

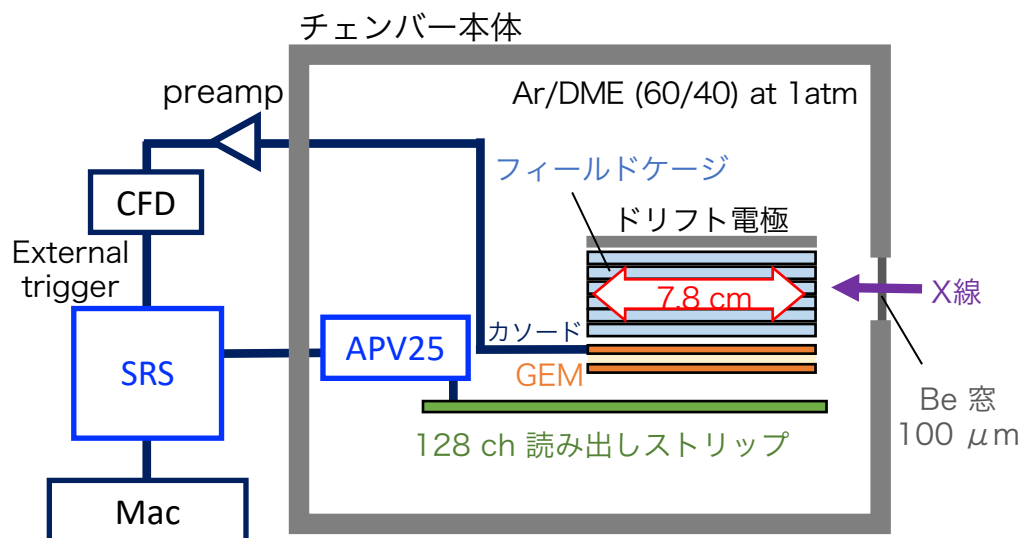
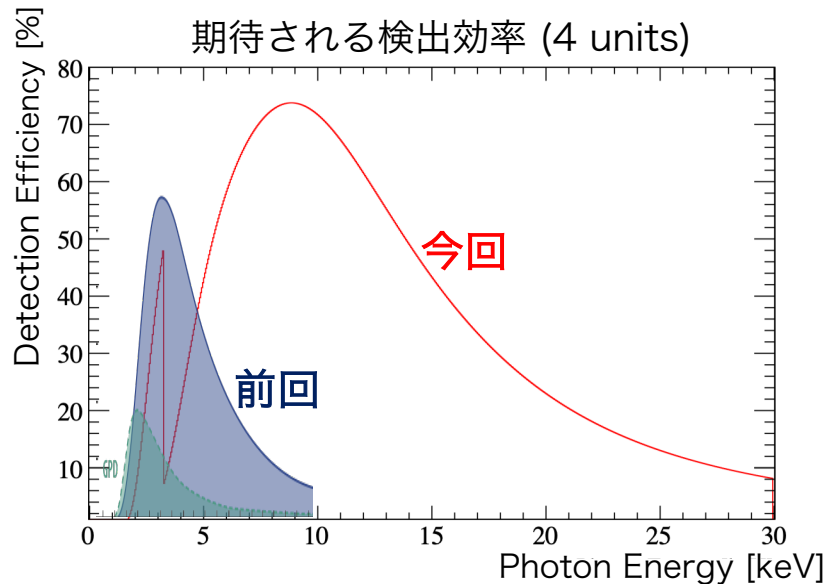
高エネルギーX線に感度もつ TPC 偏光計の開発



・開発したTPC 偏光計の仕様

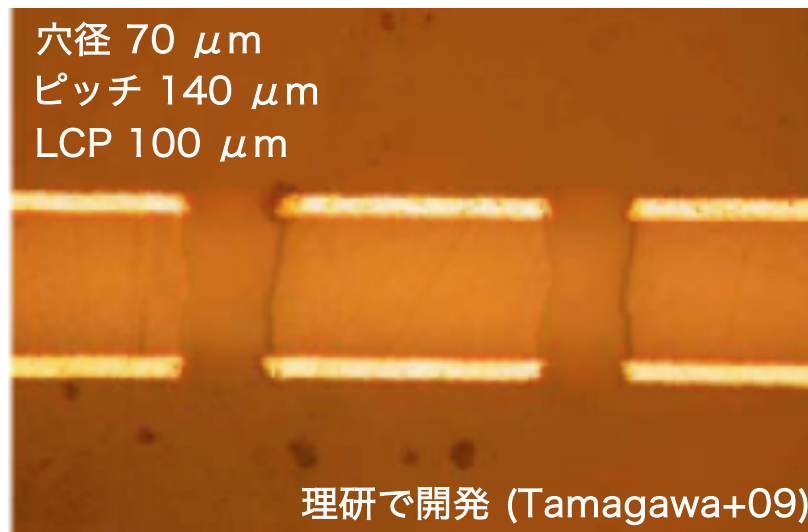
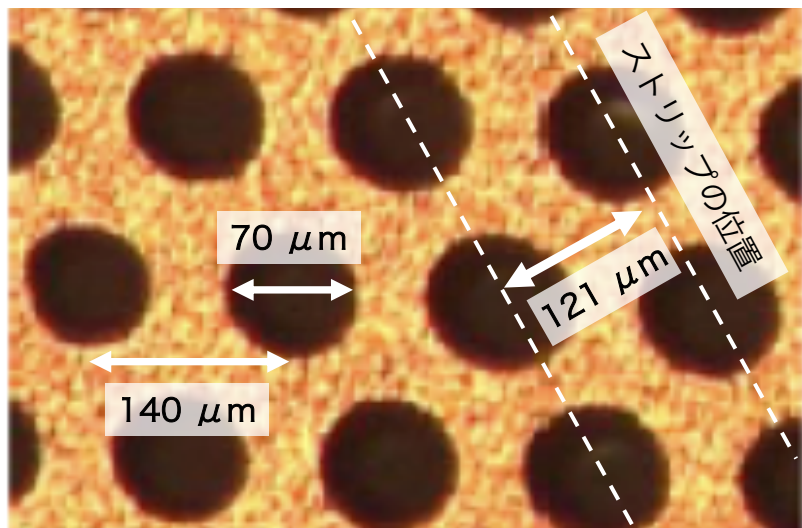
	前回	今回
充填ガス	DME at 1/4 atm	Ar/DME (60/40) at 1 atm
チェンバー材質	ステンレス	アルミニウム

+ 回転機構：ビームの軸周りで回転させて任意の偏光角での測定が可能



ストリップの信号を APV25/SRS で処理

LCP-GEM



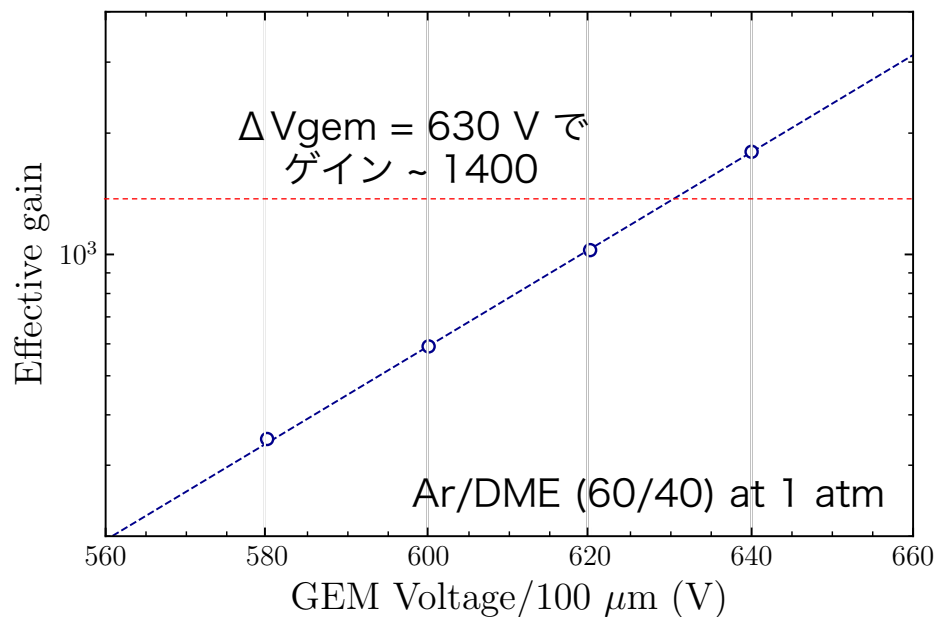
• LCP-GEM

- 穴の位置は読み出しストリップに対応

• ゲイン

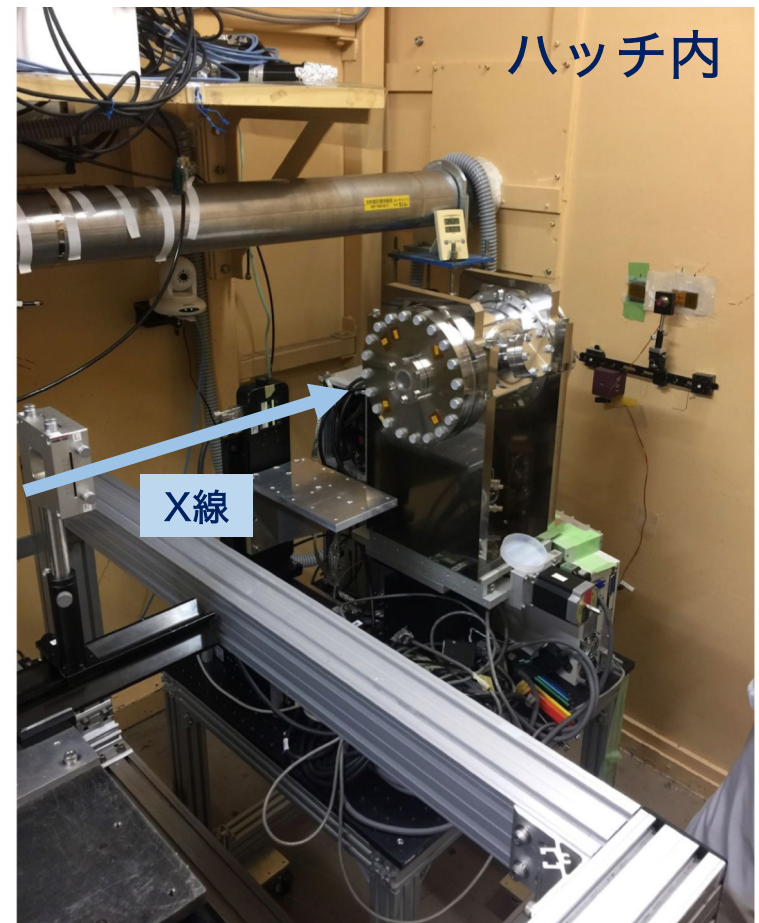
- $\Delta v_{\text{gem}} = 630$ で ~ 1400
 - > このゲインで性能評価試験

GEM ゲインカーブ

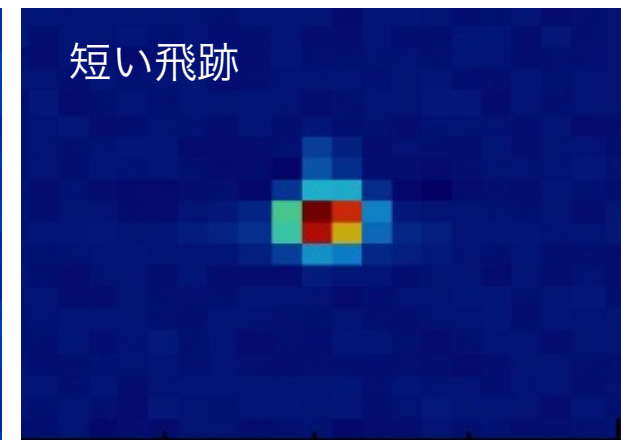
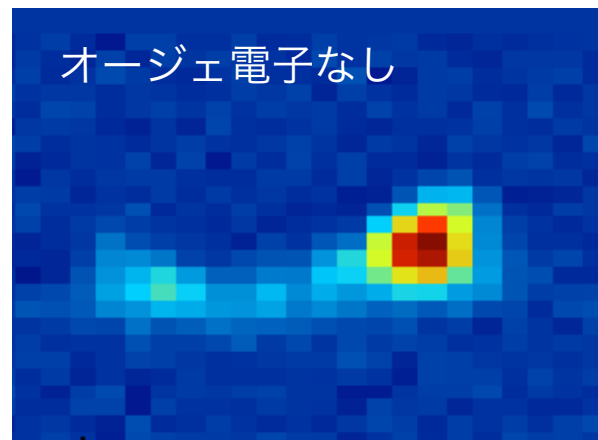
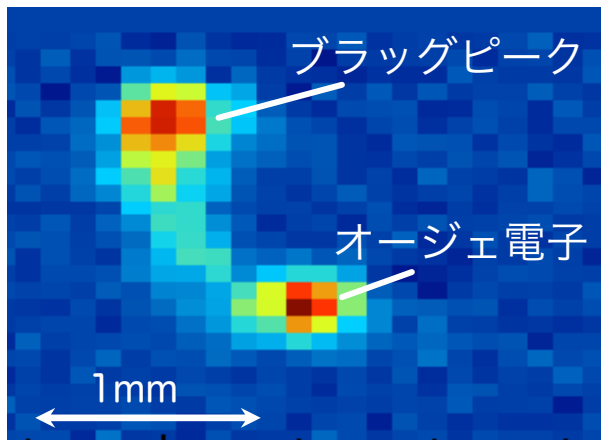
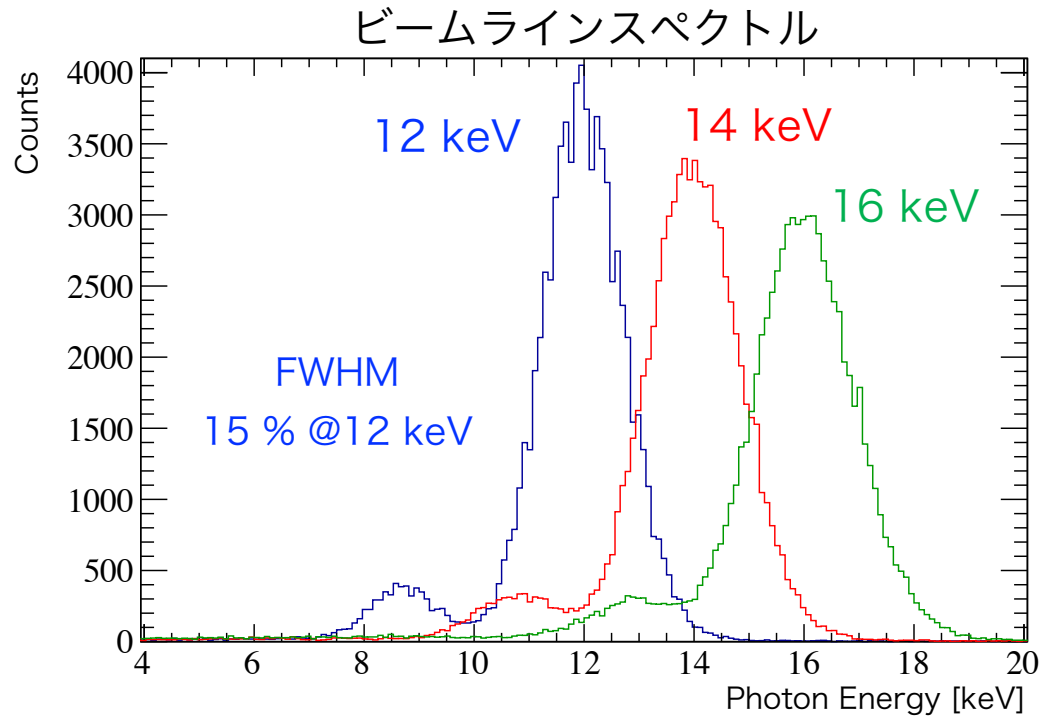


KEK PF での性能評価試験

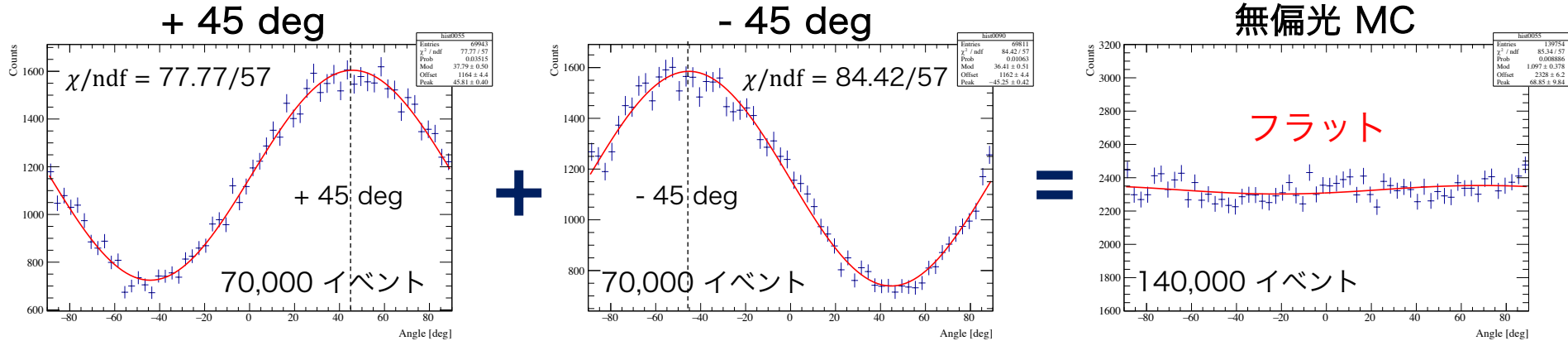
- ・ シンクロトロン放射光施設 KEK PF BL-14A
 - 測定エネルギー：12, 14, 16 keV の単色X線
 - ビームライン偏光度：90 % (コンプトン散乱偏光計で測定)
- ・ 測定セットアップ
 - GEM のゲイン ~ 1400
 - ドリフト長：2.7 mm
 - 偏光角： +/- 45 deg



取得したスペクトル・飛跡画像



16 keV の偏光測定結果



偏光角 : 45.8 ± 0.4 deg
変調度 : 37.8 ± 0.5 %

偏光角 : -45.3 ± 0.4 deg
変調度 : 36.4 ± 0.5 %

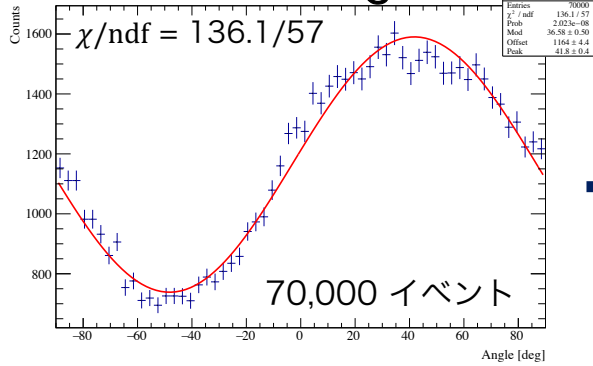
変調度 : 1.1 ± 0.4 %

16 keV の変調因子 : + 45 deg : 42.0 ± 0.6 %
- 45 deg : 40.4 ± 0.6 %

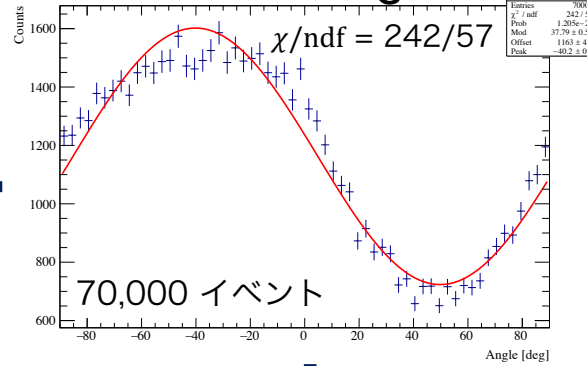
※ ビームライン偏光度 90 %

14 keV の偏光測定結果

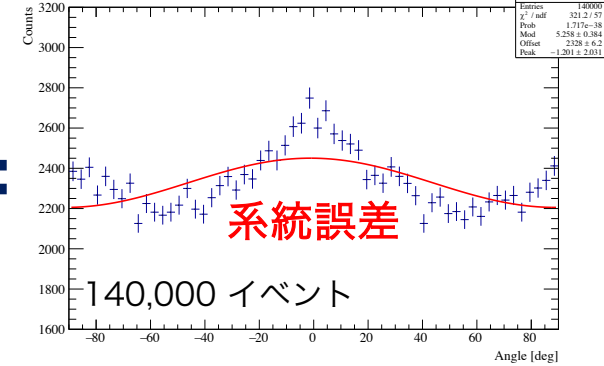
+ 45 deg



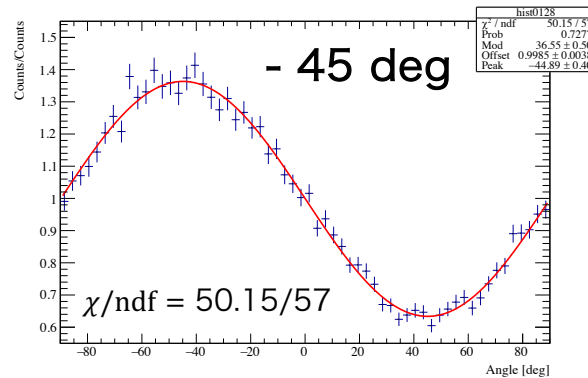
- 45 deg



無偏光 MC



- 45 deg MC \div 無偏光 MC



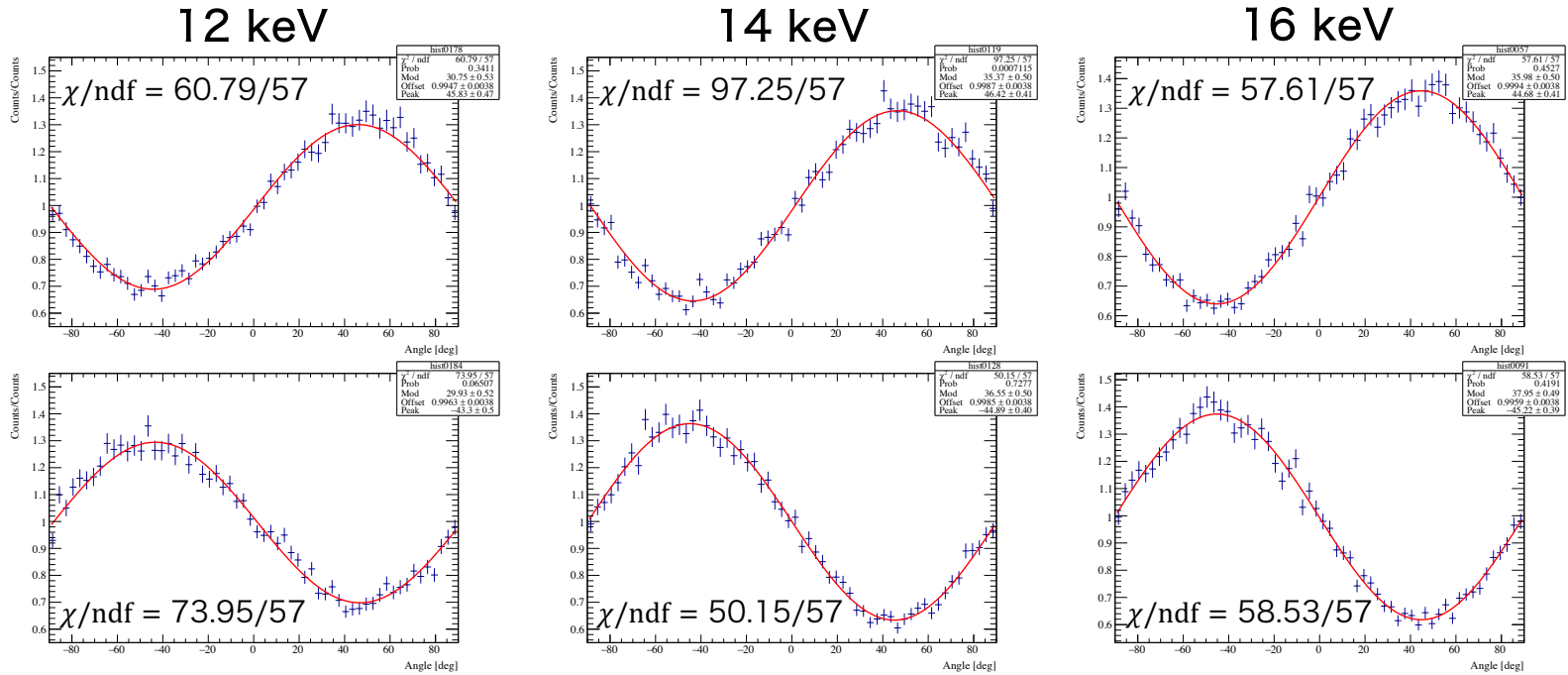
偏光角 : - 44.9 +/- 0.4 deg
変調度 : 36.6 +/- 0.5 %

系統誤差は無偏光 MC で割ることでキャンセル可能

モジュレーションファクター

+ 45 deg

- 45 deg



		12 keV	14 keV	16 keV
変調因子	+ 45 deg	34.2 +/- 0.6 %	39.3 +/- 0.6 %	40.0 +/- 0.6 %
	- 45 deg	33.2 +/- 0.6 %	40.6 +/- 0.5 %	42.2 +/- 0.5 %

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

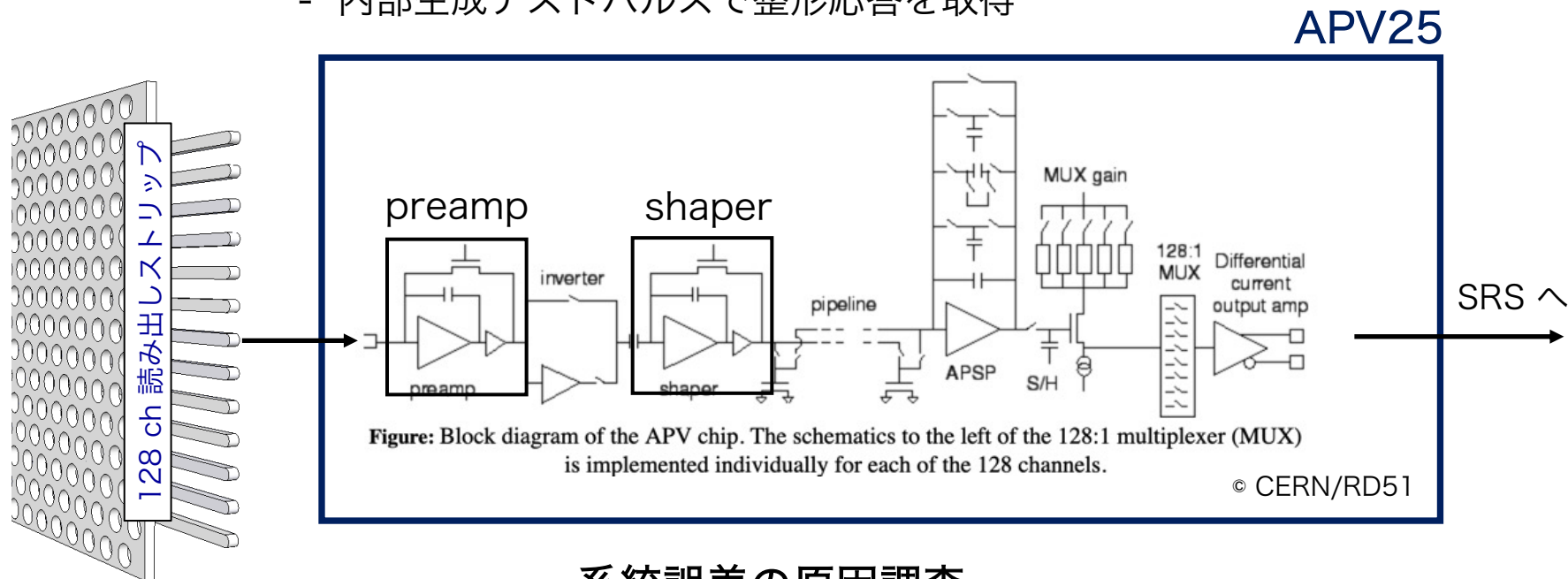
- 観測効率を上げるには系統誤差は解消しておきたい

系統誤差の原因は読み出し系？

信号読み出しシステム SRS/APV25

・ SRS/APV25

- 128 ch アナログ ASIC
- 各チャンネルに preamp, shaper
- 整形時定数：ノミナル 50 ns だが調整可能
- サンプリングレート 40 MHz, 27回の連続サンプリング
- 内部生成テストパルスで整形応答を取得

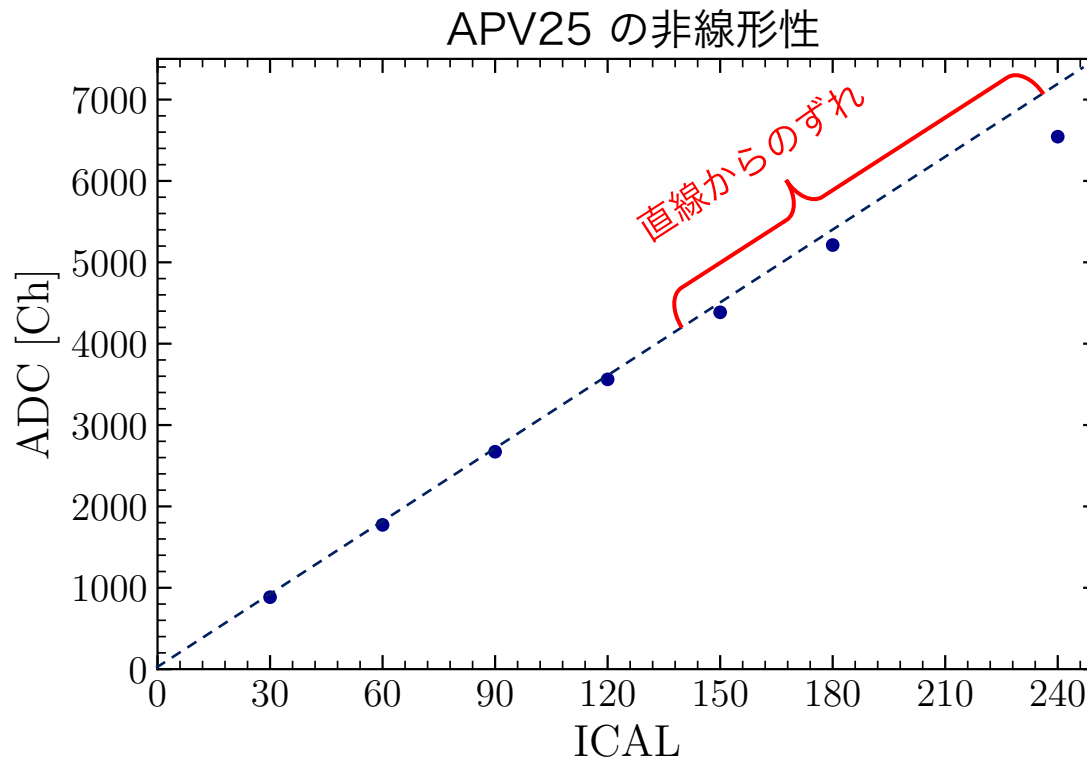


系統誤差の原因調査

1. APV25 の非線形性
2. APV25 の整形応答

調査 1 : APV25 の非線形性

- テストパルスの電子数は ICAL レジスタで調整可能
電子数 = $625 e^- \times \text{ICAL}$
- ICAL 120 = 75000 e^- 以上で非線形性
- 非線形性は飛跡を歪め、系統誤差を生じる
 - > エネルギーが低いほど飛跡は短く、電荷密度が高いため非線形性の影響大
 - > これを回避するために GEM のゲインを下げる必要あり

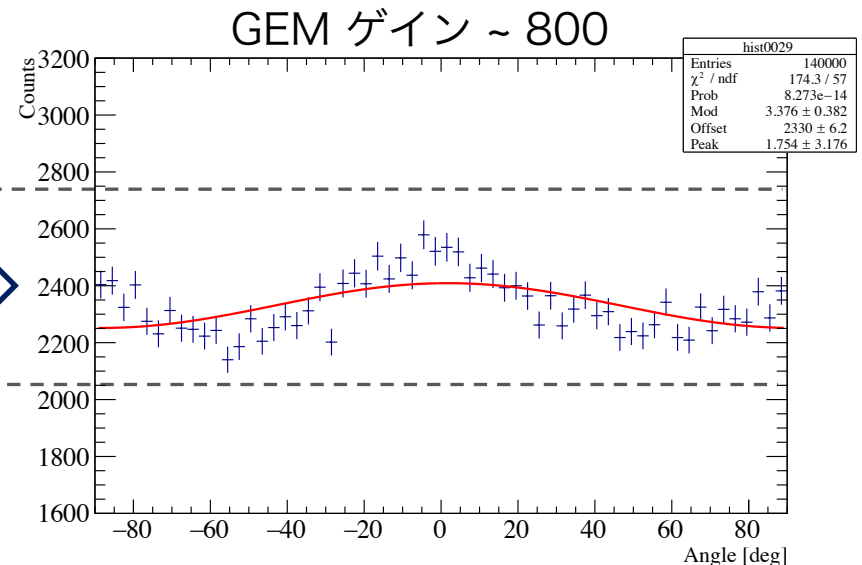
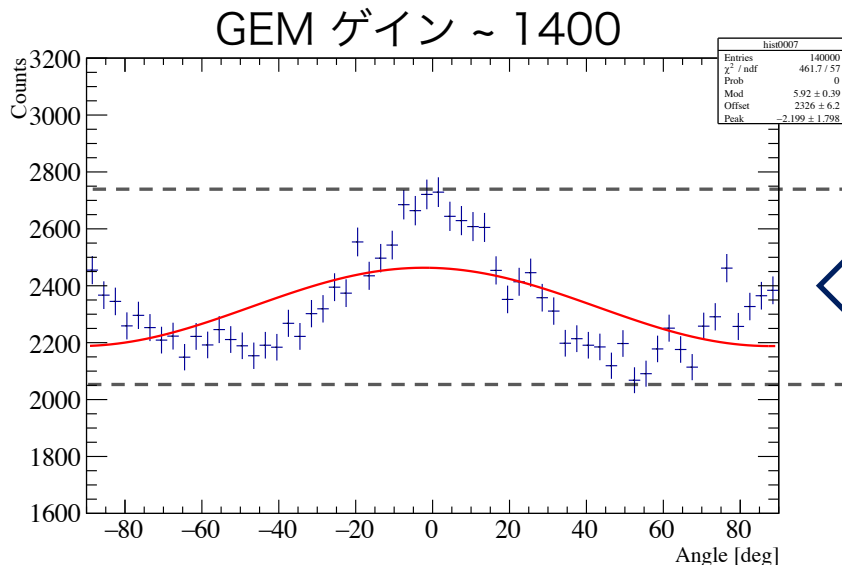


調査 1 : APV25 の非線形性

・ GEM ゲインを下げて偏光測定 @理研

- X線発生装置
 - > 管電圧 : 20 kV, ターゲット : Cu
- GEM ゲイン
 - > 1400 (KEKと同じ設定), 800, 600, 450

13 ~ 15 keV の MC

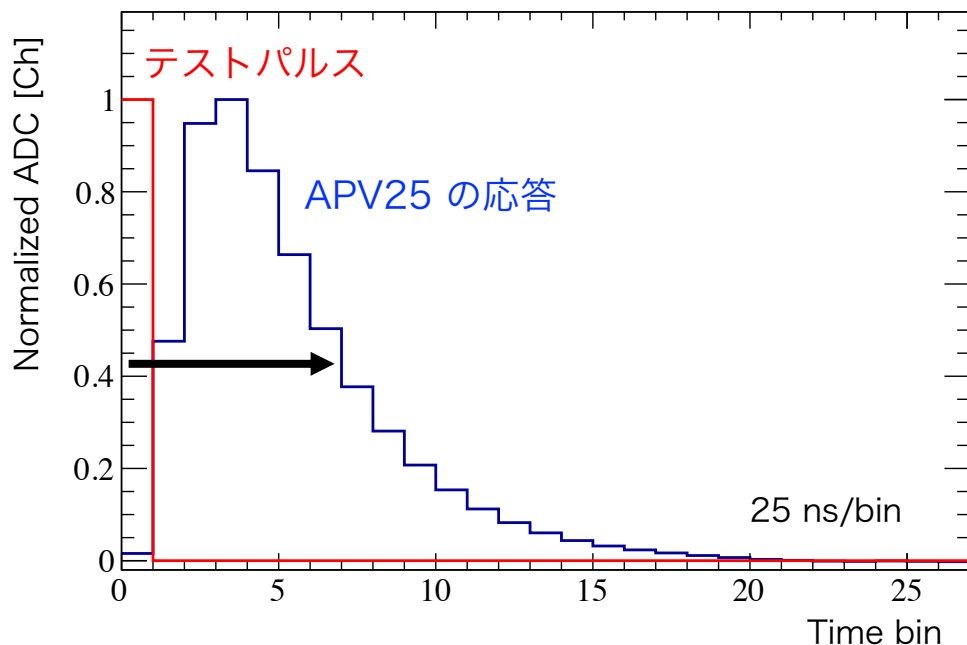


- ゲインを下げることにより、系統誤差が改善
 - > APV25 の非線形性は系統誤差の原因の1つ
- ただし、GEM ゲイン 600, 450 と下げても改善せず

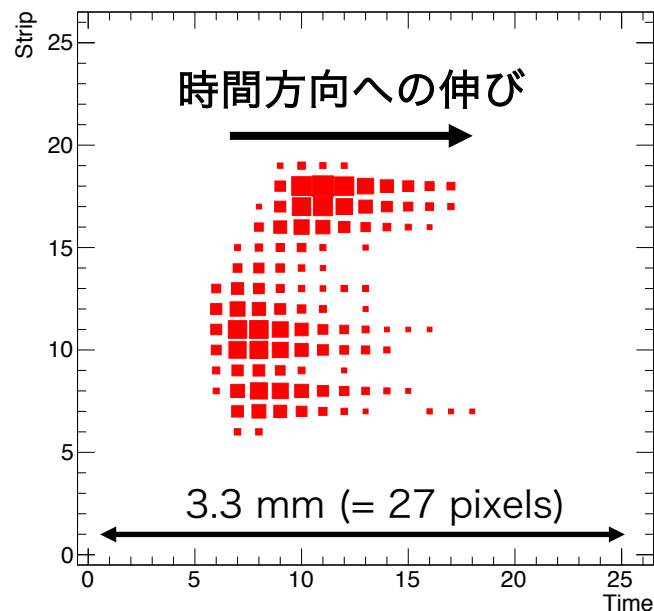
調査 2 : APV25 の整形応答

- APV25 の整形時定数はノミナル 50 ns
 - APV25 への入力信号は時間方向に伸びて出力される

内部テストパルスに対する APV25 の応答



実際に得られる飛跡



このままでは
光電子放出方向の正確な推定はできない

調査 2 : APV25 の整形応答

・ 本来の飛跡を得るためのデータ処理 : 逆畳み込み

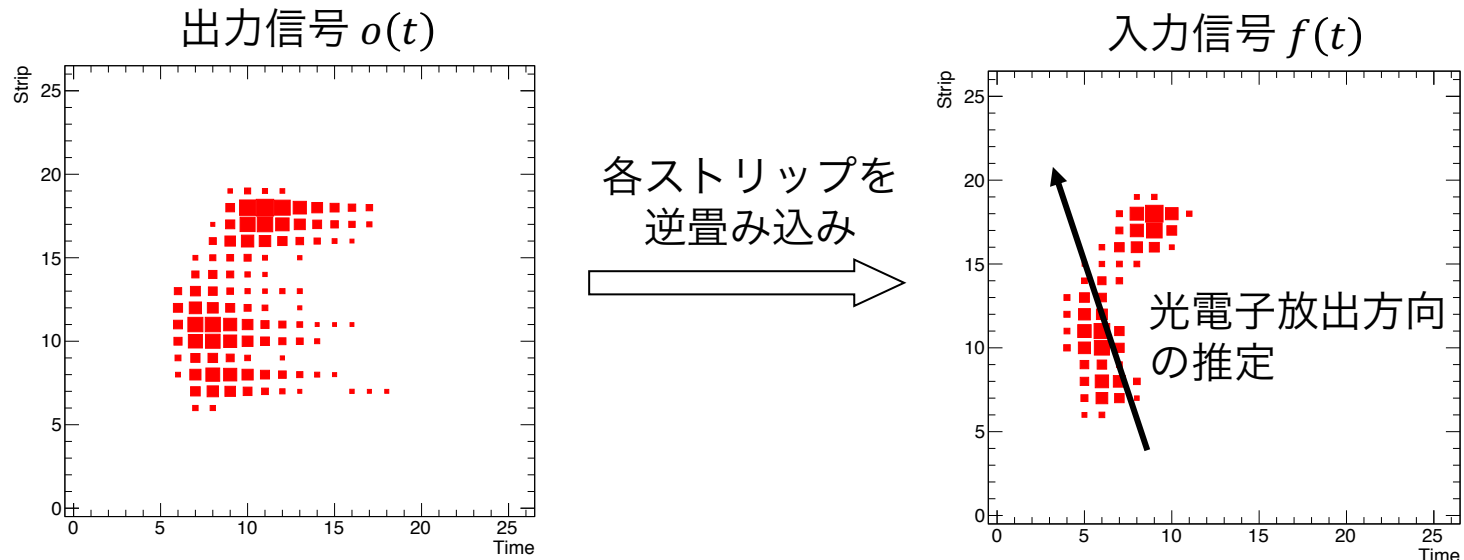
1. APV25 の出力信号 $o(t)$ には整形応答が畳み込まれている

$$\underbrace{o(t)}_{\text{出力}} = \int \underbrace{h(t-t')}_{\text{応答}} \underbrace{f(t')}_{\text{入力}} dt'$$

2. フーリエ空間では $f(t), o(t), h(t)$ は単純な積 (畳み込みの定理)

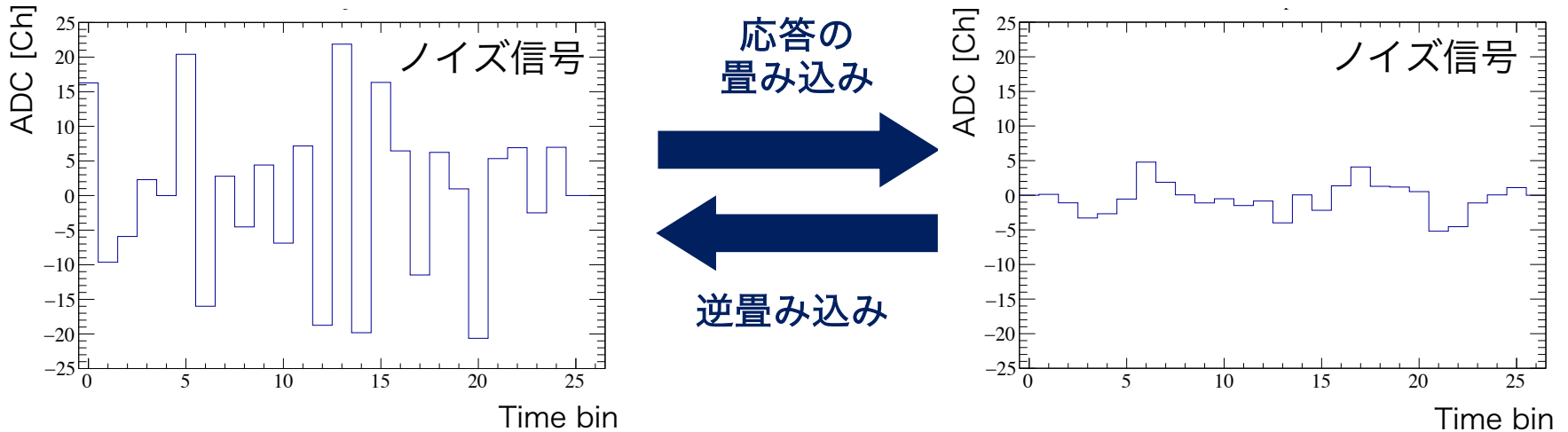
$$\mathcal{F}[o] = \mathcal{F}[h]\mathcal{F}[f] \quad \therefore \underbrace{\mathcal{F}[f]}_{\text{入力}} = \underbrace{\mathcal{F}[o]}_{\text{出力}} / \underbrace{\mathcal{F}[h]}_{\text{応答}}$$

3. $\mathcal{F}[o]/\mathcal{F}[h]$ を逆フーリエ変換することで入力信号 $f(t)$ が得られる



調査 2 : APV25 の整形応答

・ 逆畳み込みによるノイズの悪化

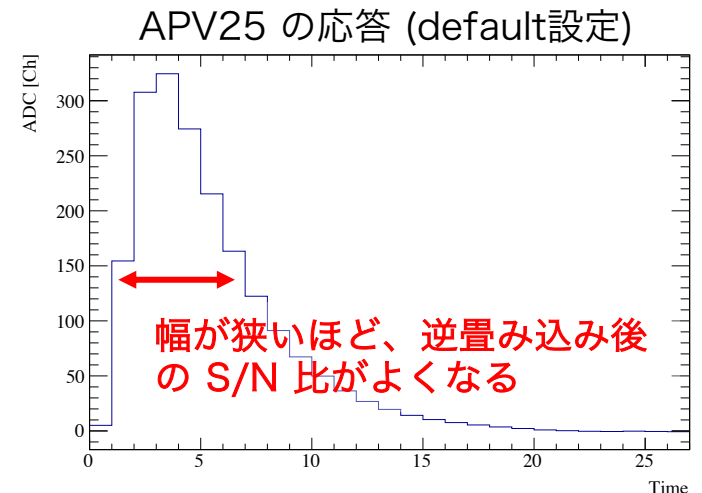


・ 応答の畳み込み

- 信号は平滑化
- 平滑化の度合いは応答の幅が広いほど強い

・ 応答の逆畳み込み

- 畳み込みと逆の処理
 - > 応答の幅が狭いほどノイズ悪化は小
 - > 偏光測定では APV25 の応答の幅を狭くした方が良い



調査 2 : APV25 の整形応答

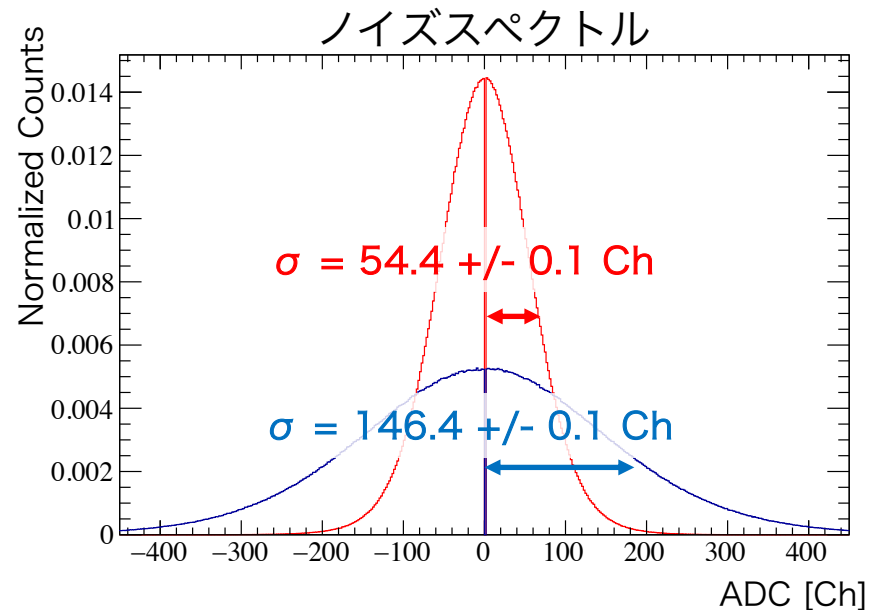
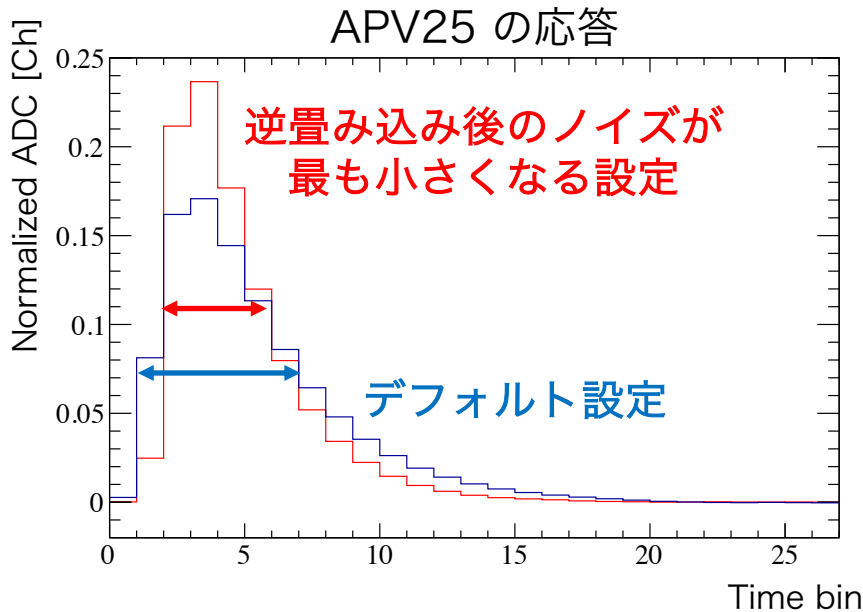
以下の 3 つのバイアスが整形時定数に大きく影響

IPRE (preamp input) : 立ち上がり

ISHA (shaper input) : 立ち上がり・下がり

VFS (shaper feedback) : 立ち下がり

整形時定数が短くなるように設定



- ・ 逆畳み込み後のノイズがデフォルト設定と比べて約 40 % に
 - > S/N 比の向上により、系統誤差の改善や偏光検出性能の向上が期待できる
- ・ 今後は、この設定で偏光測定をおこなう予定

まとめ

- 高エネルギーX線に感度を持つ TPC 偏光計を開発
 - 充填ガス : DME at 1 atm => Ar/DME (60/40) at 1atm
- KEK, 理研にて性能評価試験を実施
 - 低エネルギー側で系統誤差が見られたが、無偏光 MC で割ることでこれをキャンセルし、偏光検出性能を確認

偏光計のモジュレーションファクター

		12 keV	14 keV	16 keV
MF	+ 45 deg	34.2 +/- 0.6 %	39.3 +/- 0.6 %	40.0 +/- 0.6 %
	- 45 deg	33.2 +/- 0.6 %	40.6 +/- 0.5 %	42.2 +/- 0.5 %

- 現在、系統誤差の原因を調査中
 - APV25 の非線形性が原因の 1 つ
 - 整形時定数を短くすることで畳み込み後の S/N 比向上
 - > 今後はこの設定で偏光検出性能の向上を確認する予定

Buckup Slides

取得したデータセット

エネルギー	偏光計回転角	イベント数
12 keV	+ 45 deg	70,000
		140,000
	- 45 deg	70,000
		140,000
14 keV	+ 45 deg	70,000
		140,000
	- 45 deg	70,000
		140,000
16 keV	+ 45 deg	70,000
		140,000
	- 45 deg	70,000
		140,000

非線形性について

- ICAL 120 = 75000 e⁻ で APV25 の非線形性が問題になる
- GEM ゲインを 1400、ガスのイオン化エネルギーを 30 eV とすると、14 keV のイベントにおける増幅後の電子数は

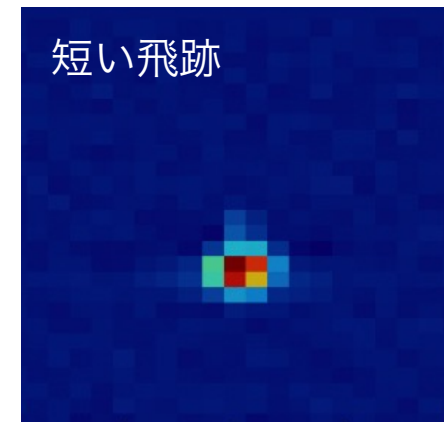
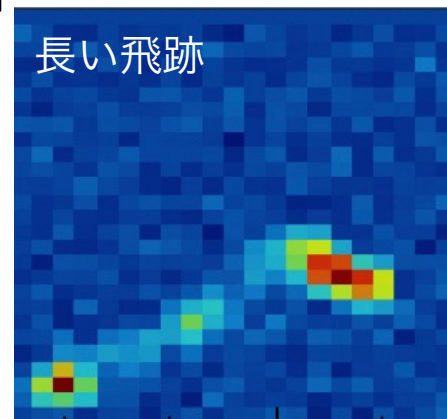
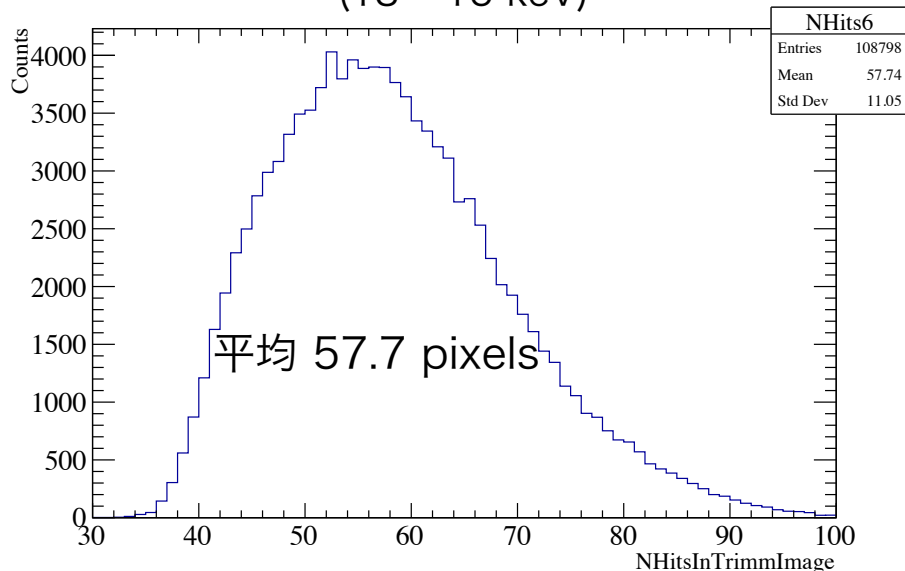
$$14,000 \text{ eV} / 30 \text{ eV/e}^- \times 1400 = 653,333 \text{ e}^-$$

- 平均電荷密度は

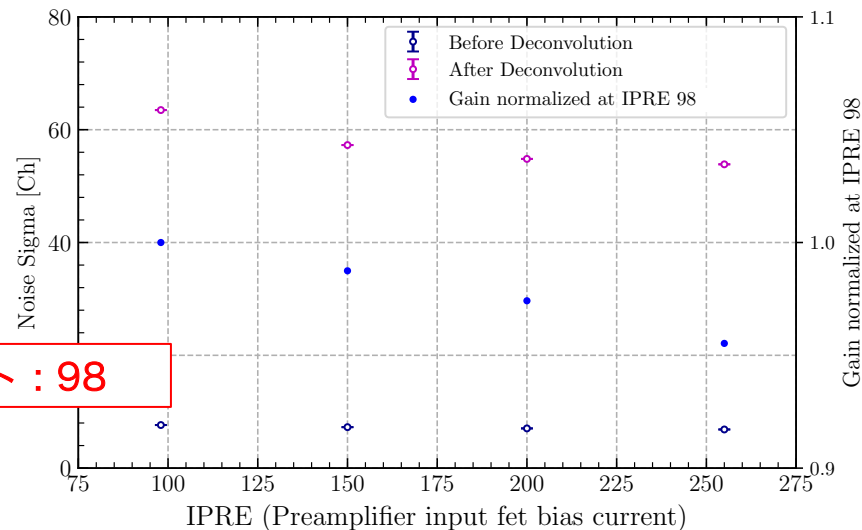
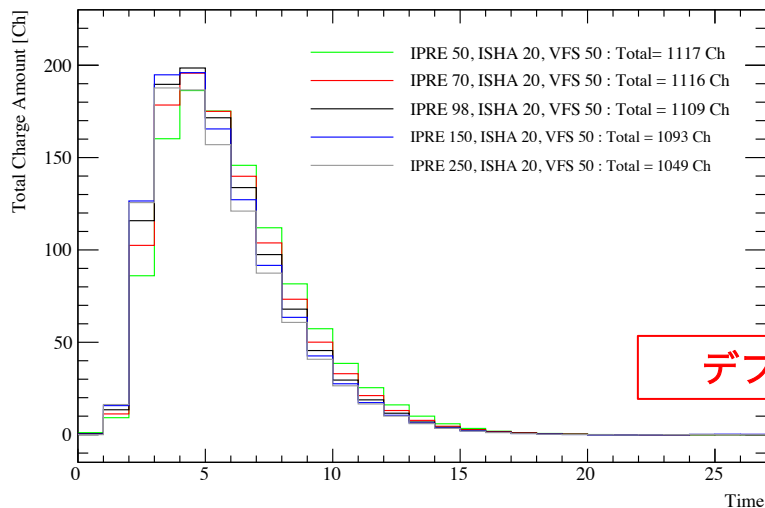
$$653,333 \text{ e}^- / 57.7 \text{ pixels} = 11,323 \text{ e}^-/\text{pixels}$$

電荷密度の高い部分で 75000 e⁻/pixels を越え、非線形性が問題に

各イベントのヒットピクセル数
(13 ~ 15 keV)

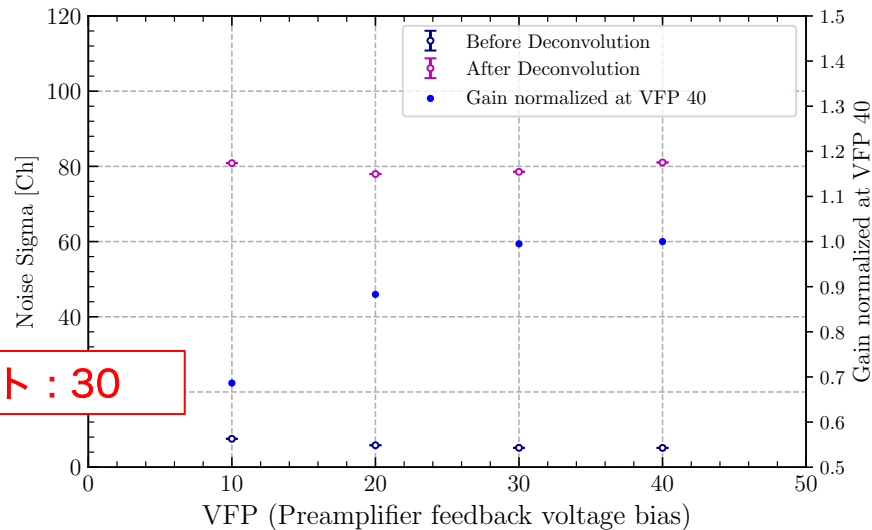
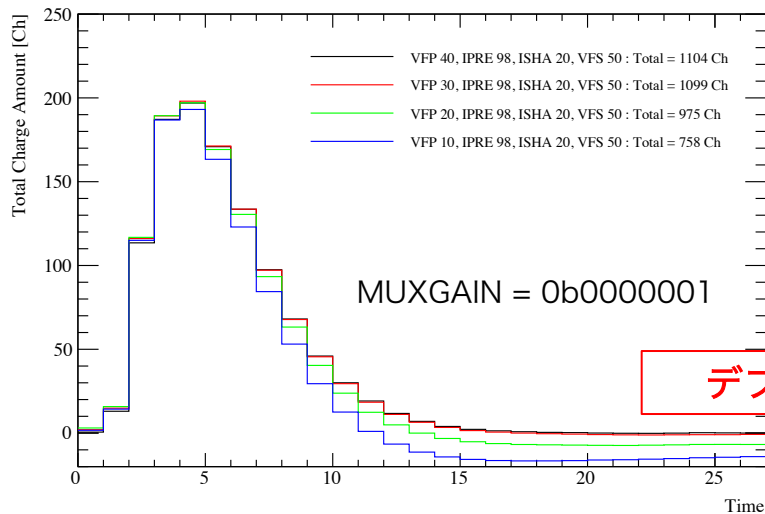


APV25 Response : Average of Strip ID 16 ~ 45

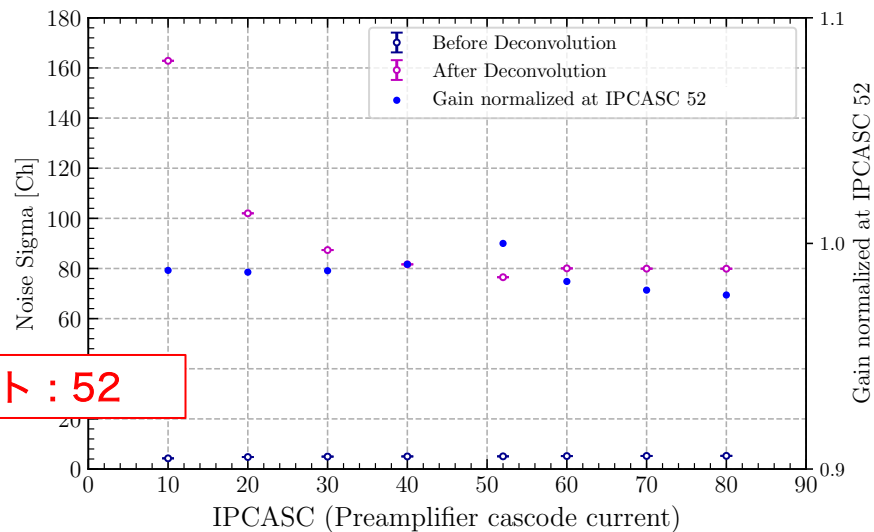
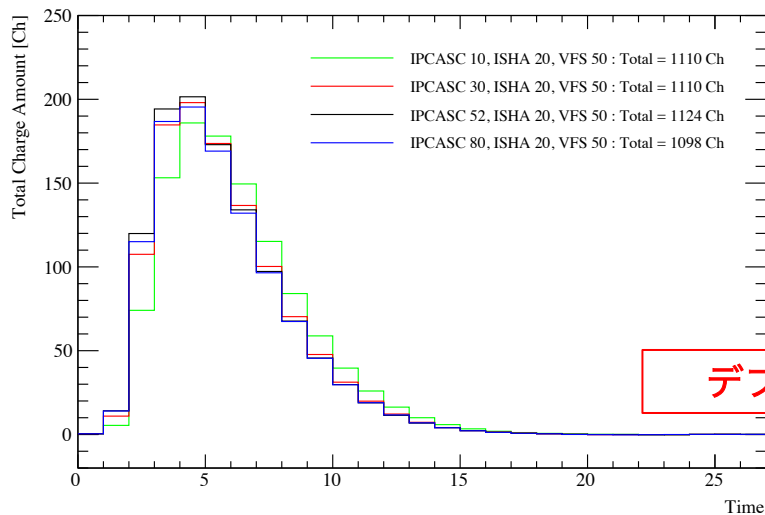


VFP

APV25 Response : Average of Strip ID 16 ~ 45

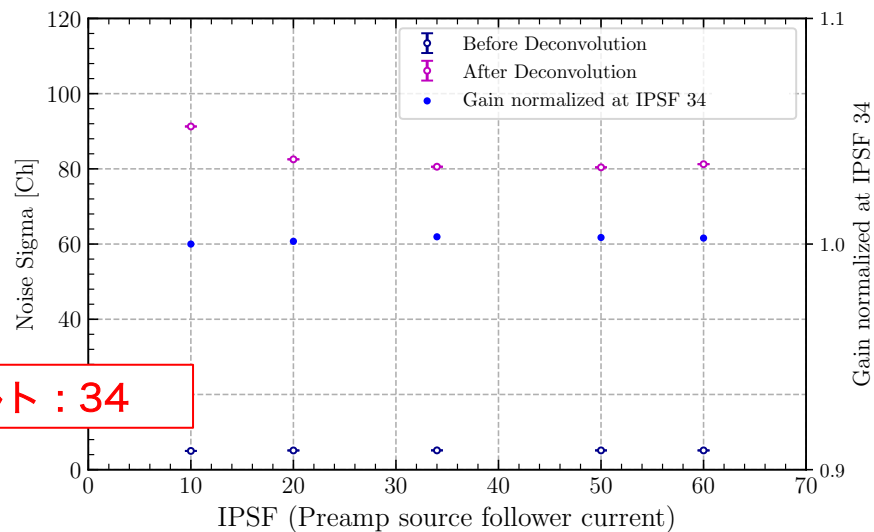
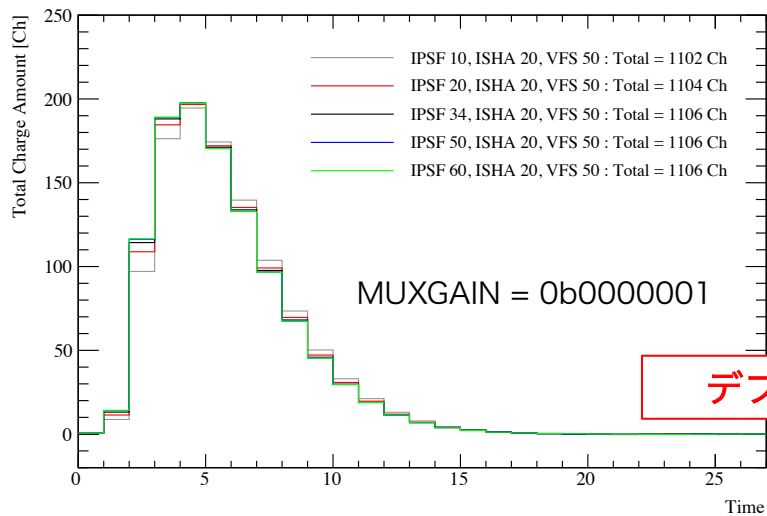


APV25 Response : Average of Strip ID 16 ~ 45

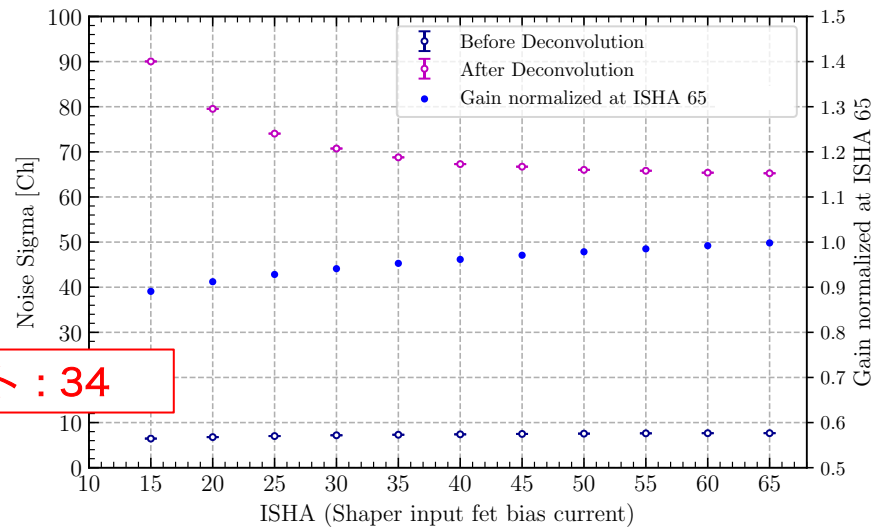
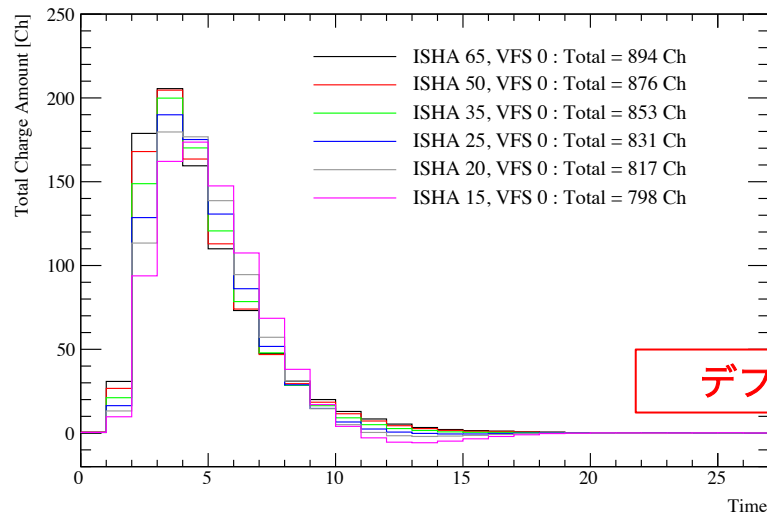


IPSF

APV25 Response : Average of Strip ID 16 ~ 45

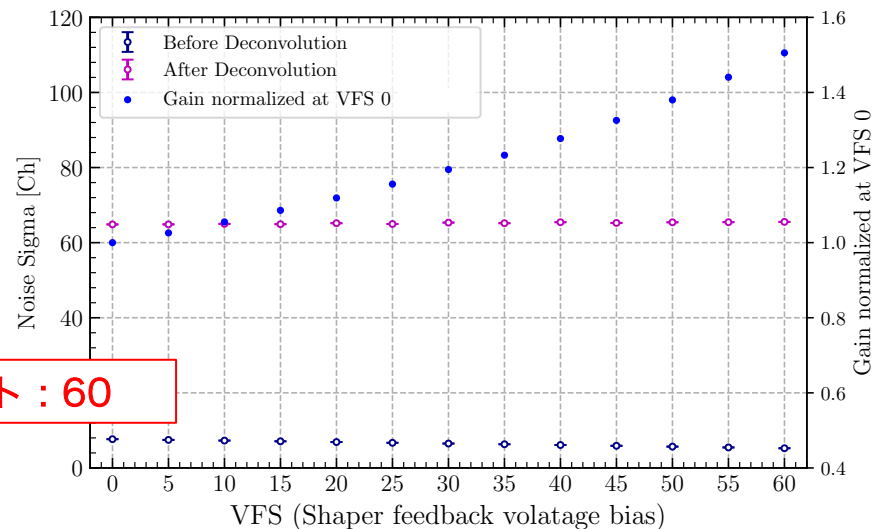
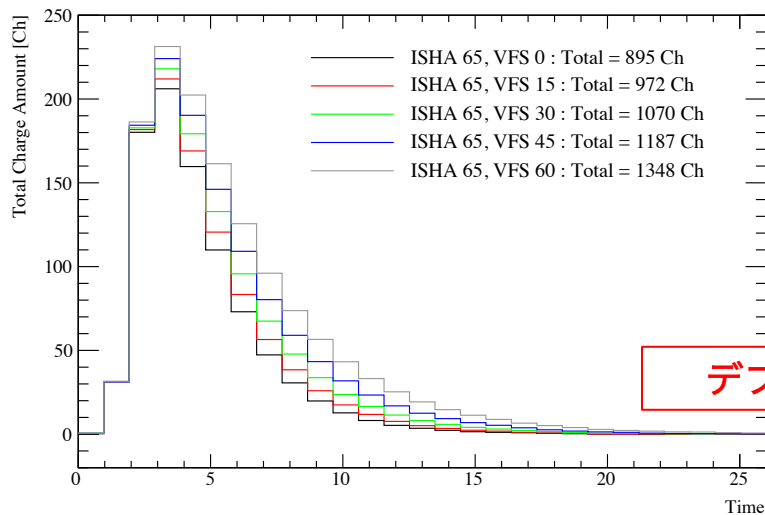


APV25 Response : Average of Strip ID 16 ~ 45



VFS

APV25 Response : Average of Strip ID 16 ~ 45



最適な APV25 設定の調査

- preamp, shaper, MUX などのバイアス などを調整可能
- 内部で生成するテストパルスの電荷量、fine delay
- 下の表で●マークのあるものについて調査をおこなった

これらのうち、調整によりデフォルト設定と比較してノイズが改善したのは

IPRE (preamp input) : 立ち上がり **ISHA** (shaper input) : 立ち上がり・下がり
VFS (shaper feedback) : 立ち下がり **CSEL** : テストパルスの fine delay

Bias Name	Description	Value (external 128uA ref.)	Value (internal ref)	Meaning
● IPRE	Preamp Input FET Current Bias	85*	98*	460uA
● IPCASC	Preamp Cascode Current Bias	45*	52*	60uA
● IPSF	Preamp Source Follower Current Bias	30*	34*	50uA
● ISHA	Shaper Input FET Current Bias	~30*	~34*	50uA
● ISSF	Shaper Source Follower Current Bias	30*	34*	50uA
IPSP	APSP Current Bias	48*	55*	80uA
IMUXIN	Multiplexer Input Current Bias	30*	34*	50uA
● ICAL	Calibrate Edge Generator Current Bias	25*	29*	+/- 25 000 electrons
● VFP	Preamp Feedback Voltage Bias	~30*	~30*	
● VFS	Shaper Feedback Voltage Bias	~60*	~60*	
VPSP	APSP Voltage Level Adjust	~40*	~40*	
CDRV	Calibrate Output Mask	11111110		Channel 0
● CSEL	Calibrate Delay Select	00000001		1st of 8 delays
MODE	Mode of Operation of Chip	xx000100		See Mode Register
LATENCY	Write -> Trigger Pointer Delay	132		3.3us
● MUXGAIN	Sets Gain of Multiplexer	xxx00100		100uA/mip

Table 10: Nominal Settings for the APV25-S1 Bias Registers

デフォルト設定

SRS のサンプリングレートを 20 MHz にした場合

40 MHz で取得した APV25 の応答から、20 MHz のときに得られることが予想される応答を求めると、以下のグラフのように幅が狭くなる

=> 逆畳み込み後のノイズ悪化の改善が期待できる

APV25 の応答 : 40 MHz と 20 MHz の比較

