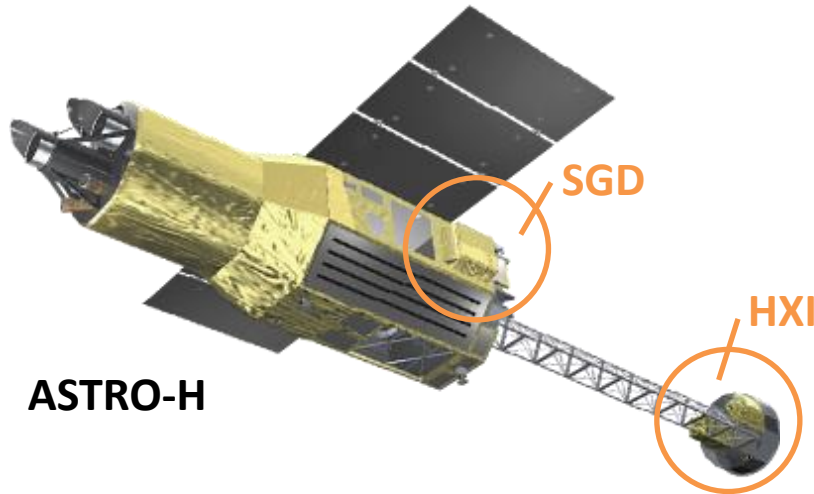


ASTRO-H衛星搭載 硬X線撮像検出器のEnd-to-End試験 によるアクティブシールドの機能検証

広島大学大学院理学研究科
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室
徳田 伸矢

大野雅功, 高橋弘充, 深澤泰司(広大理),
村上浩章, 小林翔悟, 櫻井壮希, 笹野理, 中澤知洋, 牧島一夫(東大理),
萩野浩一, 湯浅孝行, 小高裕和, 佐藤理江, 佐藤悟朗, 渡辺伸,
国分紀秀, 高橋忠幸(ISAS/JAXA), 山岡和貴, 田島宏康(名大STE研), 他HXI/SGDチーム

ASTRO-H衛星搭載検出器 HXI/SGD



2015年打ち上げ予定の次期X線天文衛星

＜4種類の検出器を搭載＞

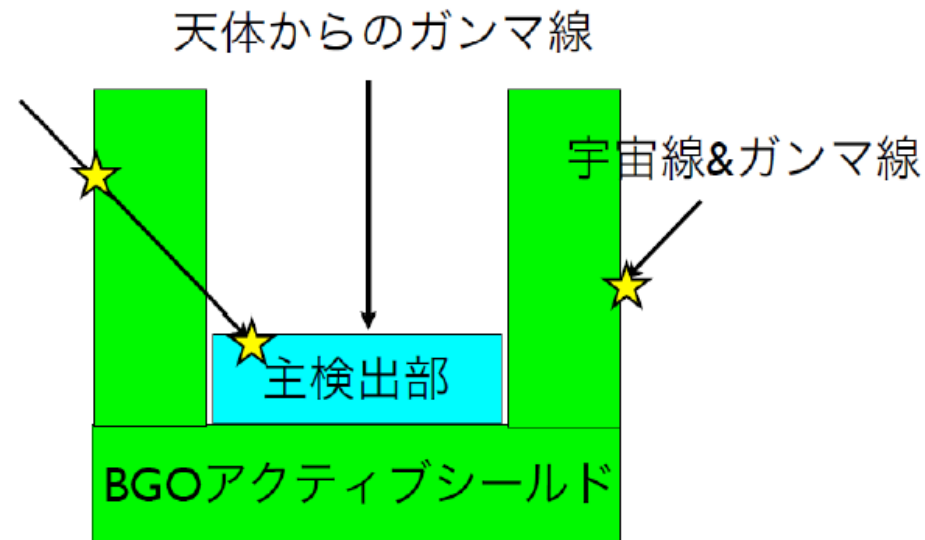
- 軟X線分光検出器 (SXS) :0.3-12keV
- 軟X線撮像検出器 (SXI) :0.4-12keV
- 硬X線撮像検出器 (HXI) :5-80keV
- 軟ガンマ線検出器 (SGD) :60-600keV

BGOアクティブシールド

- ・視野外からの宇宙線や荷電粒子を遮断
- ・BGO信号との反同時計数を取り、バックグラウンドとして除去

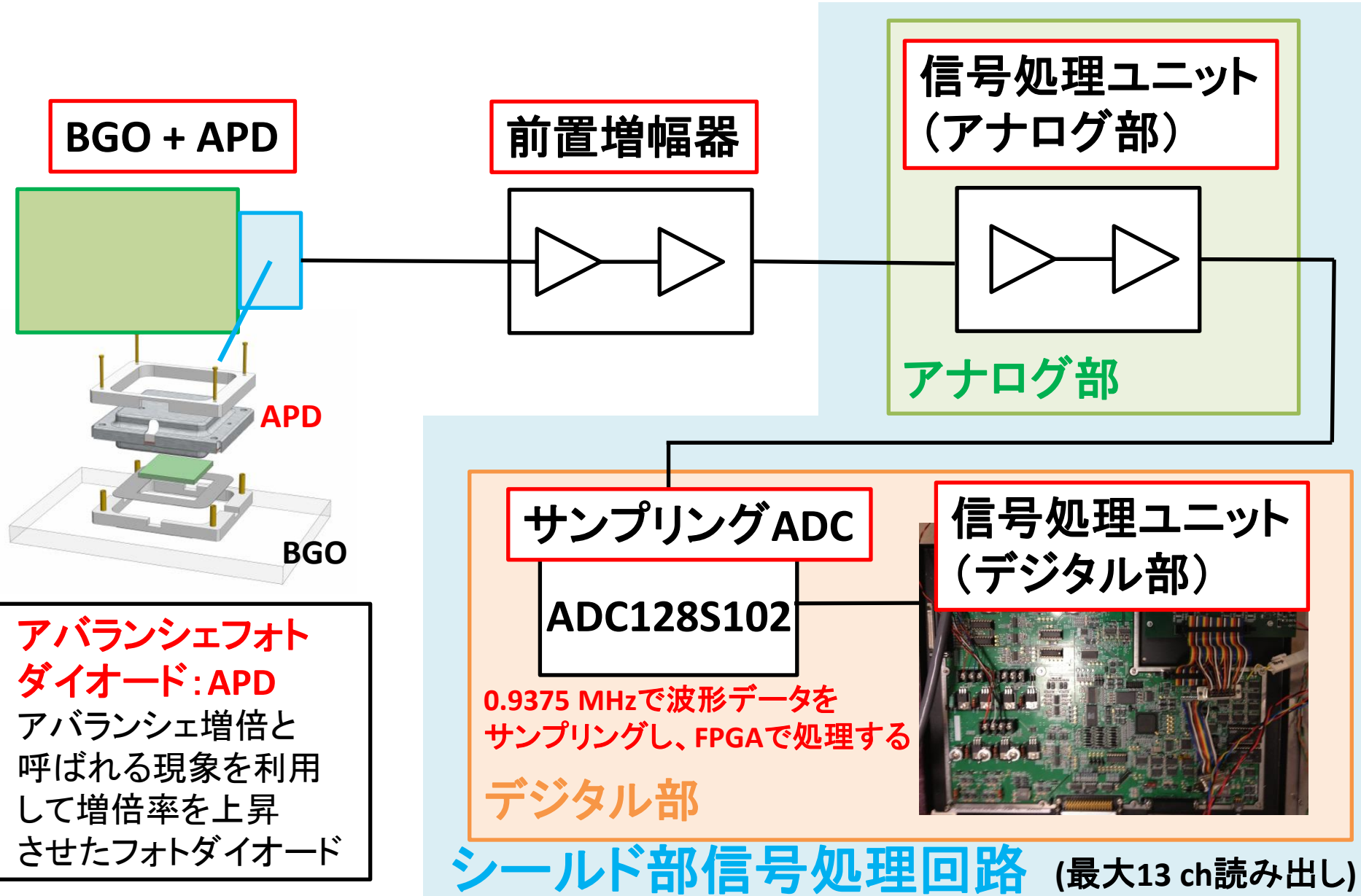


従来の検出器の感度より一桁以上
高い性能を実現



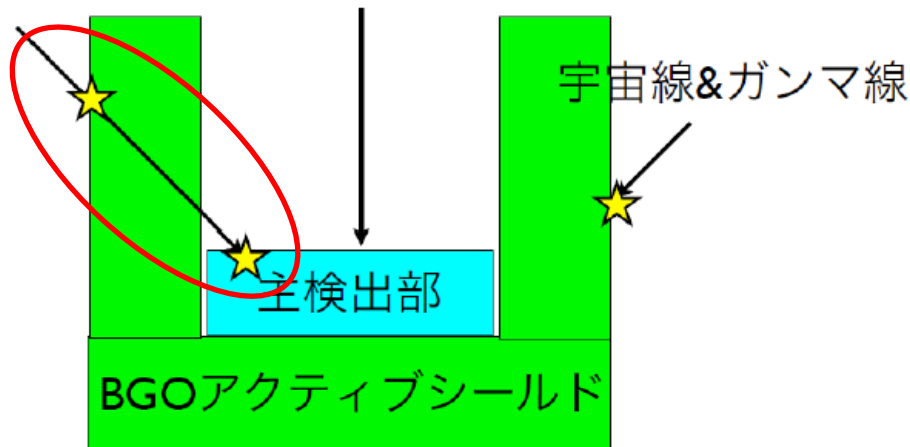
アクティブシールドの概念図

アクティブシールド信号処理の全体像



反同時計数信号の出力タイミング

天体からのガンマ線



アクティブシールドの概念図

BGO信号が正しく読み出せる

反同時計数信号を主検出器側が
確実に捉える

➡ バックグラウンド除去効率の向上
につながる

主検出器部

主検出器部
信号

主検出器側で設定
できる時間

シールド部

シールド部信号

約15 μ s

反同時計数
信号

シールド側で設定
できる時間

HXI Full EMを用いたEnd-to-End試験

HXI Full EM試験

主検出器とシールド部が初めて一つに統合されて製作された。
読み出す回路系もフライト品と同等の試作機を使用。

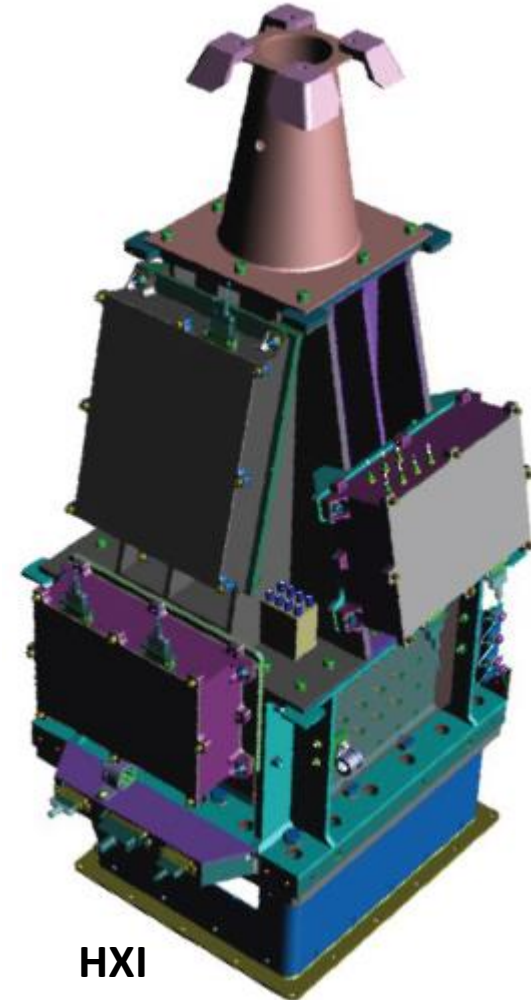
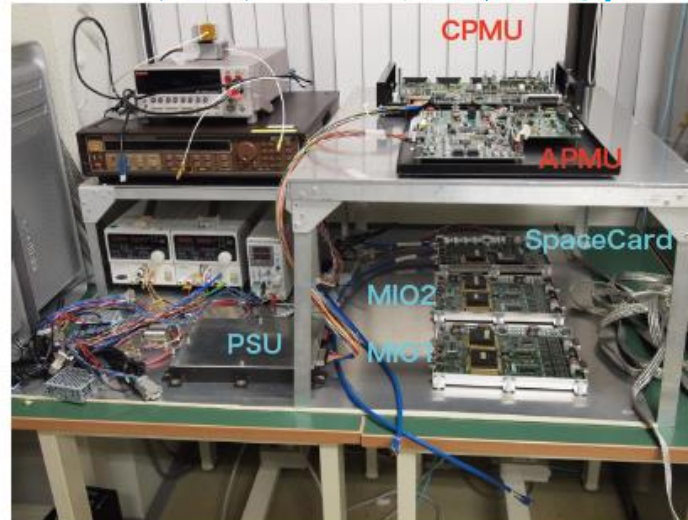
<本研究の目的>

HXI Full EMを用いて、実際に多チャンネルBGO同時読み出しを行っても問題がないか確認するとともに、反同時計数処理の最適化を行い、今まで行われていなかった反同時計数処理の実証をする。

衛星バス模擬PC



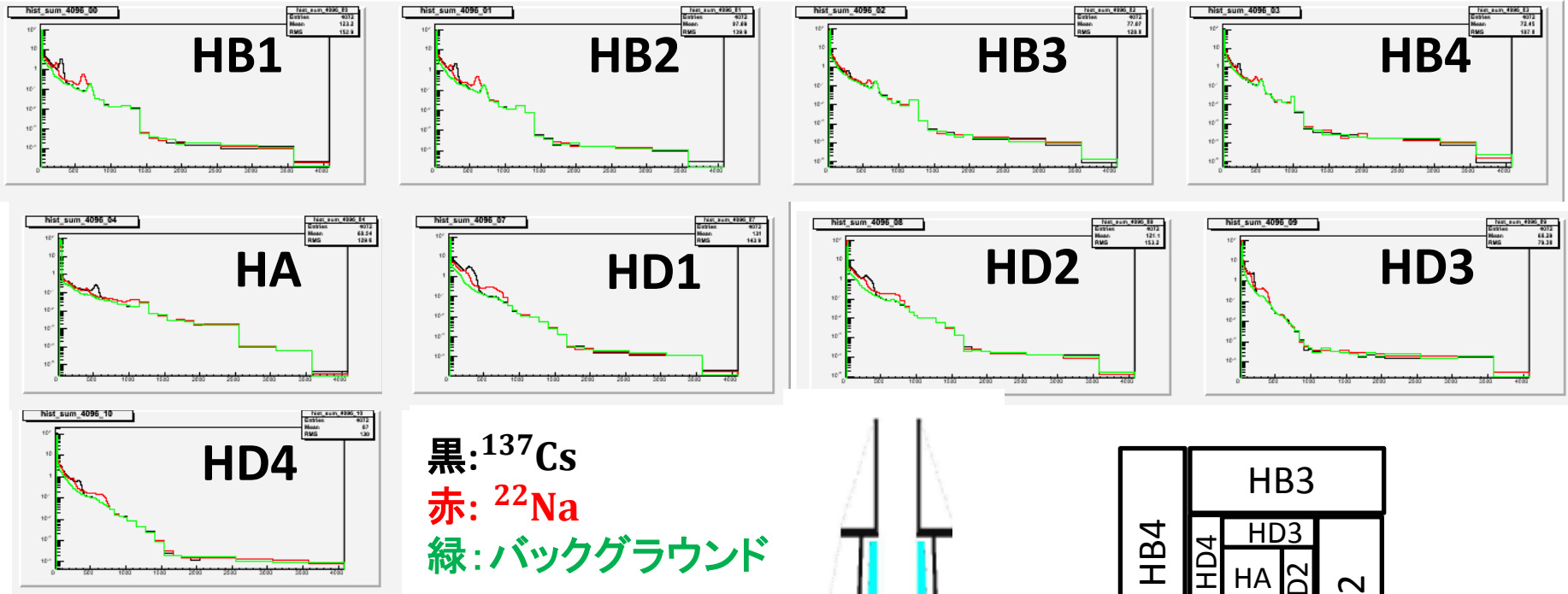
アナログ・デジタル処理部



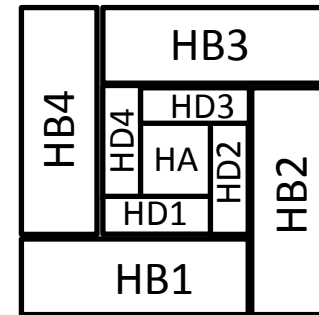
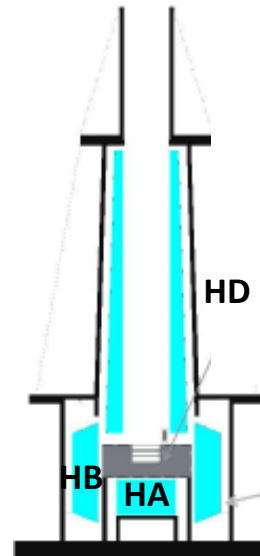
HXI

シールド部多チャンネル同時読み出し

シールド部信号処理回路で多チャンネル同時にシールド部の信号読み出しを行った。
 ^{137}Cs 照射時, ^{22}Na 照射時, バックグラウンドのスペクトルを取得。



1つの信号処理回路で初めてBGO信号
 9 chの並列処理を行うことに成功した

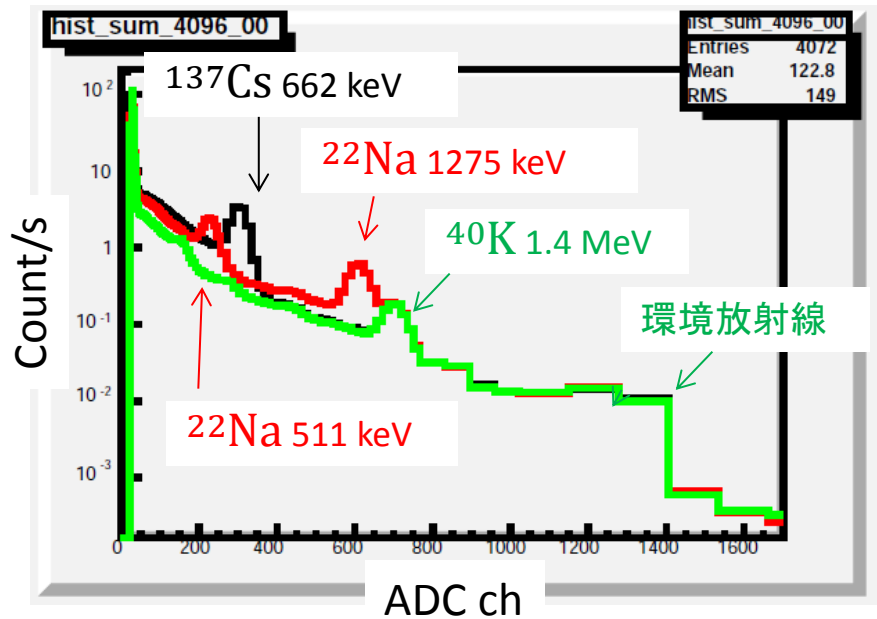


左: 横から見たHXI
 上: 真上から見たHXI

シールド部多チャンネル同時読み出し 閾値検証

多チャンネル同時読み出しで、お互いの信号同士が干渉して、閾値に影響がないか検証を行った

HB1のスペクトル



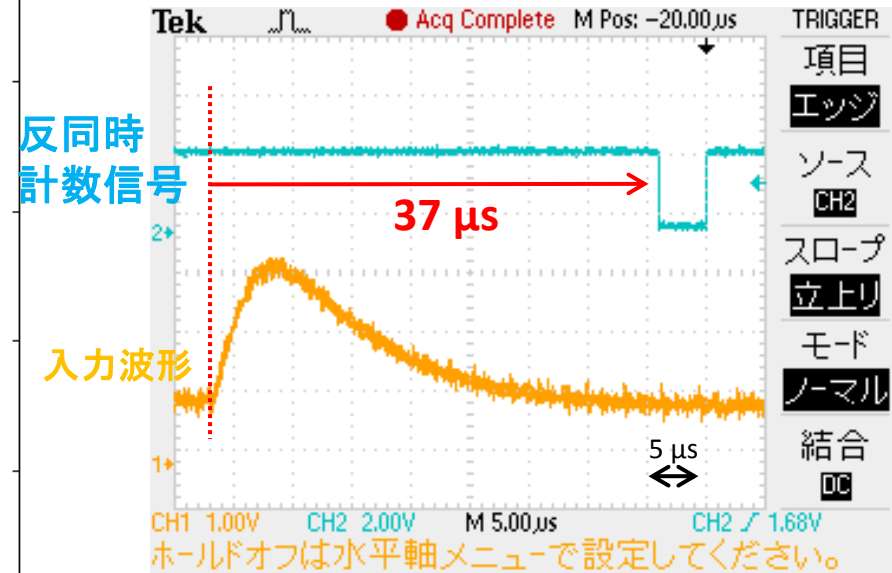
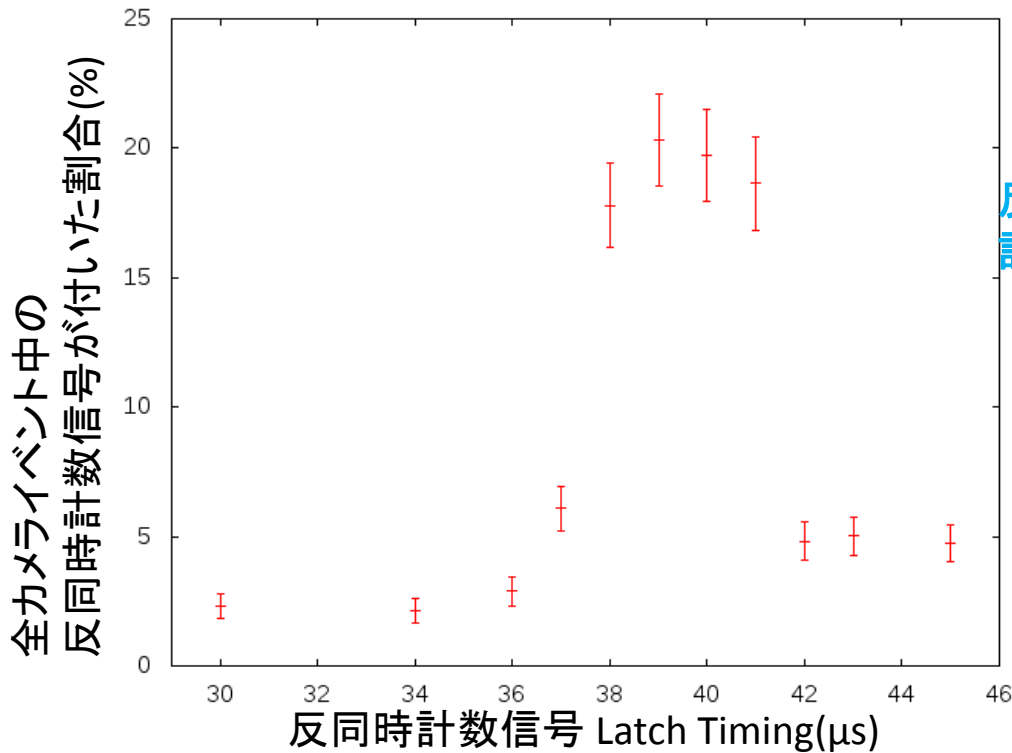
HXI Full EMのBGOセンサー一部閾値

BGO センサー一部	閾値(keV)
HA	61
HB1	102
HB2	90
HB3	77
HB4	109

多チャンネル同時読み出しでも、BGOセンサー一部に性能の問題がないことを確認

反同時計数処理信号ラッチタイミングスキキャン

主検出器でバックグラウンドイベントを測定中に反同時計数処理信号のラッチタイミングを変更していき、主検出器イベントについてのフラグの割合を求めた

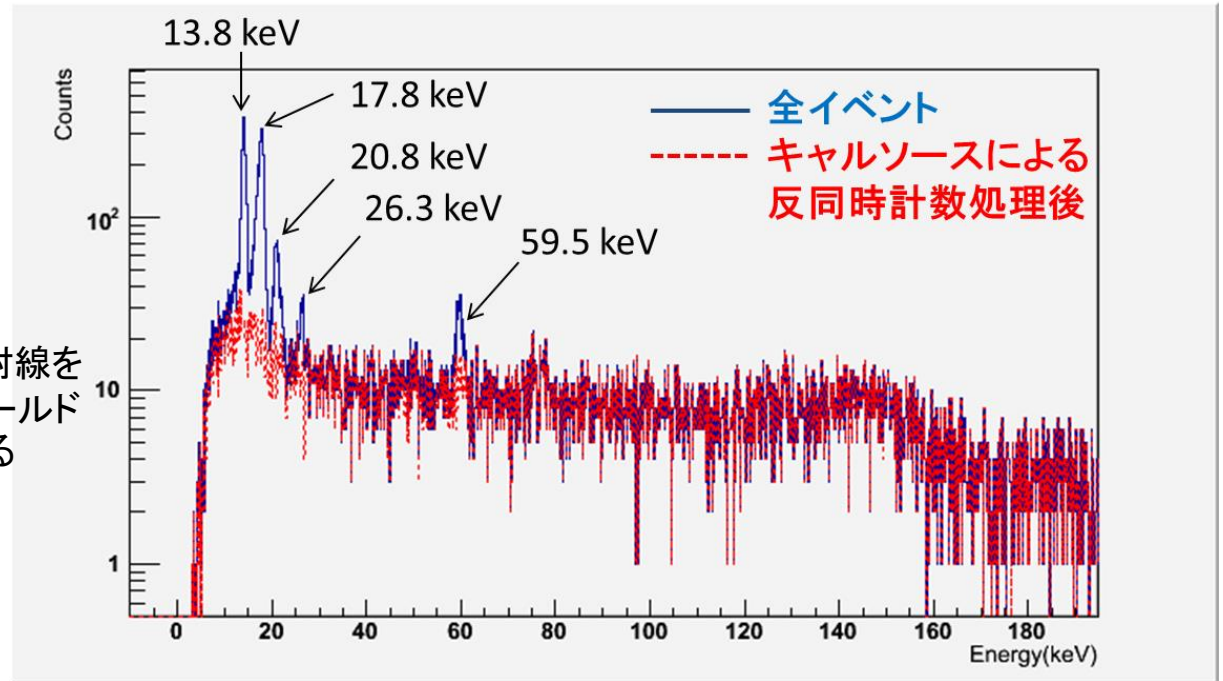
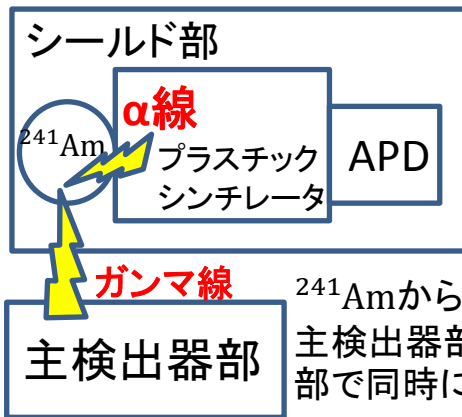


反同時計数信号出力幅4 μsで、ラッチタイミング38~41 μsで割合が最大
⇒反同時計数信号ラッチタイミングは39 μsを採用

最適化したラッチタイミングで実際に反同時計数処理を行った

反同時計数処理の実証

シールド部に取り付けられたキャルソース ^{241}Am (α 線とガンマ線を同時に出す)キャルソースの反同時計数信号のみを用いて、主検出器のスペクトルに反同時計数処理を行った



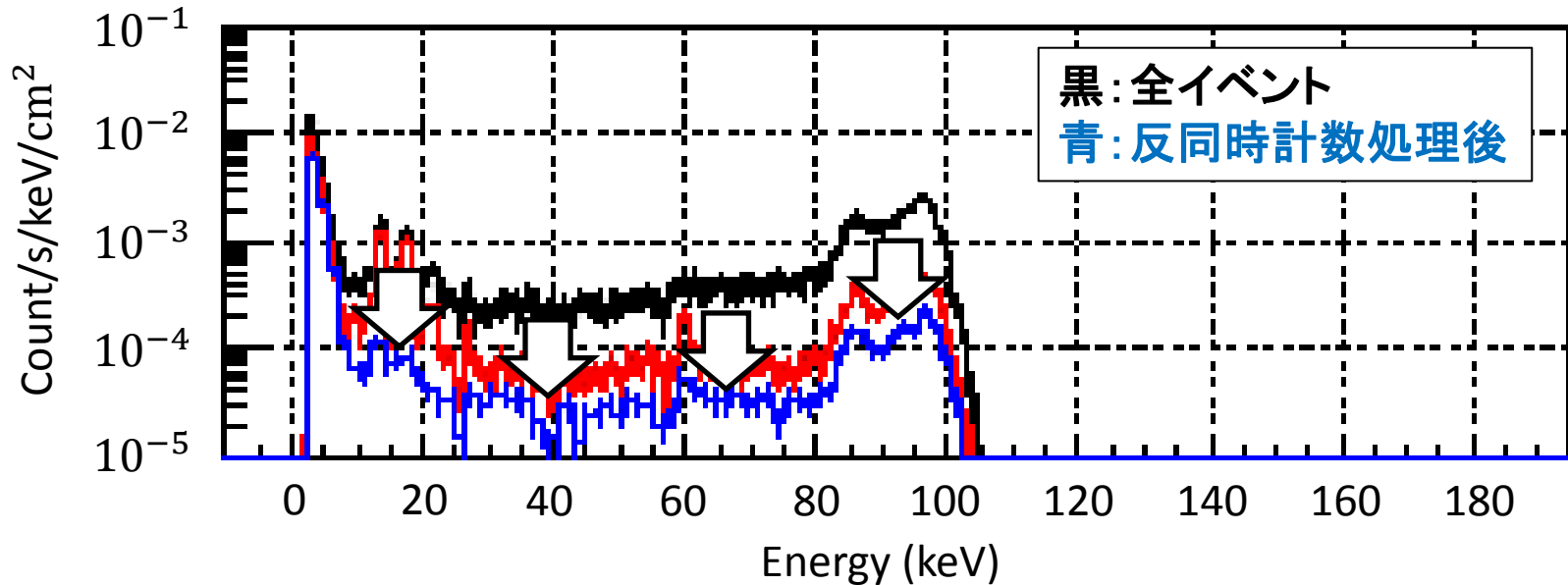
^{241}Am 由来の輝線のみがほぼ100%除去できた



反同時計数処理を初めて実証した

反同時計数処理によるバックグラウンド除去の検証

実際に主検出器でバックグラウンドスペクトルを取得し、そのスペクトルに反同時計数処理を行った



主検出器のバックグラウンドイベントの7割が除去できていることを確認

➡ 反同時計数処理によりバックグラウンドが下がることを初めて実証した。

まとめ

- ASTRO-H衛星搭載検出器のアクティブシールドセンサー部についてHXIの試作品を用いて機能検証を行った。
- 1つの信号処理回路で初めてBGO信号9 chの並列処理を行うことに成功した。
- 反同時計数処理の最適化を行い、反同時計数信号ラッチタイミングを39 μs と決めることができた。
- 反同時計数処理によりバックグラウンドが下がることを初めて実証した。

Appendix

反同時計数信号の要求性能

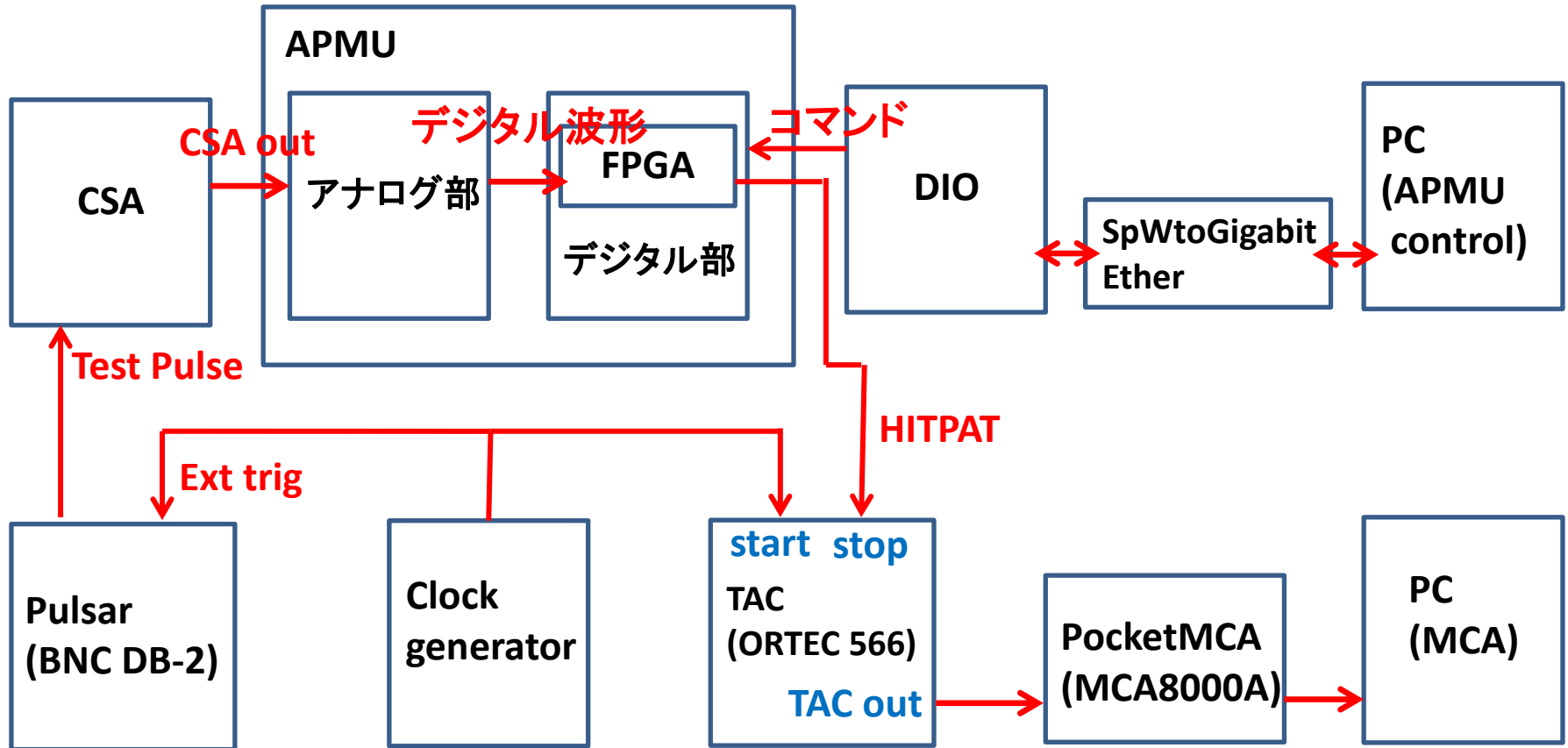
HXIのBGOアクティブシールドに想定される軌道上でのバックグラウンドレート

	想定されるレート
放射化	数k Hz
CXB	1-2 kHz
宇宙線陽子	600 Hz (100 MeV)
重粒子	0.2 Hz (Fe イオン, 数十GeV) 4 Hz (C/N/Oイオンなど、数GeV)

主検出器の不感時間 = 反同時計数信号のレート × 反同時計数信号の幅

- ・反同時計数信号の要求性能
シールドが主検出部にもたらず不感時間を7%以下に抑える

Jitter, Walk測定セットアップ



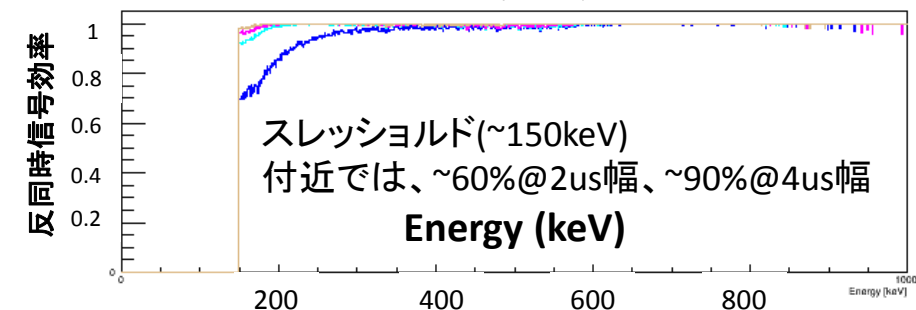
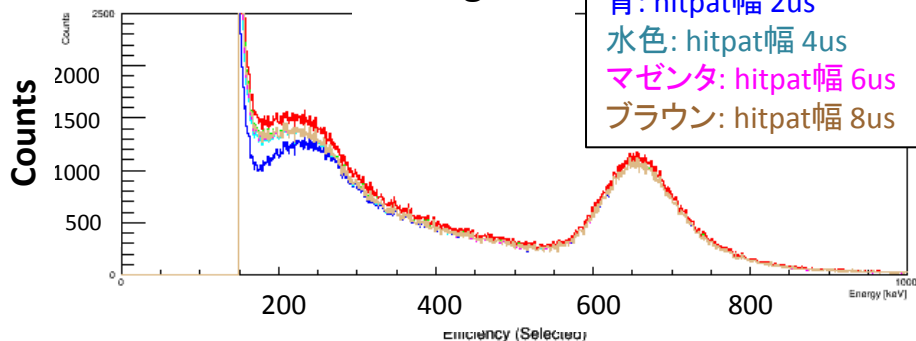
- Clock generatorでレート制御したパルサー信号を入力し、禁止信号を出力させる
- Clock generatorと禁止信号の出力時間差をTAC(Time to Analog Converter)で計測する。

実際にトリガー出力のJitterとWalkがどの程度あるのか測定を行った

BGO信号での測定結果

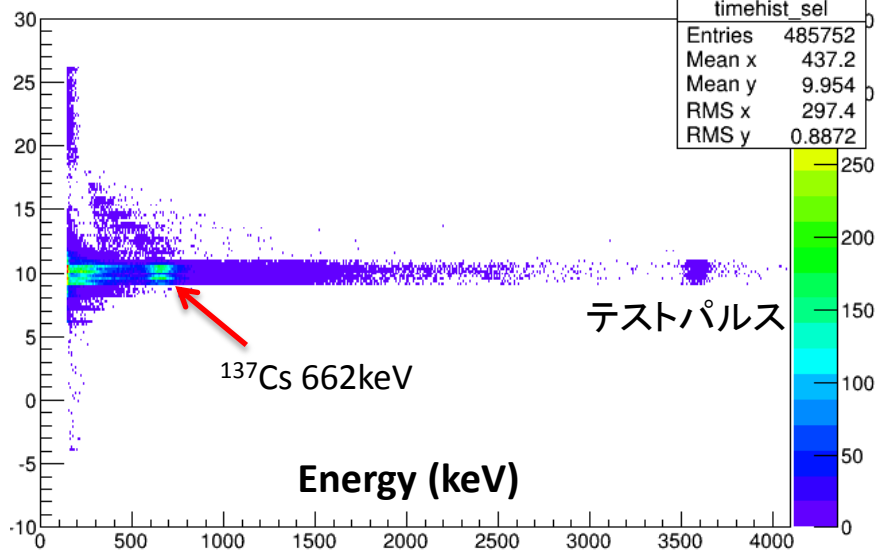
Histogram

赤: セレクション無し
 緑: hitpat幅 < 50us
 青: hitpat幅 2us
 水色: hitpat幅 4us
 マゼンタ: hitpat幅 6us
 ブラウン: hitpat幅 8us



DeltaT vs Histogram (Selected)

timehist_sel	
Entries	485752
Mean x	437.2
Mean y	9.954
RMS x	297.4
RMS y	0.8872



イベント発生とピーク検出との時間差(μs)

- ・ピーク検出までの時間はほぼ10 μs
- ・これに信号処理回路側でのDelay設定値24.5 μsが足されるため典型的なdelayは34.5 μsとなる

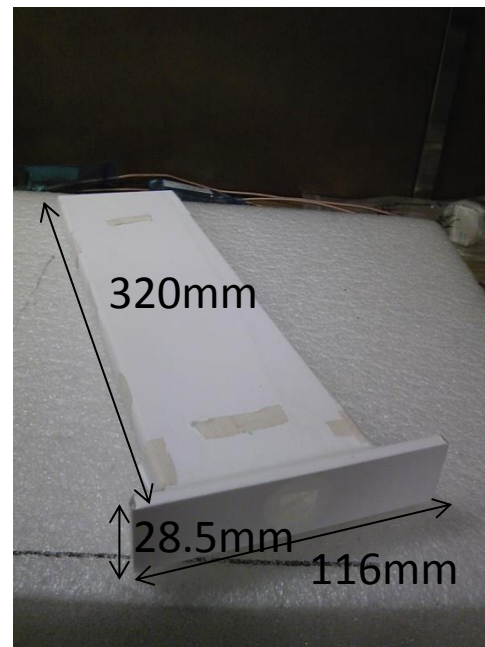
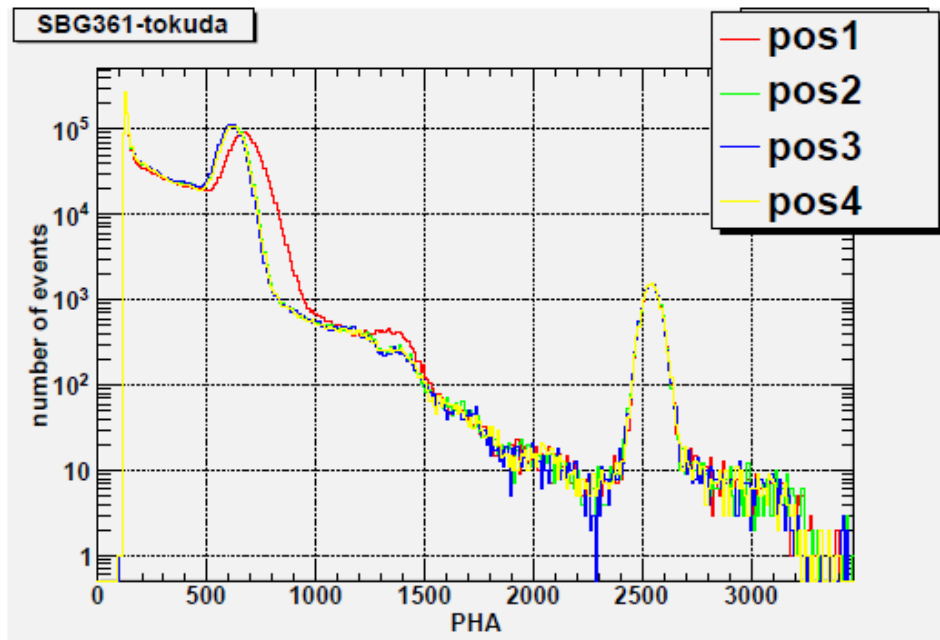
⇒現在の主検出器側でラッチ可能な値

- ・スレッシュホールドより十分高いエネルギーではほぼ100%の効率
 - ・スレッシュホールド付近では2 μs幅で60%まで落ち、幅4 μsだと90%程の効率となる。(それ以上は伸ばしてもほぼ変わらない)
- ⇒反同時計数信号幅は4 μsで進める

width 4 μs, delay 24.5 μs ということまで値を突き詰めることができた



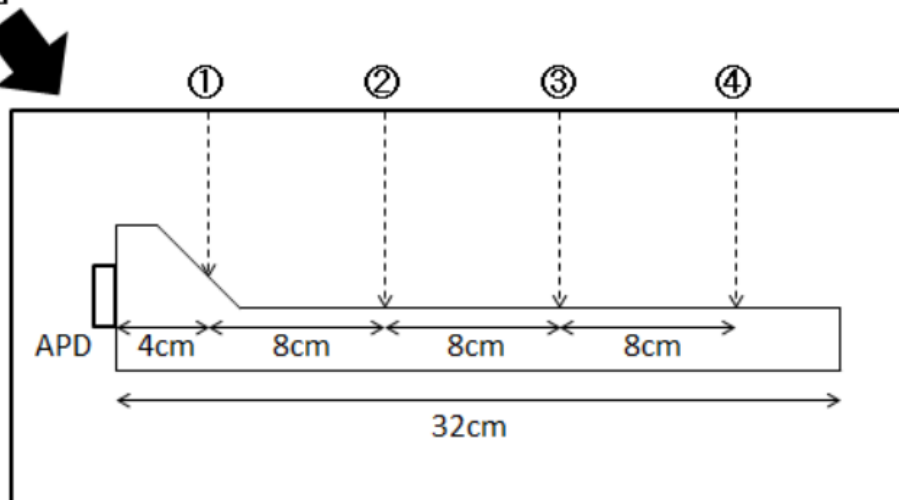
Top結晶の光量の位置依存性



線源の照射位置による光量の違い アルミ箱

位置依存性のあるTop結晶

線源照射位置



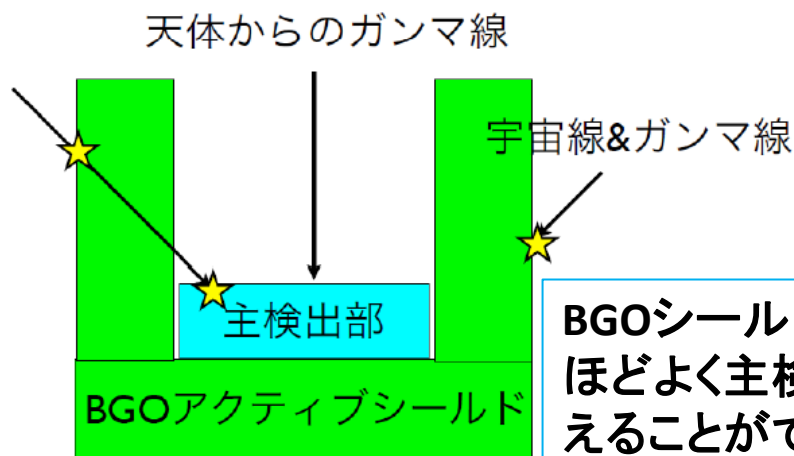
BGOアクティブシールド

BGO(ビスマスジャーマナイト:Bi₄Ge₃O₁₂)

無機シンチレータの一種、化学的に扱いやすい

有効原子番号や比重が他の無機シンチレータより大きい(原子番号83)

→**阻止能が高い**



アクティブシールド

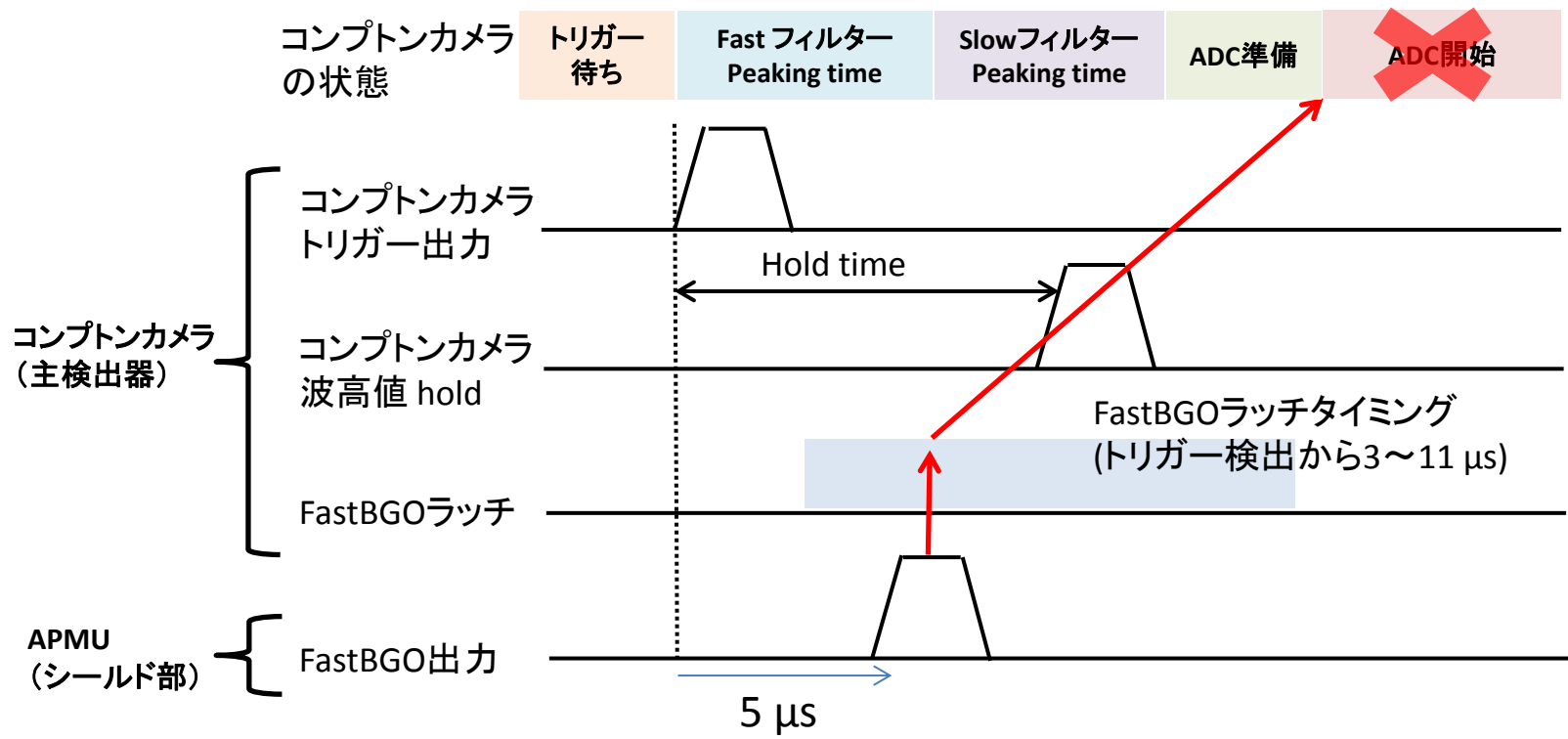
視野外からのγ線を遮蔽するシールドを検出器化

BGOシールドのSN比が良い
ほどよく主検出器のBGを抑
えることができる

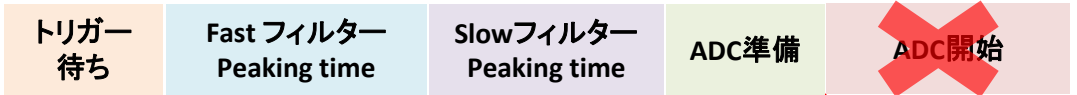


図: アクティブシールドの模式図

冷却したBGOが理想的なシンチレータ



コンプトンカメラ
の状態



コンプトンカメラ
(主検出器)

APMU
(シールド部)

コンプトンカメラ
トリガー出力

コンプトンカメラ
波高値 hold

FastBGOラッチ

FastBGO出力

Hold time

FastBGOラッチタイミング
(トリガー検出から3~11 μs)

5 μs

HITPATの要求事項と仕様

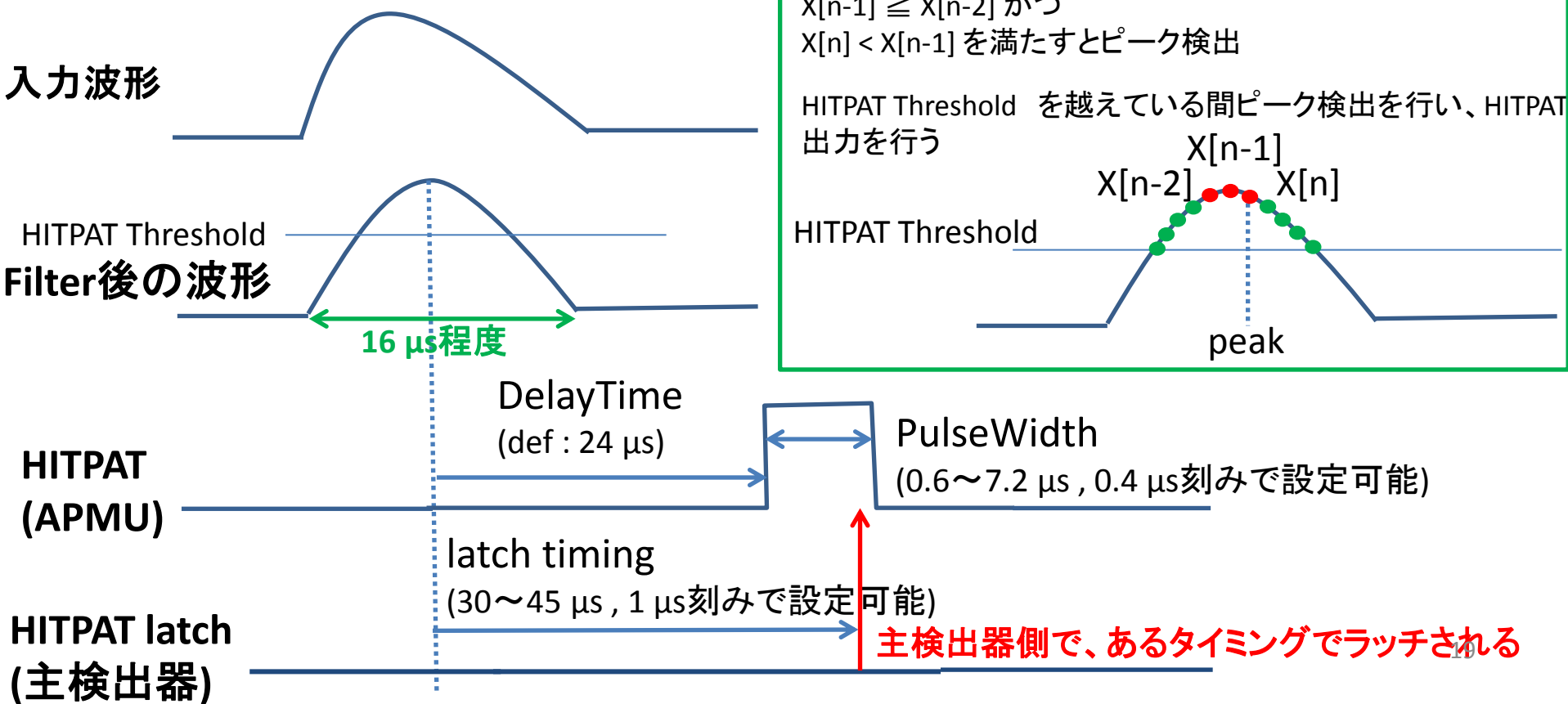
<HITPAT>

デジタルフィルターを用いてノイズを可能な限りカットし、オフラインの解析で反同時計数処理に用いる信号

・要求事項

主検出器側でのトリガー検出から、HITPATをラッチするタイミング内
(30~45 μs を1 μs 刻み)で出力する

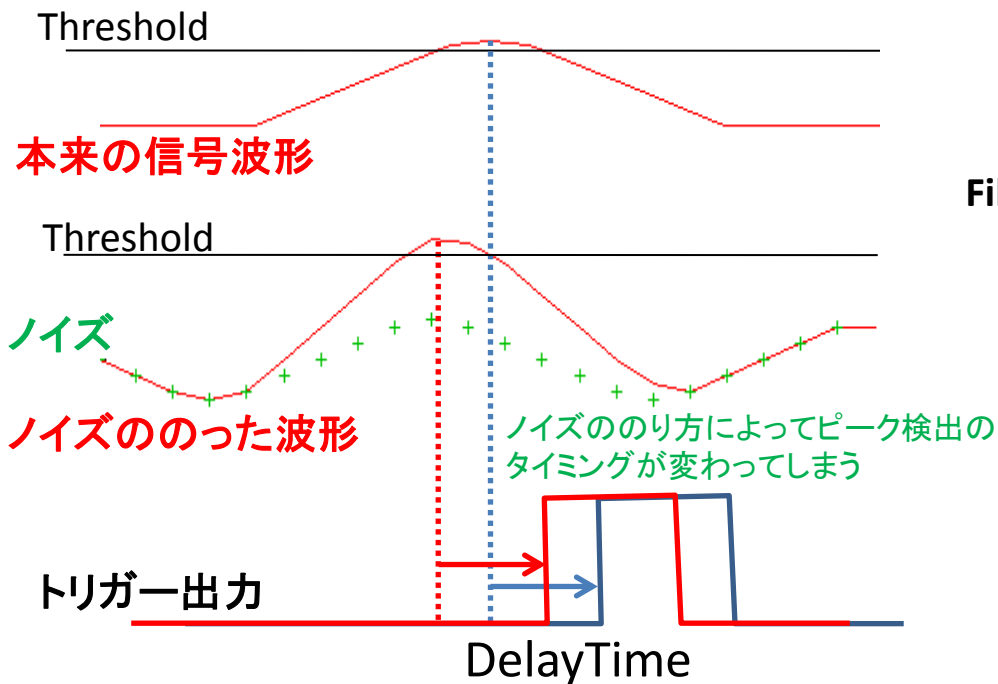
<HITPATの仕様>





反同時計数処理信号の出力タイミングの揺らぎ

Jitter

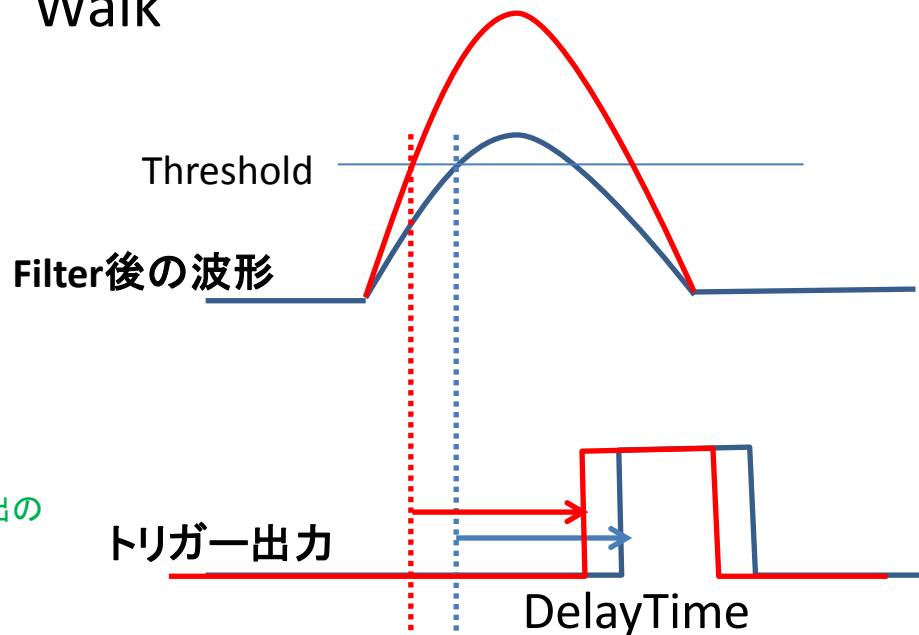


禁止信号出力のためのスレッシュホールドはできるだけ低くしたい



ノイズの影響で本来のピークとは異なるタイミングで禁止信号が出力されてしまう

Walk



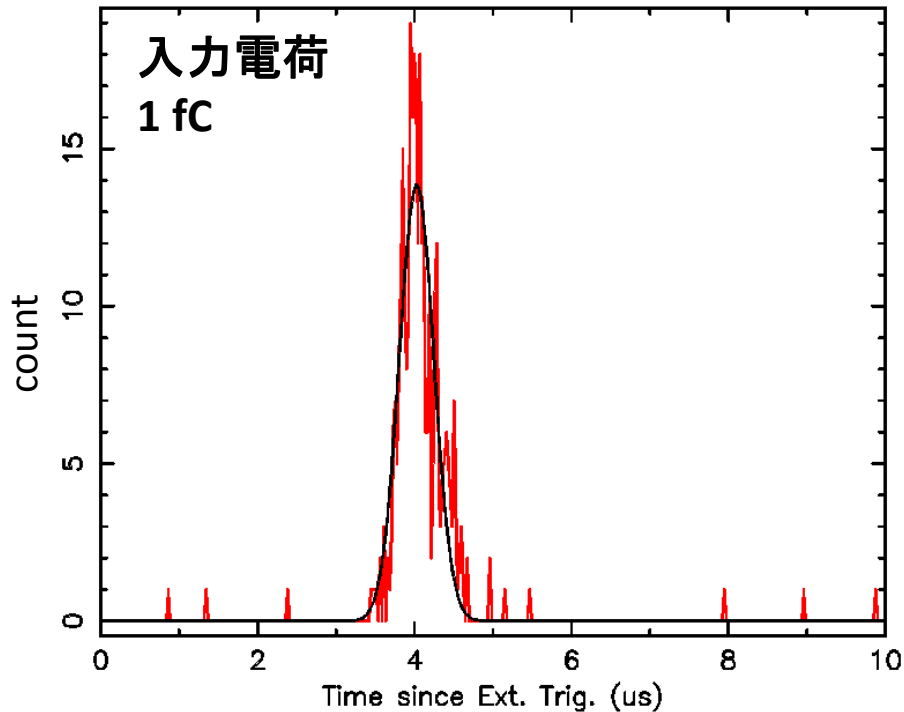
レベルオーバー判定の場合、波高値の違いによって出力タイミングが異なる



HITPATはピーク検出ロジックが含まれているため、Walkの影響は小さいと考えられる

FastBGO Jitter, Walk測定結果

▪ Jitter

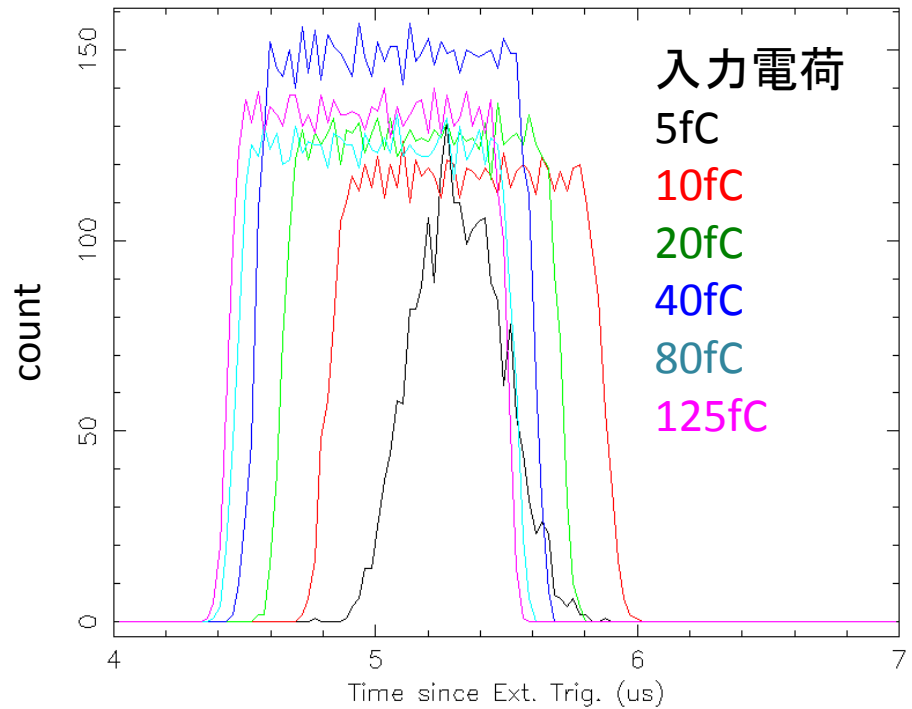


スレッシュホールドをノイズぎりぎりに設定(1fC相当)

スレッシュホールド付近でのノイズによる広がり
はFWHMで0.5-1.0 μs

トリガー出力までの時間は4.0 μs

▪ Walk

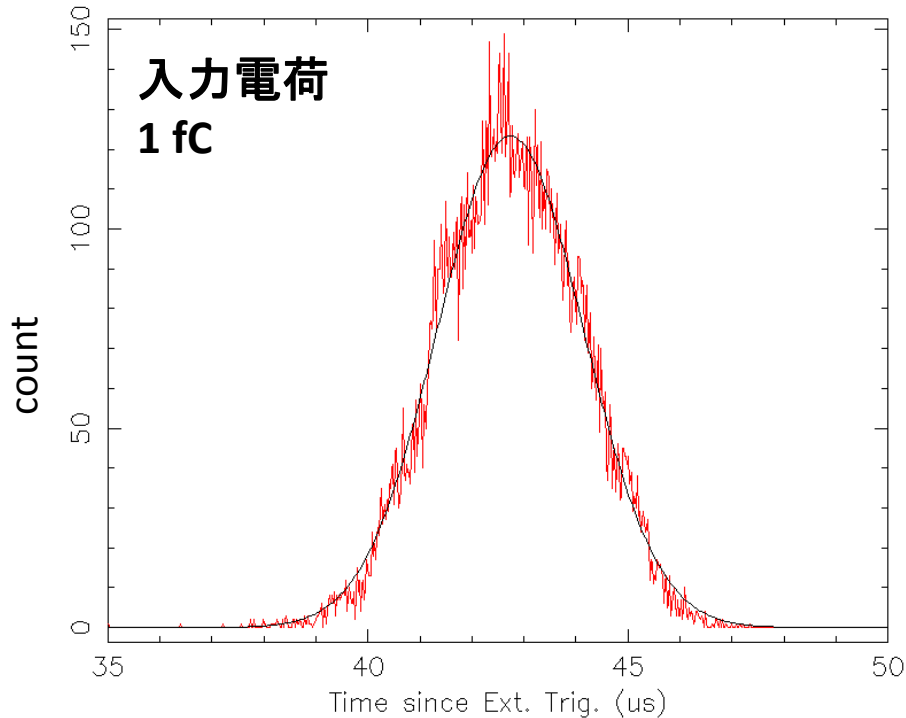


スレッシュホールドをノイズの影響しない程度
に設定(5 fC相当)し、入力電荷を変えて測定。

入力電荷(波高値)に依存して、FastBGOの
出力が0.5 μs 程度前後することが分かった。

HITPATのJitter,Walk測定結果

▪ Jitter

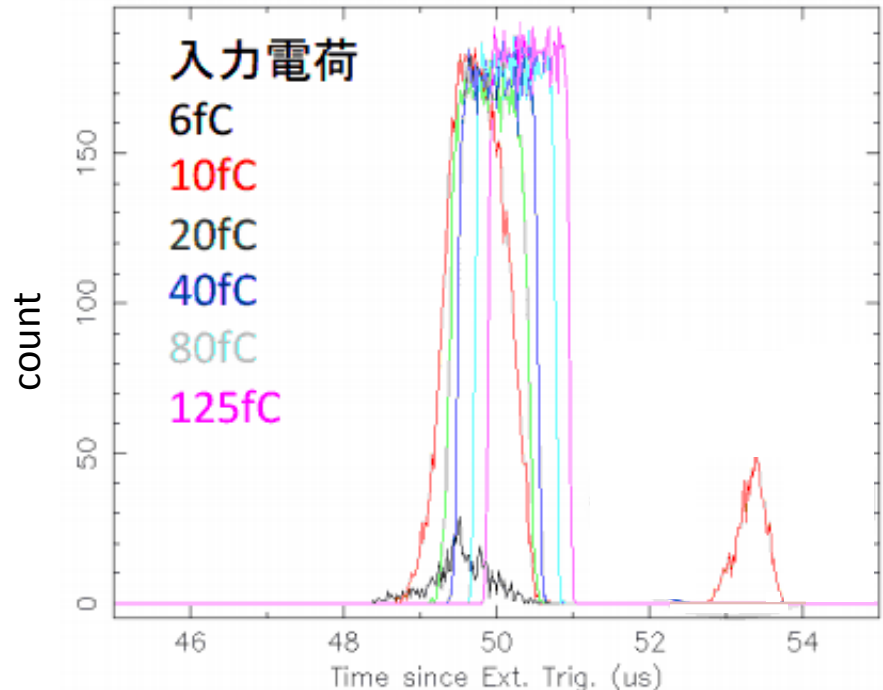


スレッシュホールドをノイズぎりぎりに設定(0.8 fC相当)

スレッシュホールド付近でのノイズによる広がり
はFWHMで3.3 μs

トリガー出力までのタイミングは42.3 μs

▪ Walk

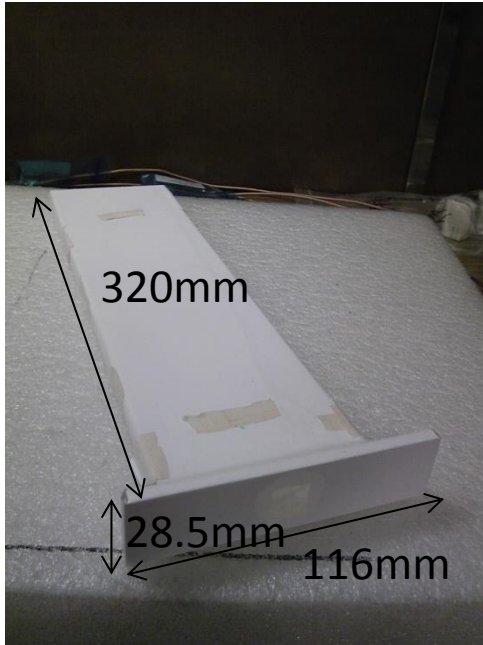


スレッシュホールドをノイズの影響しない程度
に設定(5 fC相当)し、入力電荷を変えて測定。

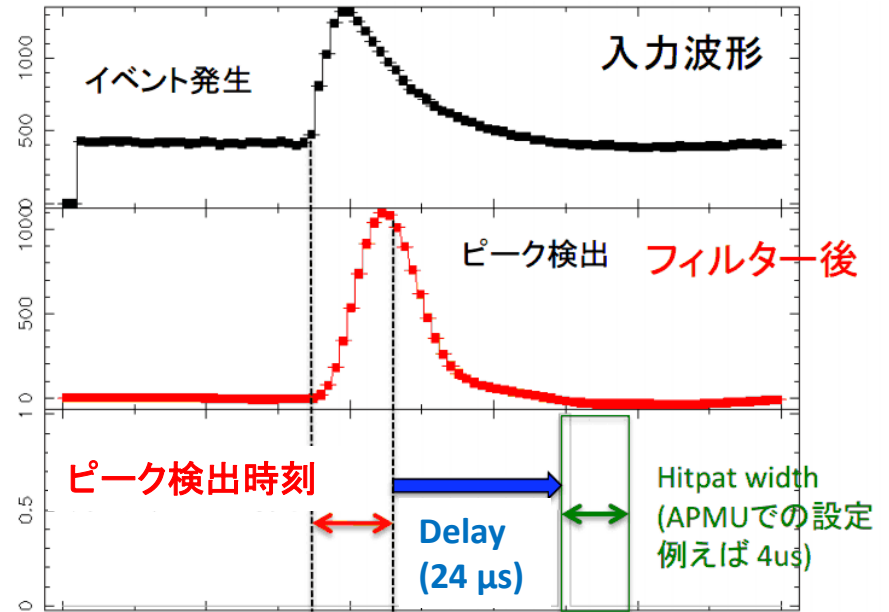
walkは1 μs 以下(波形の長さが約20 μs 程度)

ピーク検出ロジックが上手く働いており、
walkの影響はほぼないことが確認できた。

実際のBGO信号での検証



今回の測定に用いたSGD-D2結晶
APMUの最終アナログ回路を使って測定



HITPAT latch
(主検出器)

主検出器側で、デフォルト35 μ sでラッチされる

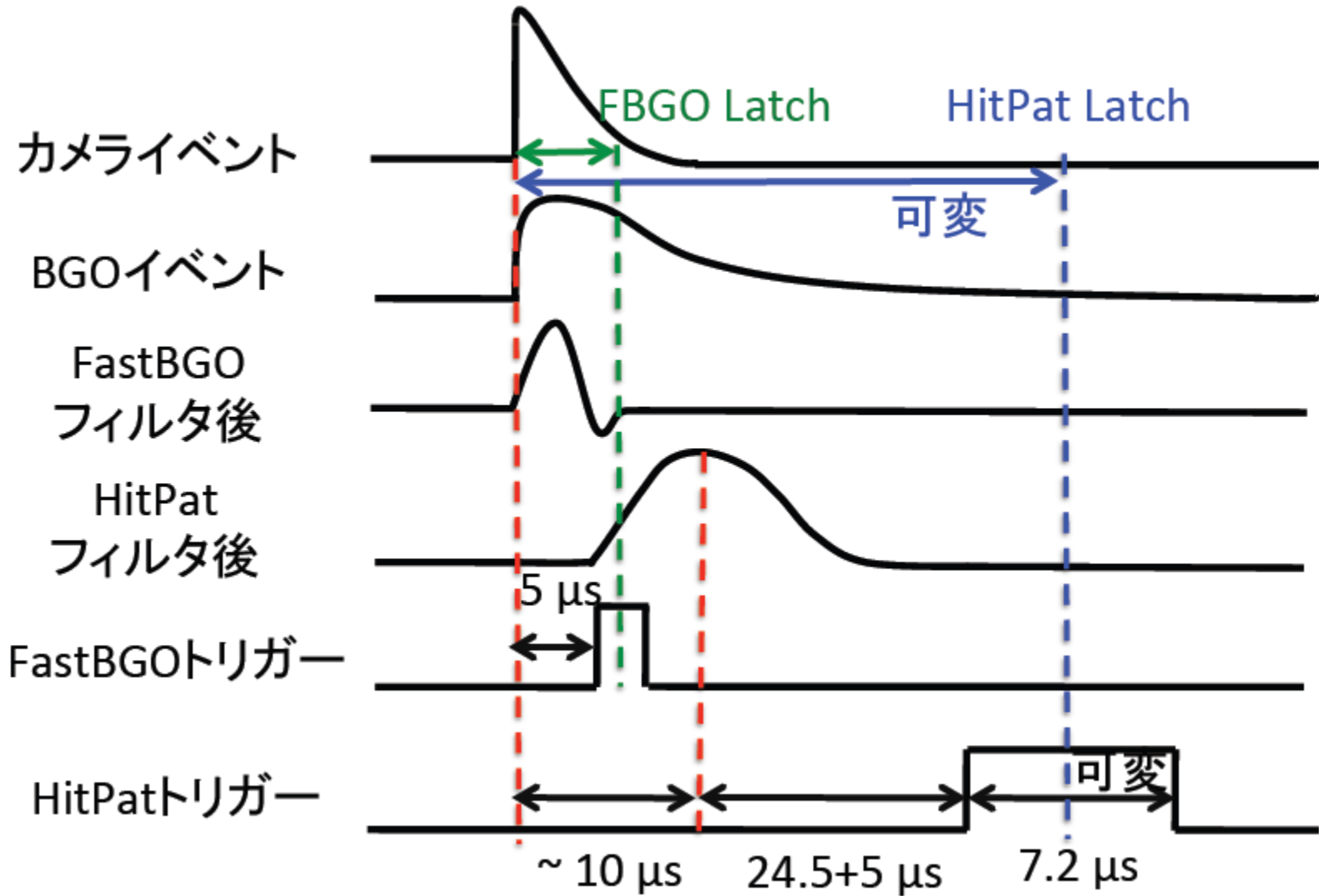
波形データを取得し、**ピーク検出時刻**を求め、**delay**と**width**を付けたHITPATのタイミングを算出

主検出器側からのラッチタイミングは以下に相当

ピーク検出時刻 + **delay(24 μ s)** + **HITPAT width/2**

実際のHITPATの効率を考慮したスペクトルを算出した

FastBGO,HITPAT出力タイミング

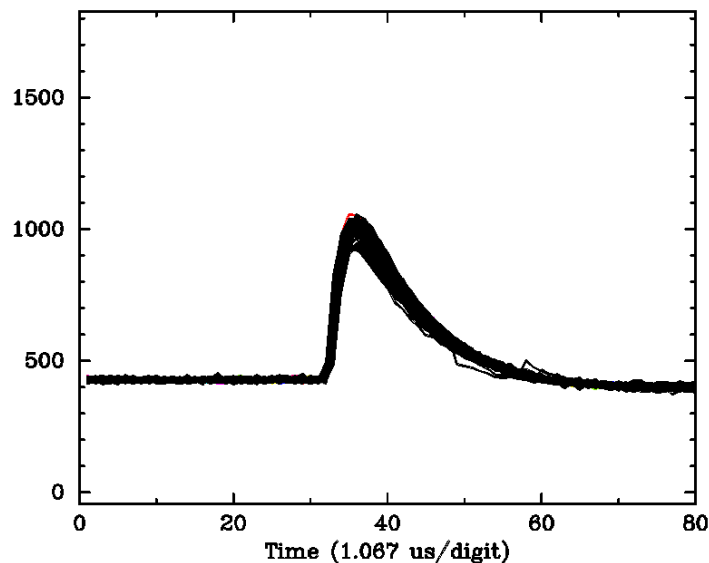


HITPAT出力タイミング = peaking time + delay + pulse width/2 $\sim 43 \mu$ s
カメラ側でLatchするタイミングは、30 \sim 45 μ sの範囲から選択

ヒットパターン効率スペクトル

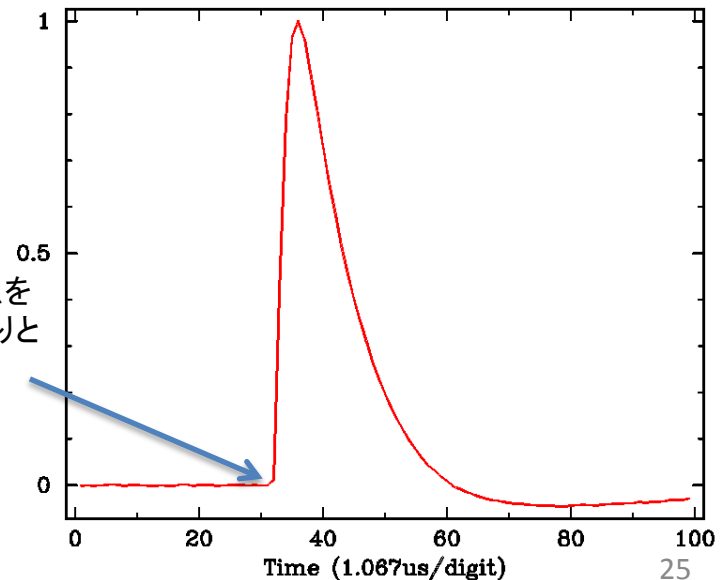
ヒットパターン効率スペクトルは、fast trigger を越えた物しか計数しないので、本来のヒットパターンスレッシュホルド付近の振る舞いが分からなかった。今回、波形の立ち上がりタイミングをテンプレートフィッティングで決めることで、本来のヒットパターンスレッシュホルド付近での効率を調べた。

フィルター前の波形をテンプレートとする。
テンプレートからはノイズの影響を除きたいので¹³⁷Cs 662 keV 付近で単発波形を100 サンプルほど加算平均した。

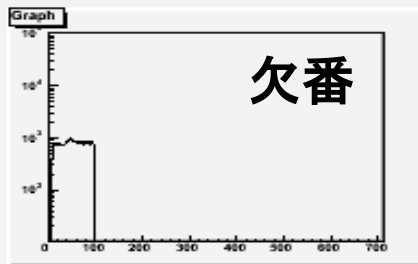
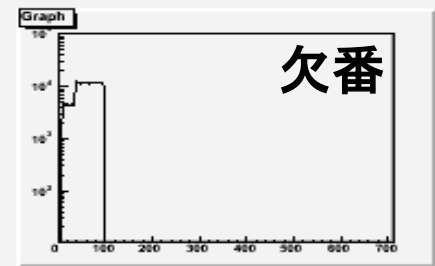
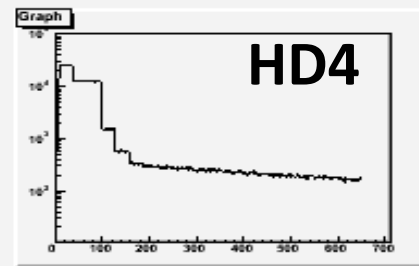
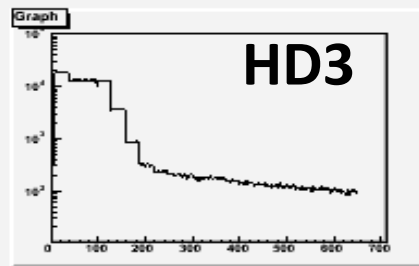
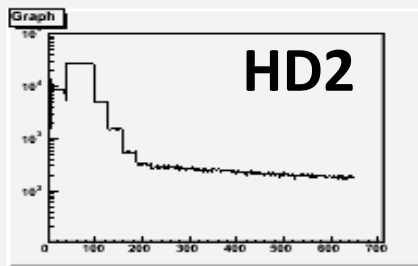
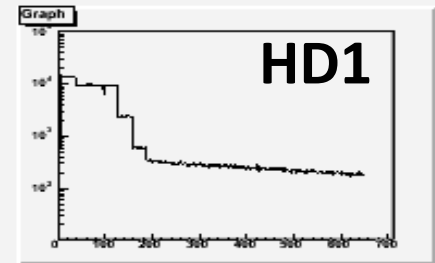
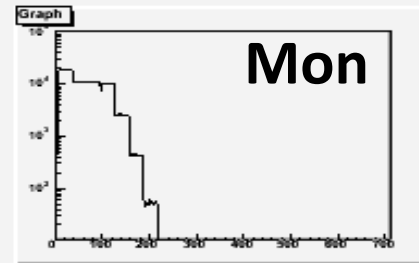
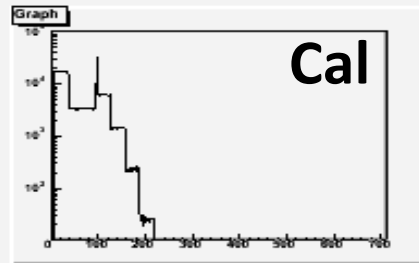
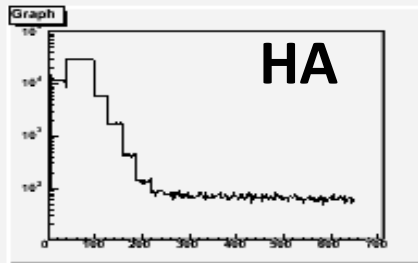
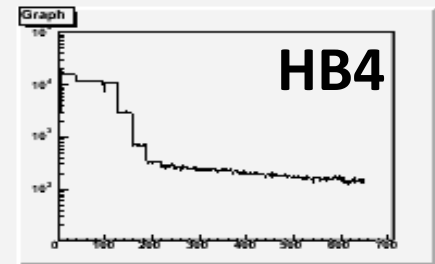
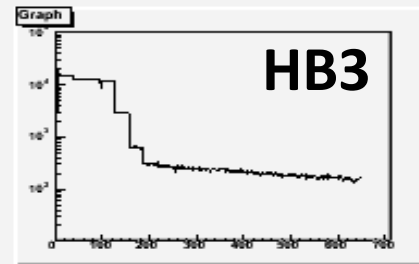
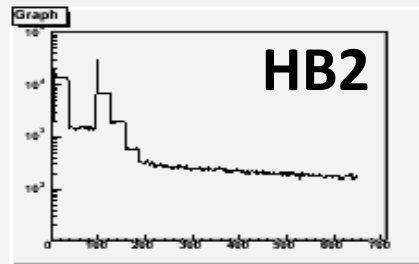
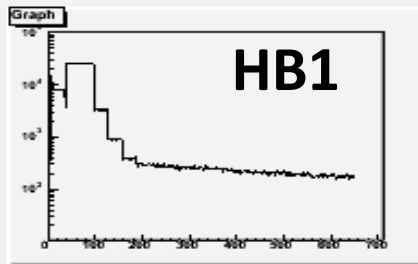


イベント開始原点を
波形の立ち上がりと
定義する
($T=32\text{digit}$)

加算平均後に、オフセットを除き、
ピークで規格化。
この波形をフィッティングに用いる。



LDスキャン(HITPAT)



各チャンネルのHITPATライトカーブ
一定レベルから一つ前のLDレベルを採用
上空でのオペレーションを考え、自動で
LDスキャンできるようにした

LDスキャン 自動化コマンド

```
#!HEAD: dcsm-APMULDScan 2013-11-05 13:10:11 63 47 ASTRO-H DCSM //
8001 . #FastBGO and Hitpat LD scan (10-110 5step (FBGO) 5-105d 5step (HPAT) 30 sec each)
8002 HXI1.APMU.SET_ADC_FBGO 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 0 3 1
8003 HXI1.APMU.SET_ADC_HIT_PAT 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 0 0x11
8004 HXI1.APMU.GET_PRM
8005 WAIT_SEC 30
8006 HXI1.APMU.SET_ADC_FBGO 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 0 3 1
8007 HXI1.APMU.SET_ADC_HIT_PAT 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 0 0x11
8008 HXI1.APMU.GET_PRM
8009 WAIT_SEC 30
8010 HXI1.APMU.SET_ADC_FBGO 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 0 3 1
8011 HXI1.APMU.SET_ADC_HIT_PAT 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15 0 0x11
8012 HXI1.APMU.GET_PRM
8013 WAIT_SEC 30
```

30 秒ごとにLD設定値を変更(5d刻み)するコマンドの一部

HITPATとFastBGOのLDを設定した後、GET_PRMでその設定値を適用させている