

MeVガンマ線観測実験SMILE-3へ向けた TPC信号読み出し基板の開発

京都大学 宇宙線研究室

塚本 博文

目次

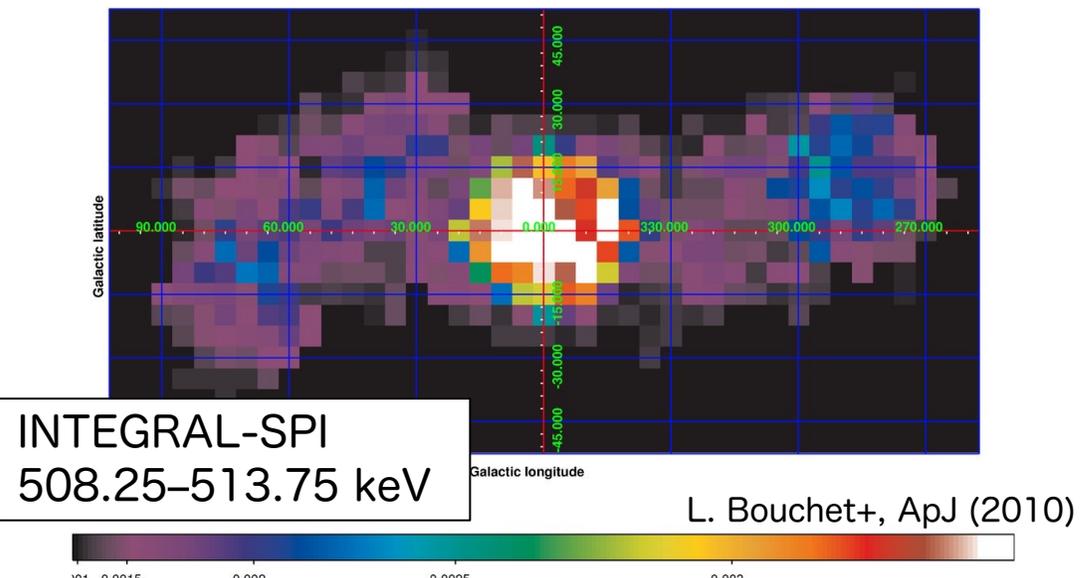
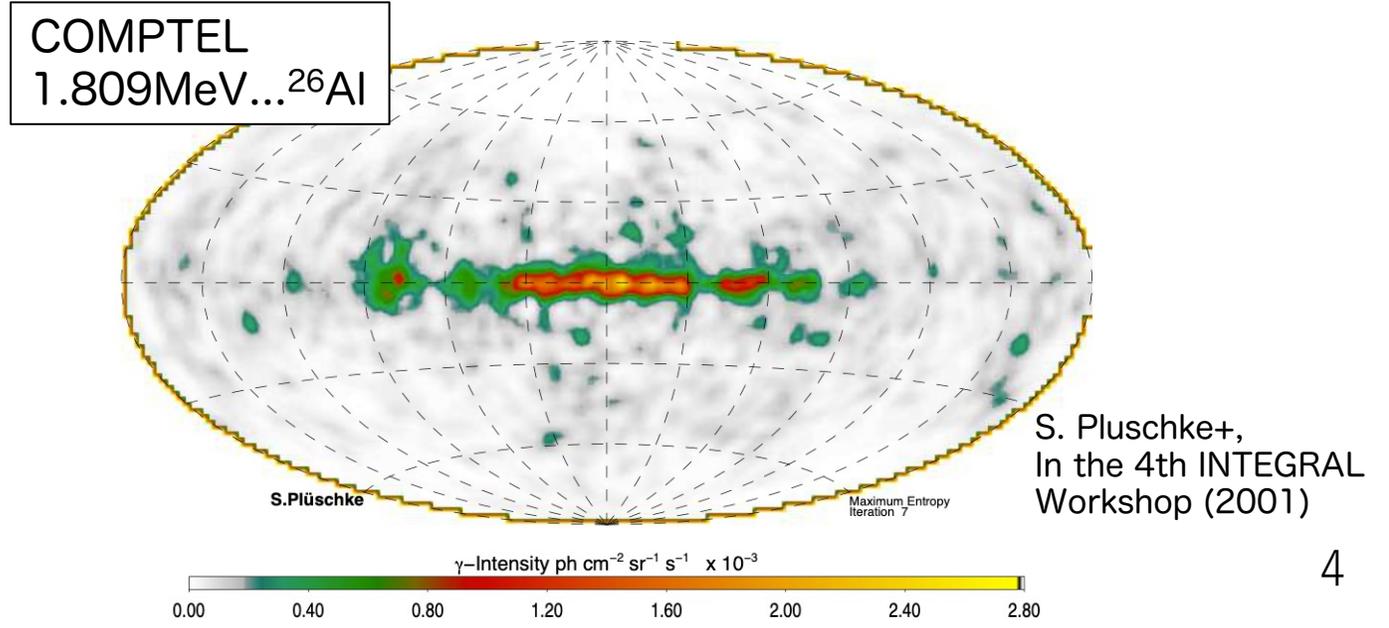
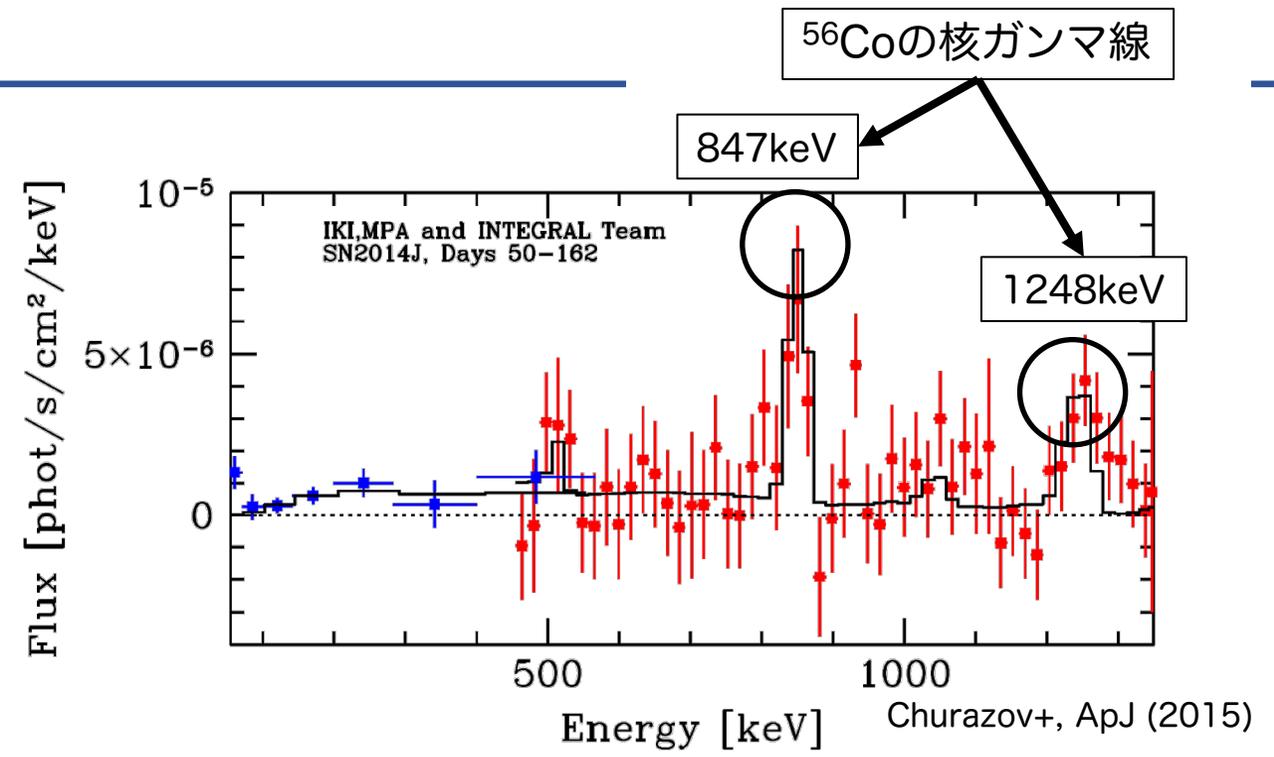
- MeVガンマ線天文学
- 高感度MeVガンマ線検出器 ETCCとSMILE計画
- TPC信号読み出し基板・開発状況

目次

- MeVガンマ線天文学
- 高感度MeVガンマ線検出器ETCC・SMILE計画
- TPC信号読み出し基板・開発状況

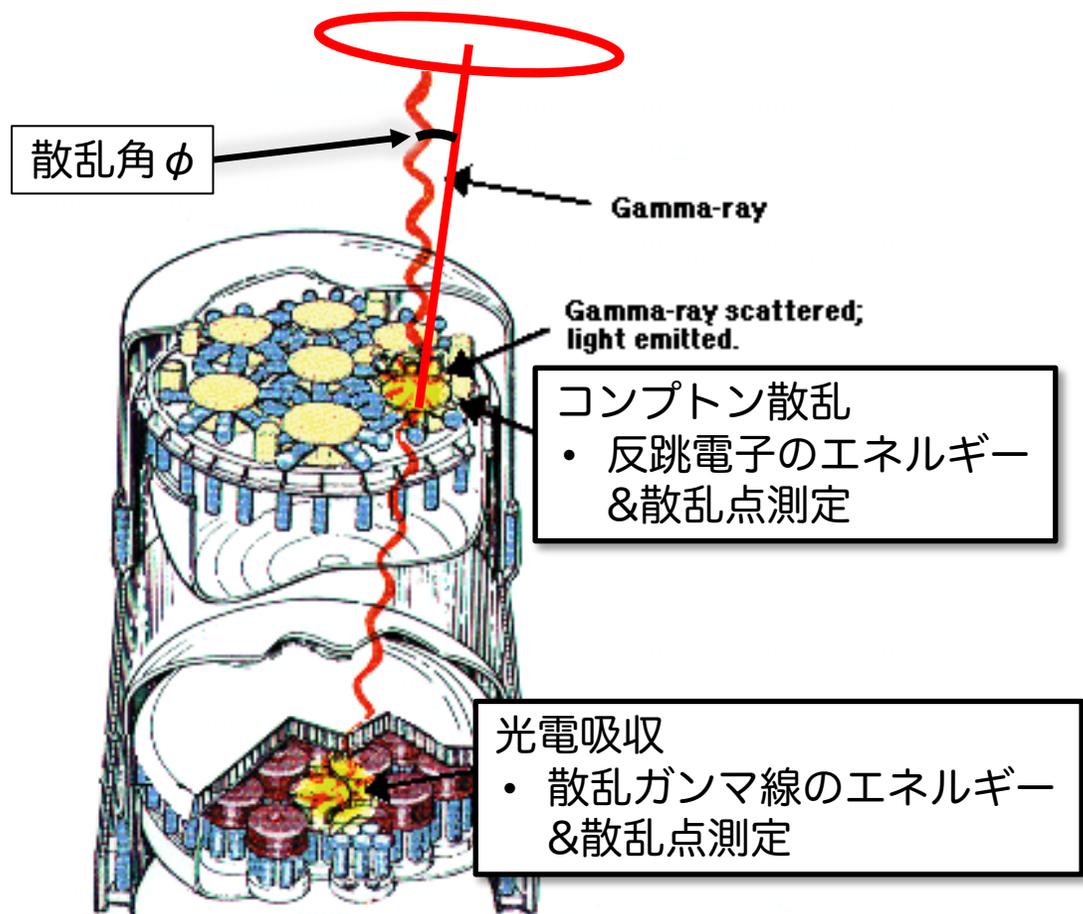
MeVガンマ線領域のサイエンス

- 放射性同位体の崩壊に伴う核ガンマ線
 - 超新星爆発中での元素合成プロセスの解明
 - 銀河系内での元素拡散
- 電子陽電子対消滅線@511keV
 - 陽電子起源の特定

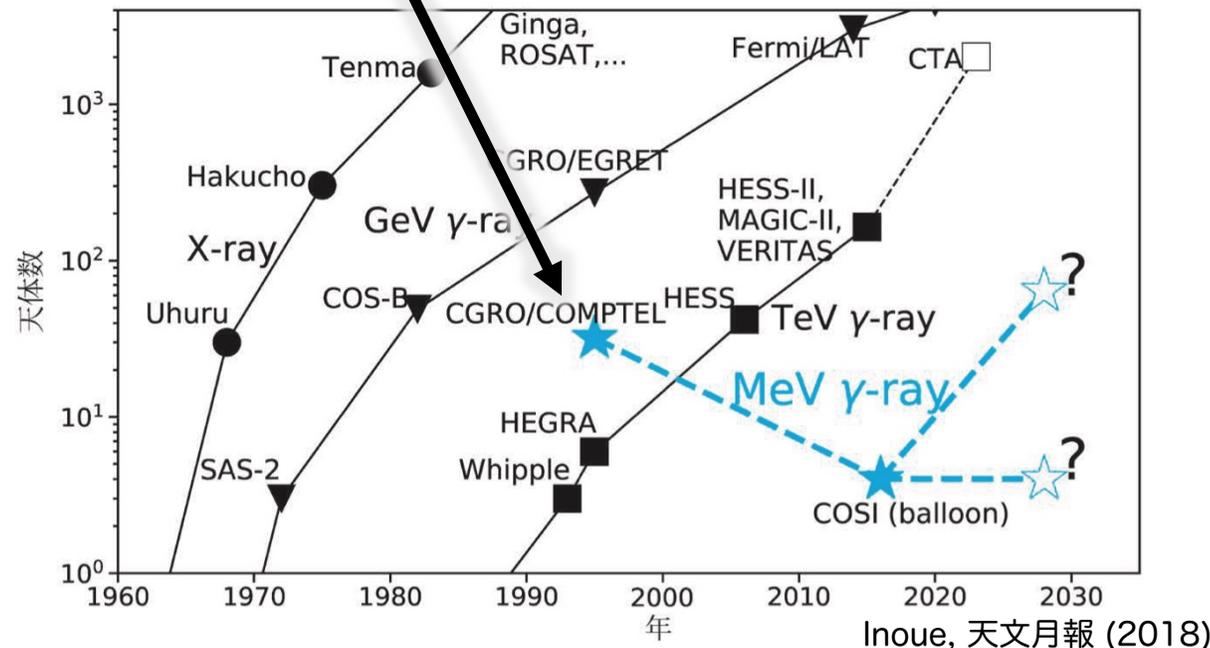


MeVガンマ線観測の現状

従来コンプトン法 (Ex. COMPTEL)



NASA, Collaboration across cultures より



- コンプトン散乱の式から、入射ガンマ線の散乱角 ϕ しか分からない

$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma + E_e} \right)$$

- 到来方向を円環上 E_γ ... 散乱ガンマ線のエネルギー, E_e ... 反跳電子のエネルギー



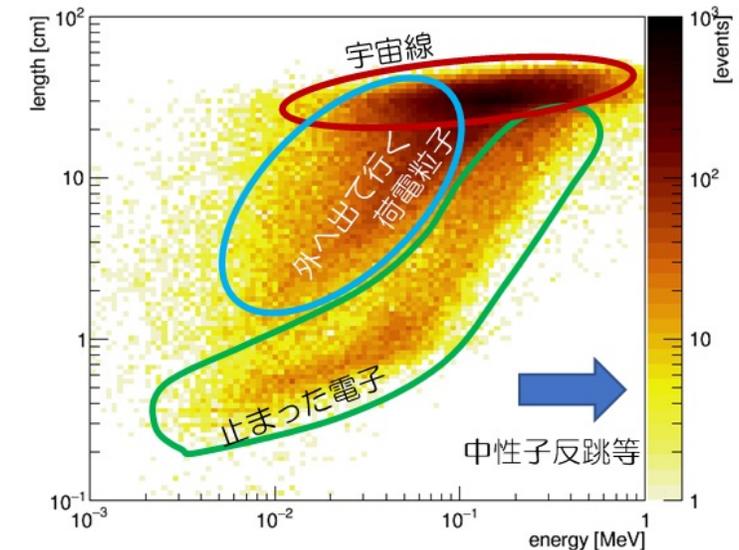
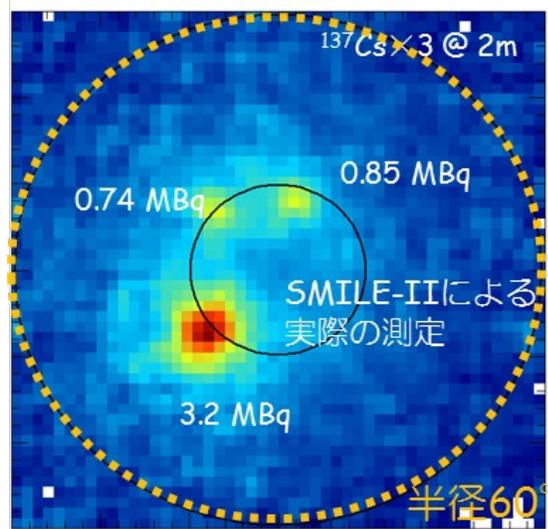
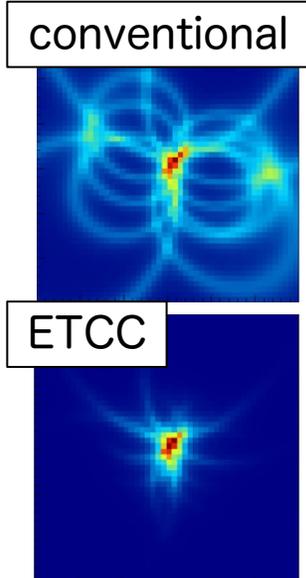
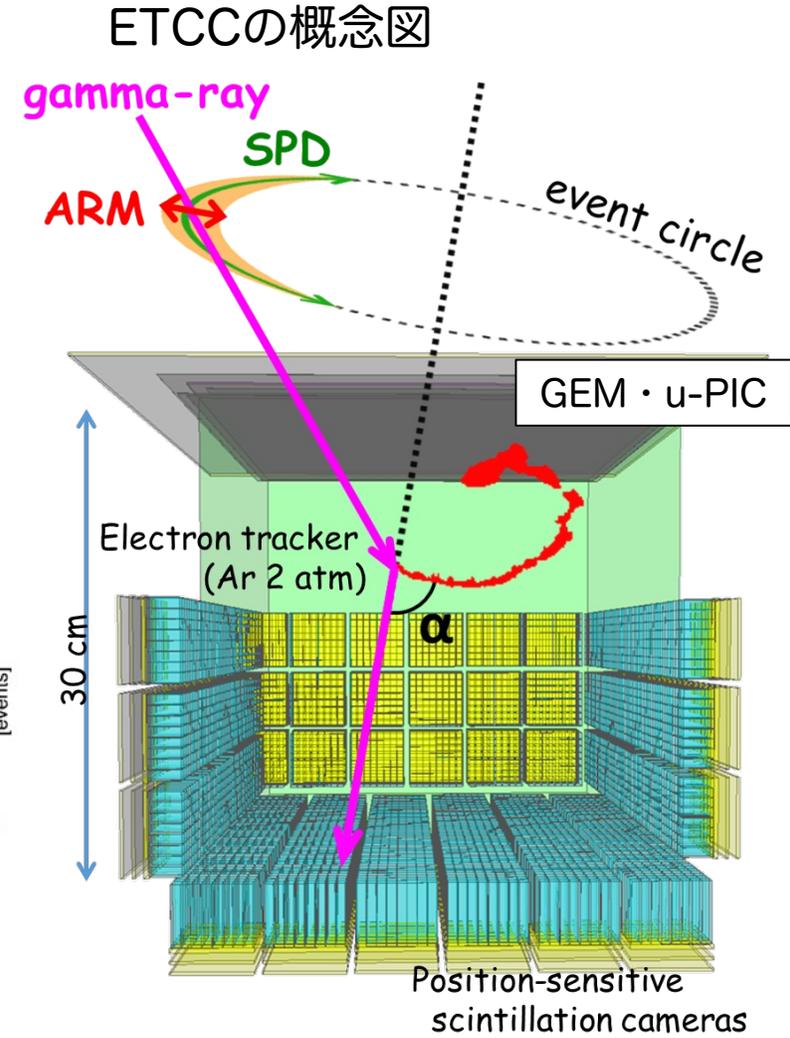
反跳電子の飛跡が取得できれば、ガンマ線到来方向を一意に決定可能

目次

- MeVガンマ線天文学
- 高感度MeVガンマ線検出器ETCC・SMILE計画
- TPC信号読み出し基板・開発状況

Electron-Tracking Compton Camera

- TPCガス飛跡検出器：反跳電子のエネルギー，散乱飛跡
シンチレータ：散乱ガンマ線のエネルギー，吸収点
 - ガスTPCによって電子飛跡の取得を可能に
運動量の和から入射光子の方向を一意に決定可能
 - 観測領域外のガンマ線をイメージングにより排除可能
 - ガンマ線以外の雑音除去能力
 - 荷電粒子のエネルギー損失から粒子識別が可能
 - 検出した散乱事象が運動学的に可能か判定 (α 角テスト)



Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments

✓ **SMILE-I** (2006年, 三陸, 4h)

- 宇宙拡散/大気ガンマ線の観測
- dE/dxを用いたBG除去

有効面積 1 mm²

Xe + Ar 1 atm

A. Takada+, JPSJ (2009)

A. Takada+, ApJ (2011)

✓ **SMILE-2+** (2018年, Alice Springs, 26h)

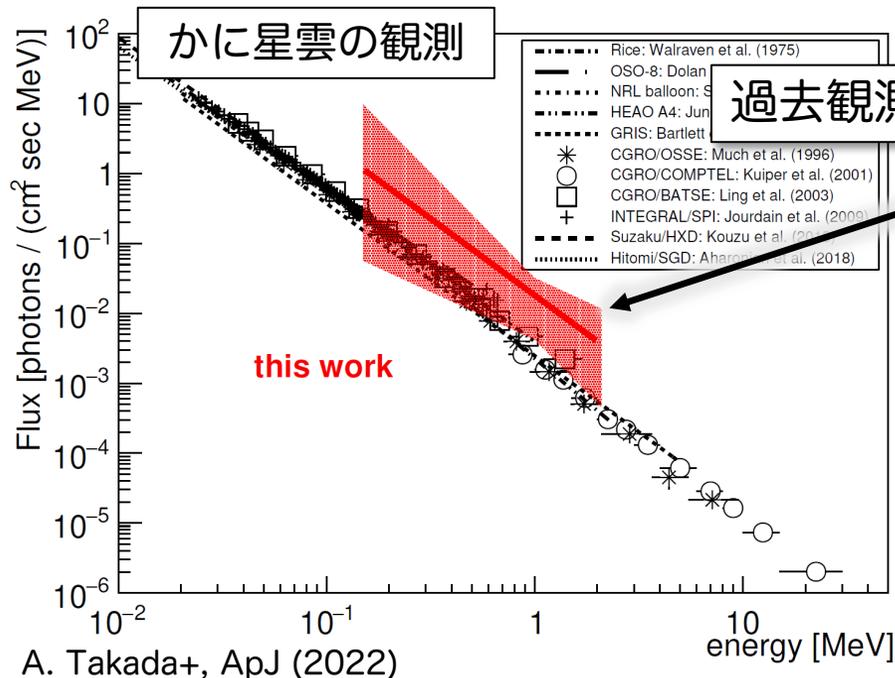
- 初の全単射望遠鏡による天体観測
- 予想検出感度を達成
- 銀河中心領域 (~8σ), かに星雲 (~4σ)を検出

有効面積 1 cm²

Ar 2 atm

T. Tanimori+, J. Phys CS (2020)

A. Takada+, ApJ (2022)

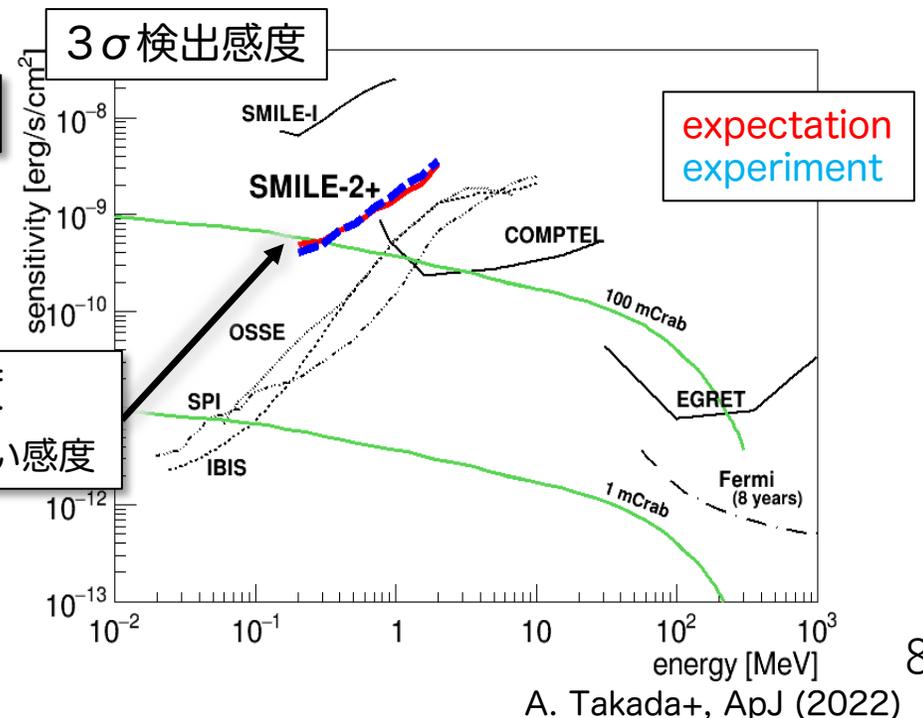


過去観測と誤差範囲で矛盾ない結果

地上実験と同様の検出感度

ex. COMPTELは予想より3倍悪い感度

V. Schönfelder, NewAR (2004)



SMILE-3 (2027年)で科学観測へ

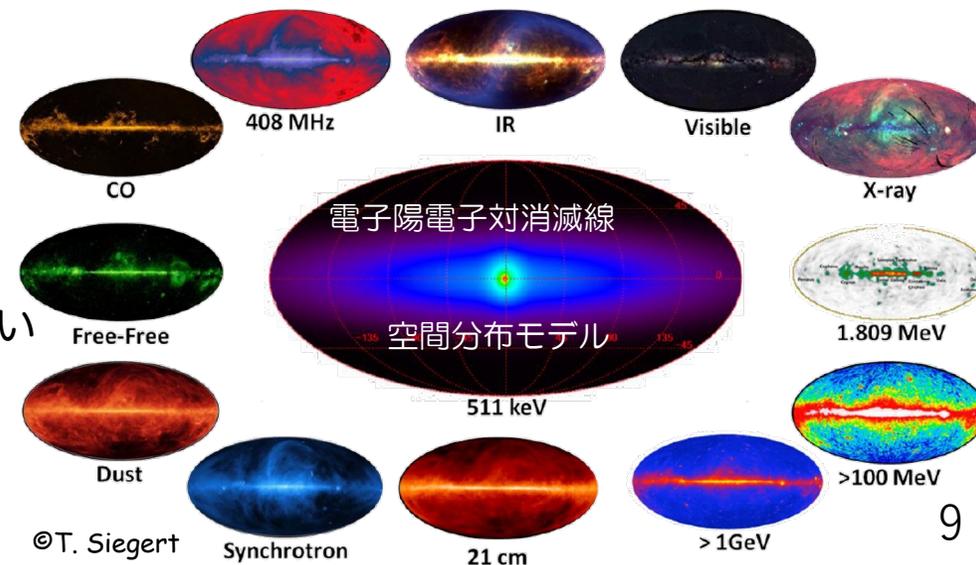
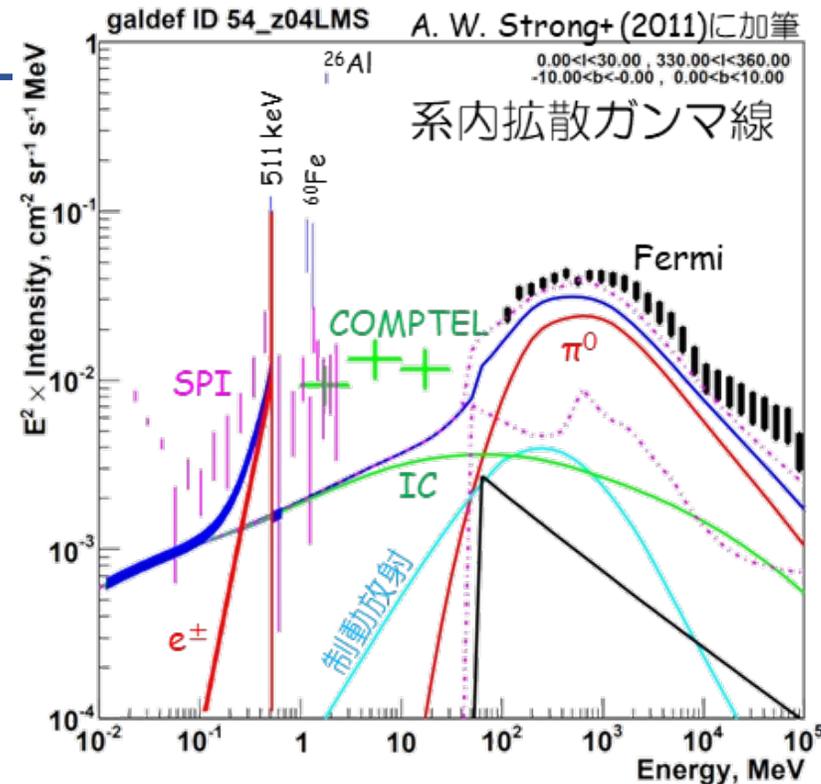
- 銀河系内拡散MeVガンマ線
 - 逆コンプトン散乱で期待されるよりも強い
 - MeVに特徴的な放射の存在
- 電子陽電子対消滅線
 - 銀河中心に他波長とは異なる強い放射
 - 陽電子の起源が不明



- 放射起源候補
 - 暗黒物質：軽いWIMPの対消滅・崩壊
 - 原始ブラックホール： $\sim 10^{16-17}$ → \sim MeVでHawking輻射
 - 多数の天体の集まり：MeVに特徴的な放射を持つ天体は未発見
 - 宇宙線と星間物質との相互作用：計算では逆コンプトン散乱よりも暗い

起源解明には

詳細なスペクトル+広い領域の放射強度分布が必要



© T. Siegent

SMILE-3へ向けた改良点

Now

有効面積 5~10 cm²
CF₄-base 3 atm

➤ SMILE-3 2027年 @オーストラリア

- 長時間気球を用いた科学観測
 - 銀河中心領域 ⇒ e[±]対消滅線・系内拡散ガンマ線
 - 銀河面 ⇒ ²⁶Al・⁶⁰Fe
 - 高銀緯領域 ⇒ 系外拡散ガンマ線・GRB
 - かに星雲・Cyg X-1・Cen A・新天体探査
- 数年に1度程度の頻度で複数回の気球観測

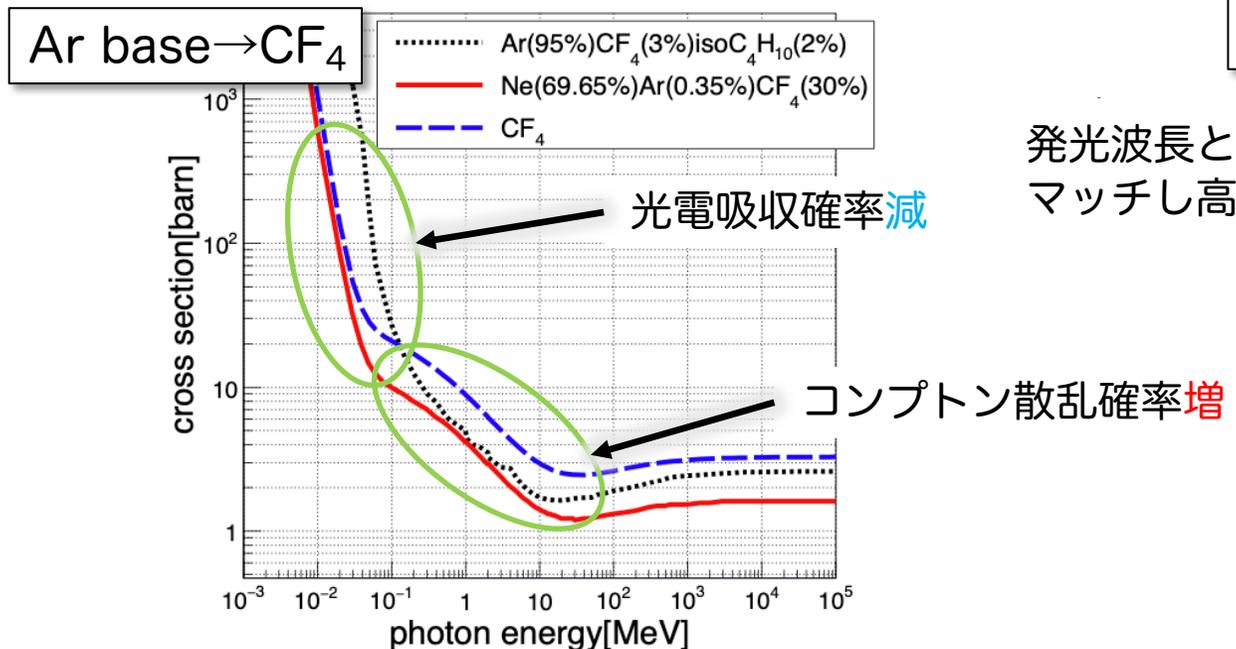
南半球：
SPB @ 中緯度
ZPB @ 南極
(NASA)
ZPB @ 中緯度
(JAXA)

北半球：
ZPB @ 中緯度 (NASA)
ZPB @ 高緯度 (SSC, NASA)

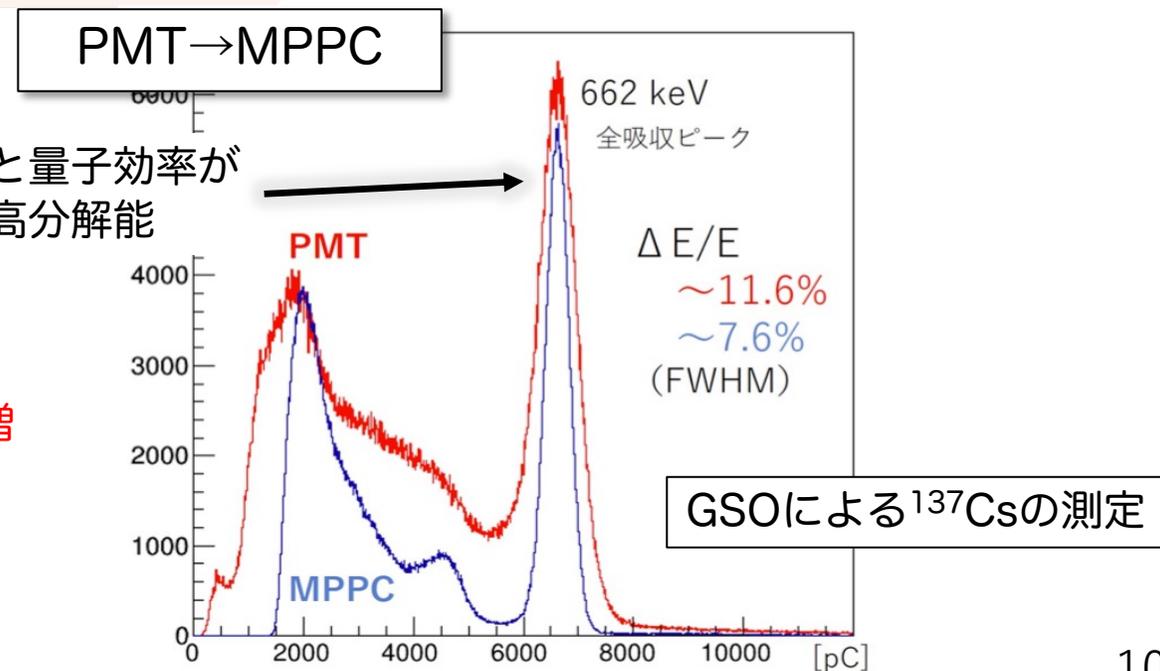


SMILE-3での目標

- 有効面積 5~10倍
- 空間分解能 3倍
- 観測時間 ~30倍



中村M論, 京大 (2017)



斎藤M論, 京大 (2019)

目次

- MeVガンマ線天文学
- 高感度MeVガンマ線検出器ETCC・SMILE計画
- TPC信号読み出し基板・開発状況

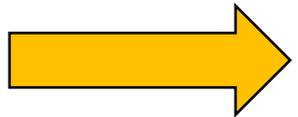
TPC信号読み出し基板 改版背景

SMILE-2+ではFPGA Spartan6を使用していたが…

- Spartan6のPROMが製造中止に
 - Xilinxが製造・供給していたもので、代替品が無い
- Spartan6 のサポートが止まっている
 - サポート終了したISEでしかコンパイルできない
 - VivadoはSpartan7以降しか対応していない



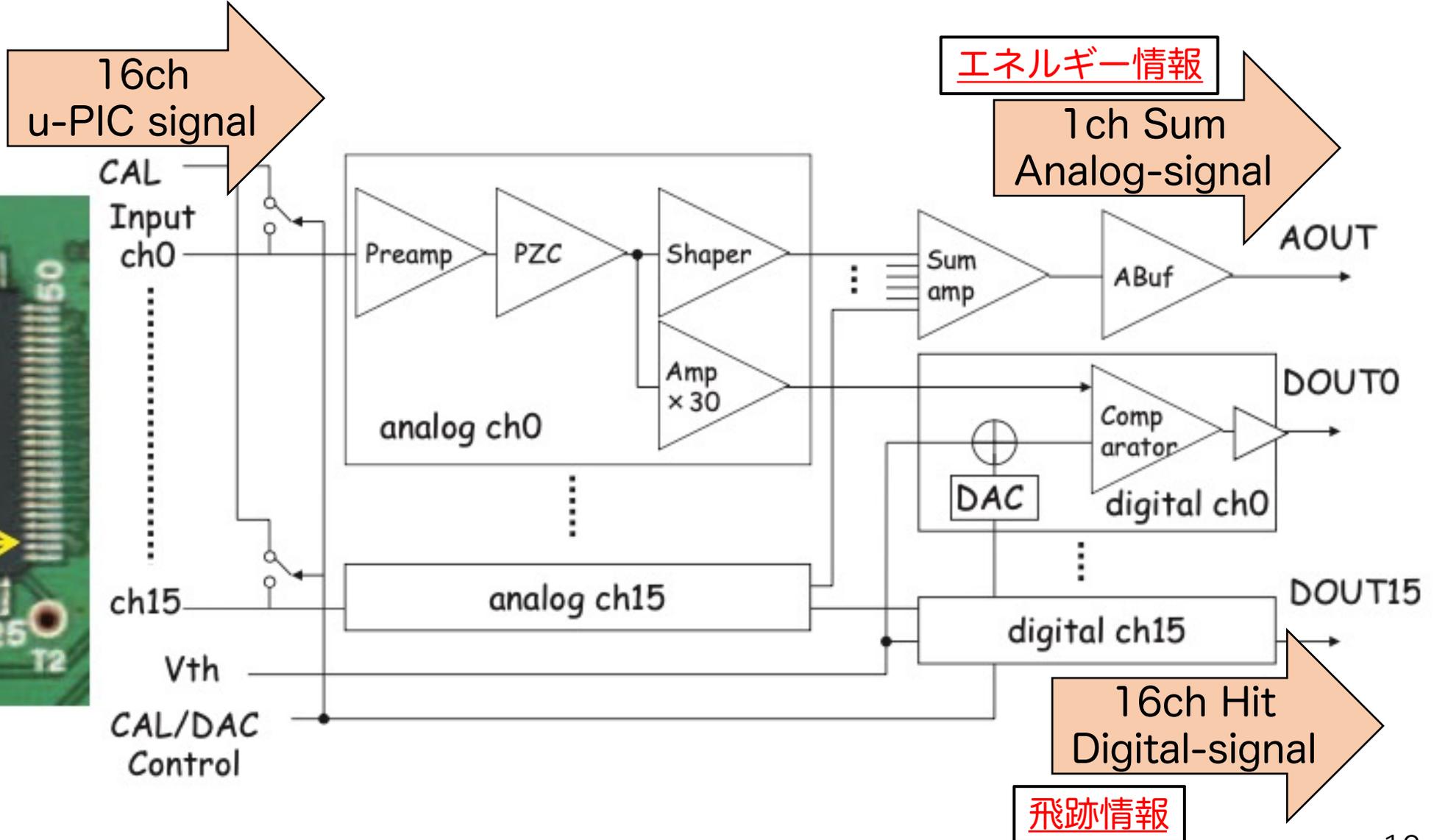
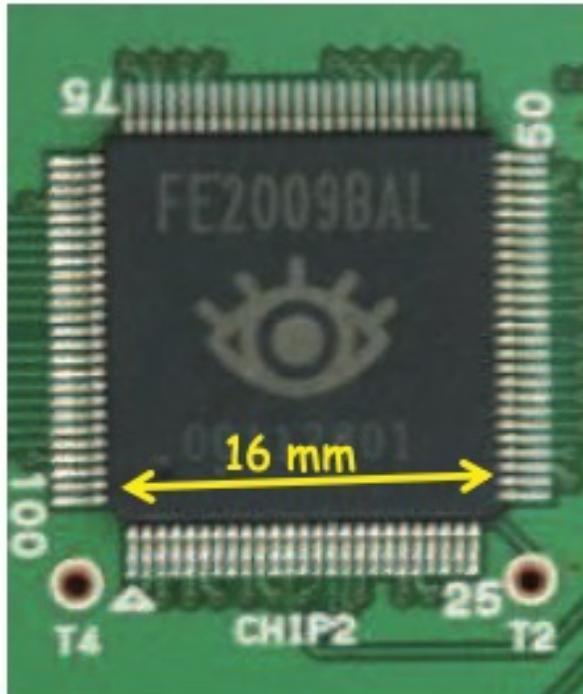
ヒューマンデータより



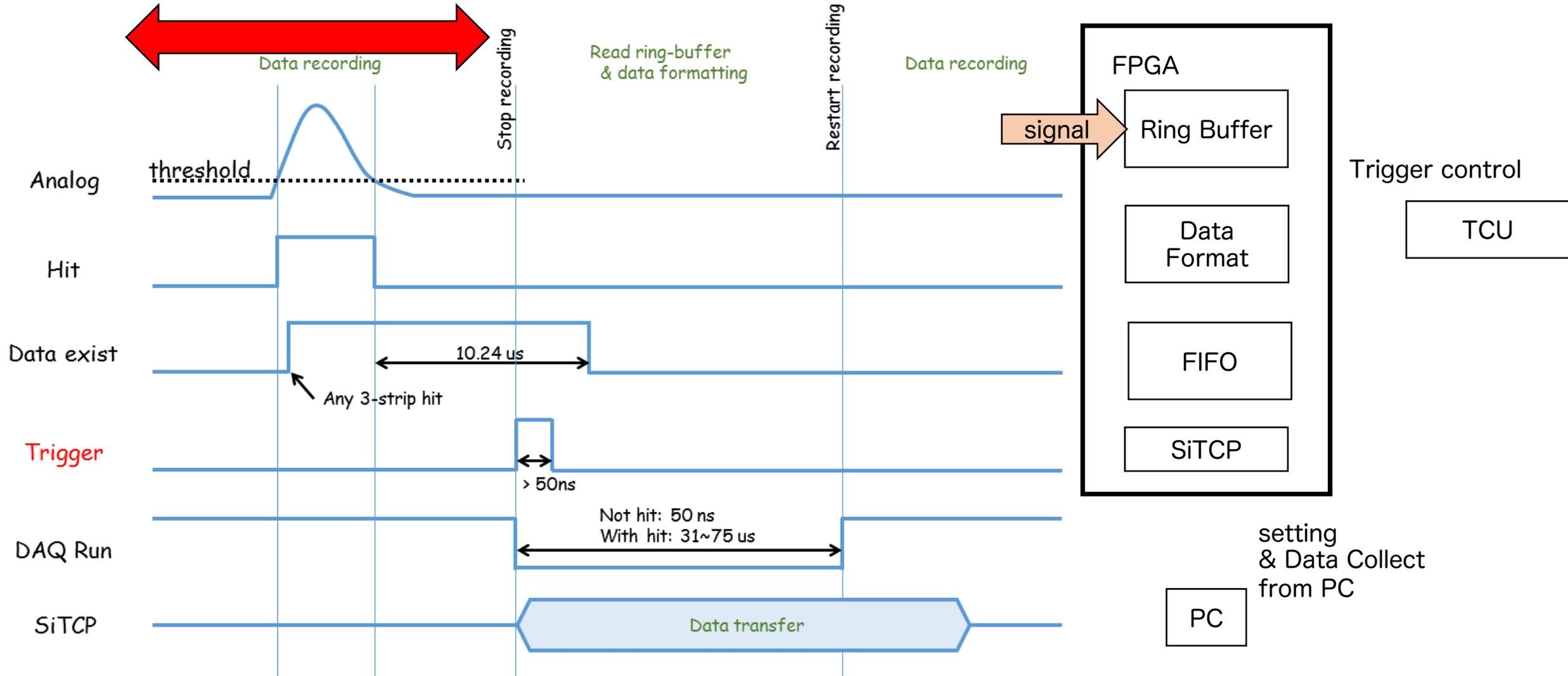
SMILE-3に向けて、Spartan7で基板の再設計を行うことに

- 追加の変更点
 - ± 2.5V電源ON/OFF(ASIC用)をFPGAで制御
 - 基板ごとのClock同期
 - ETCCの大型化に伴う基板の枚数の追加

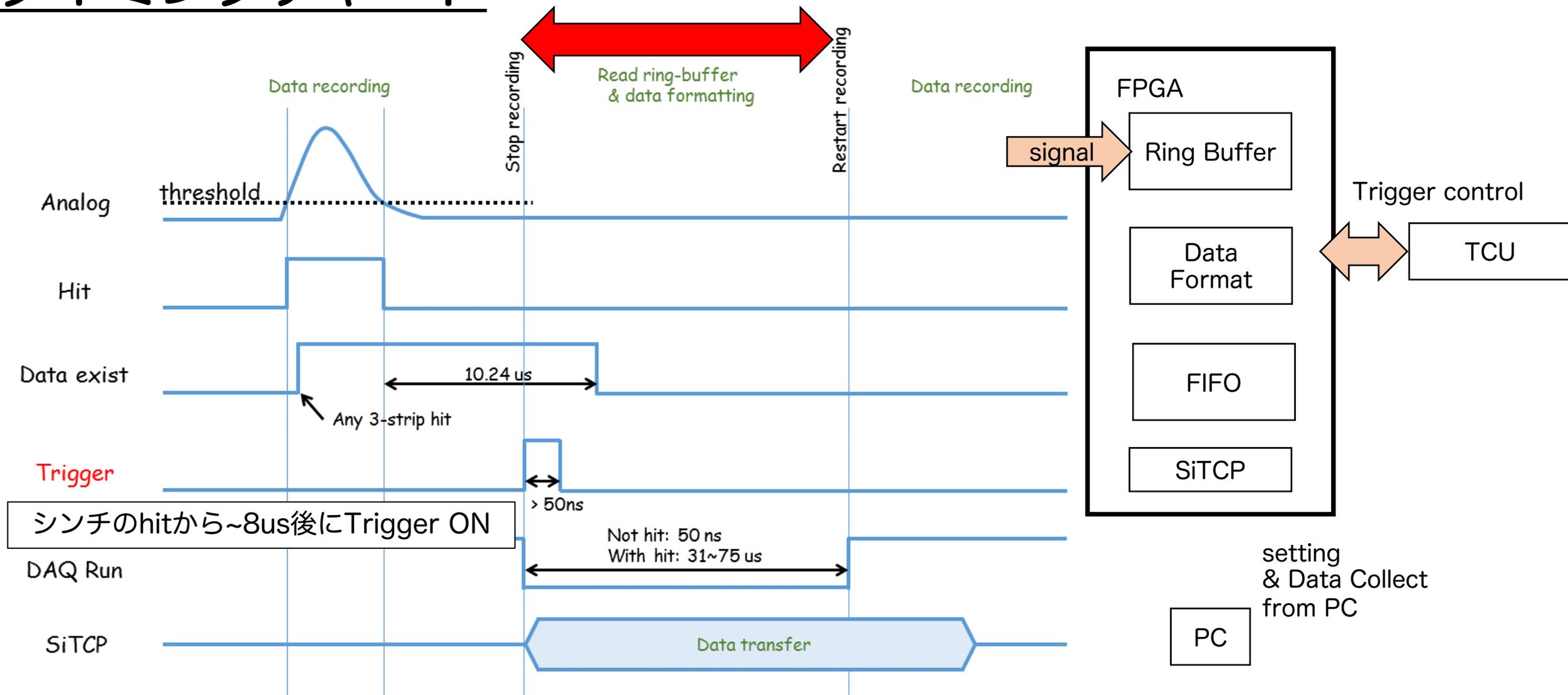
ASIC



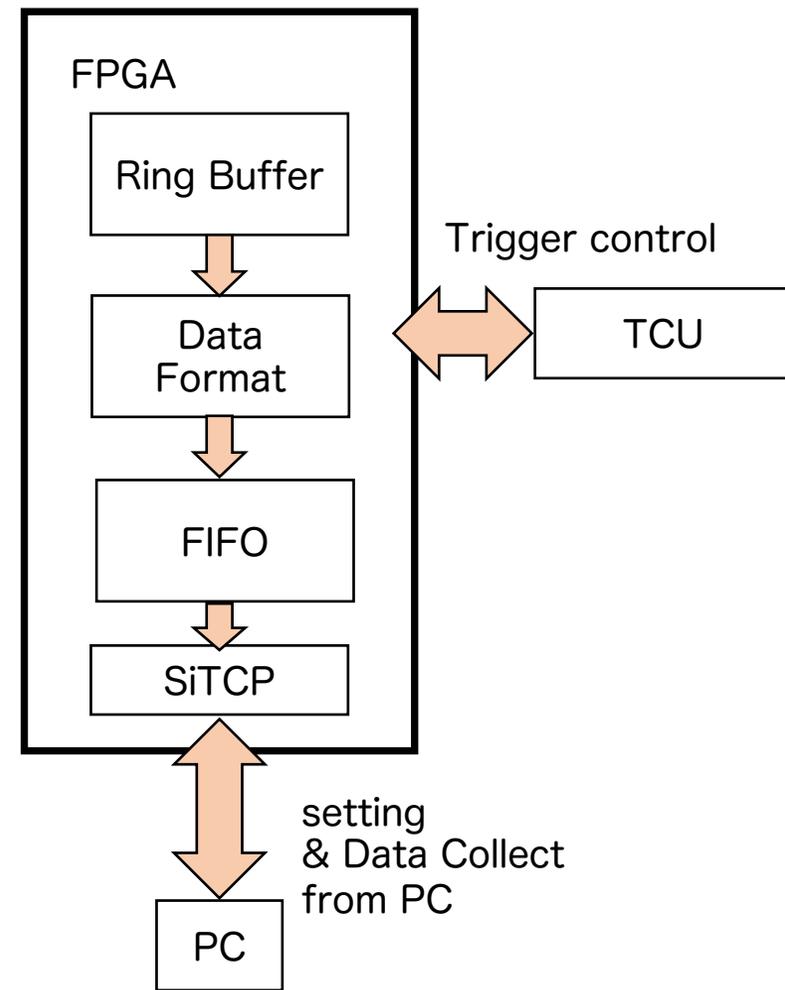
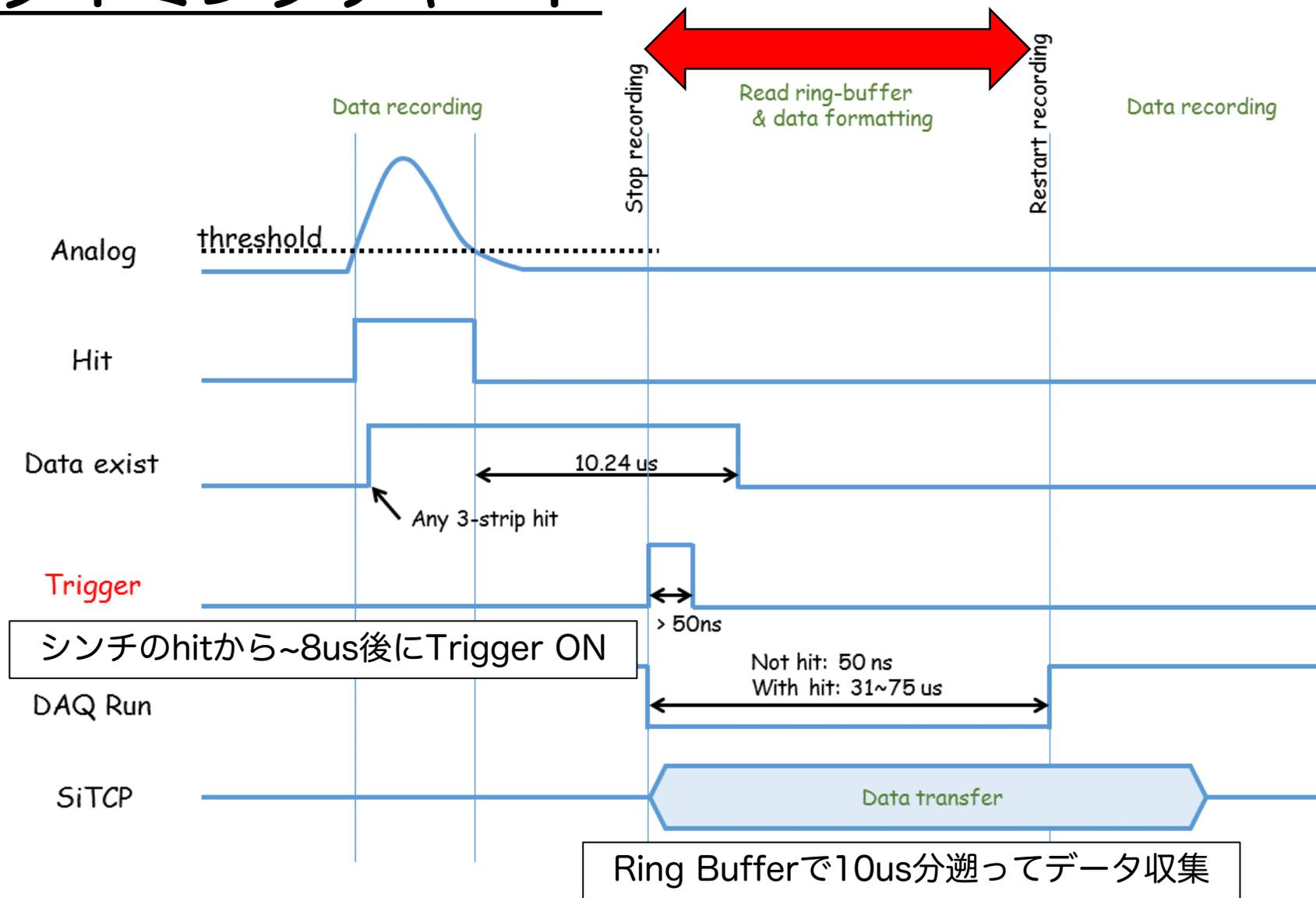
タイミングチャート



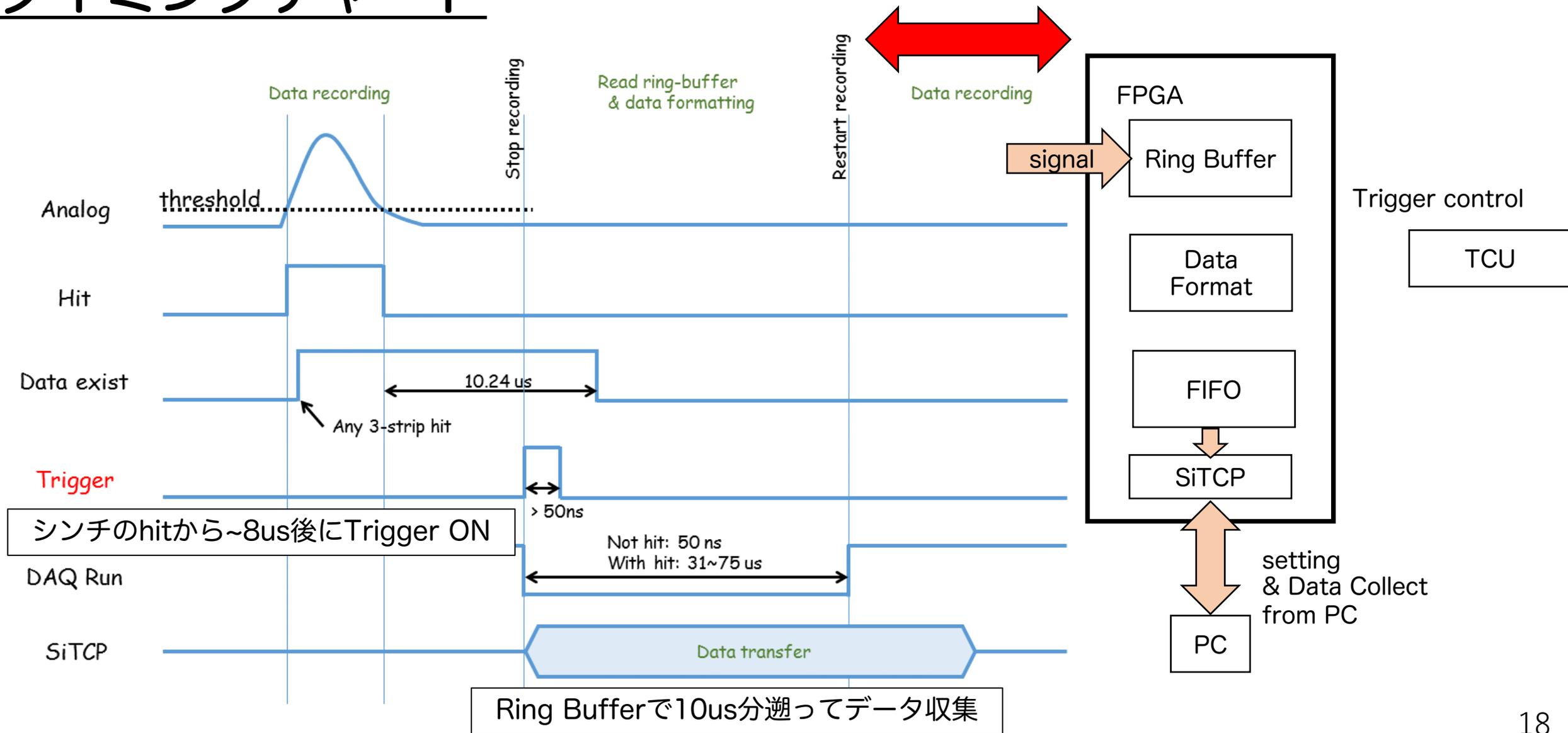
タイミングチャート



タイミングチャート

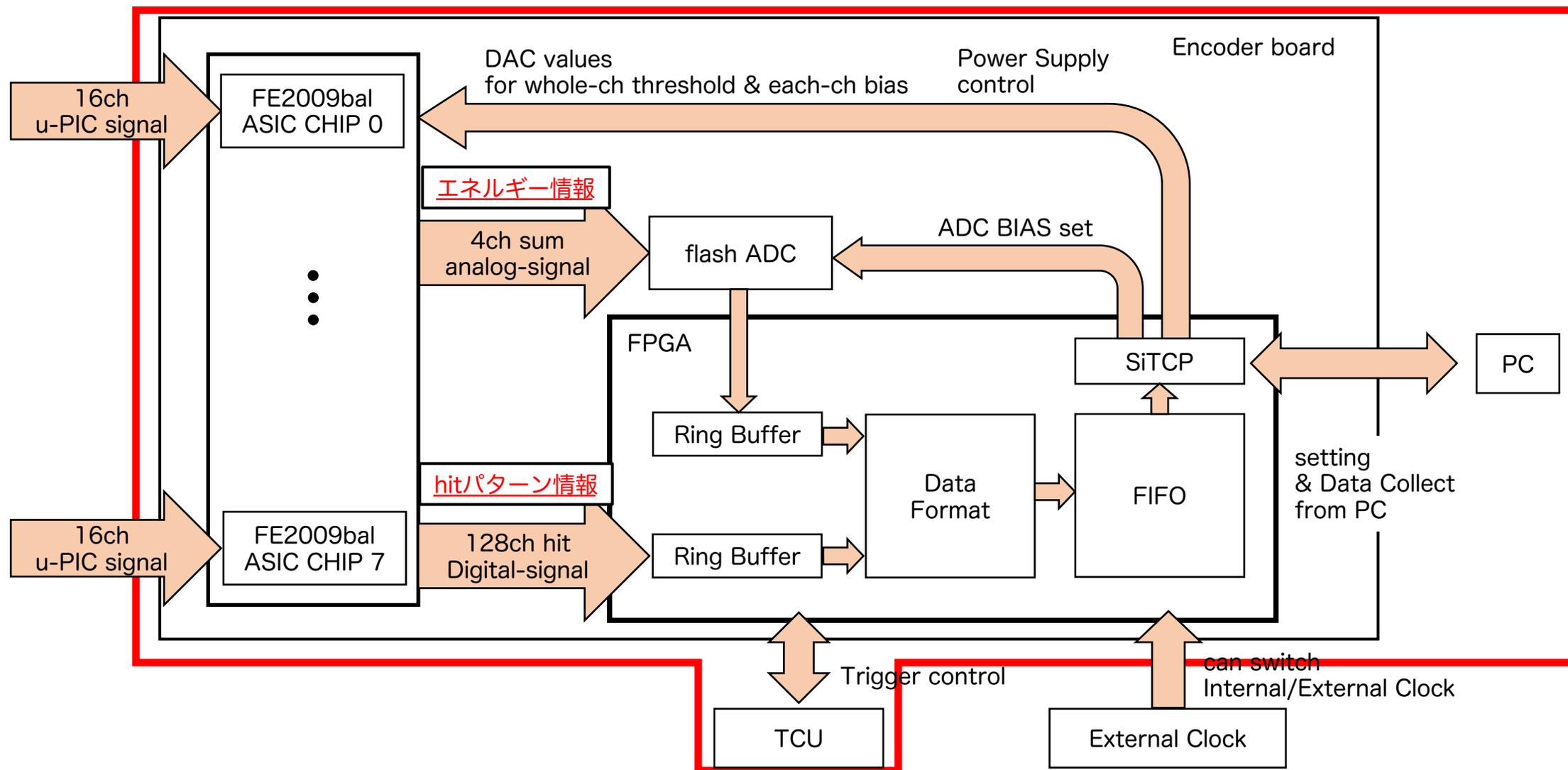


タイミングチャート

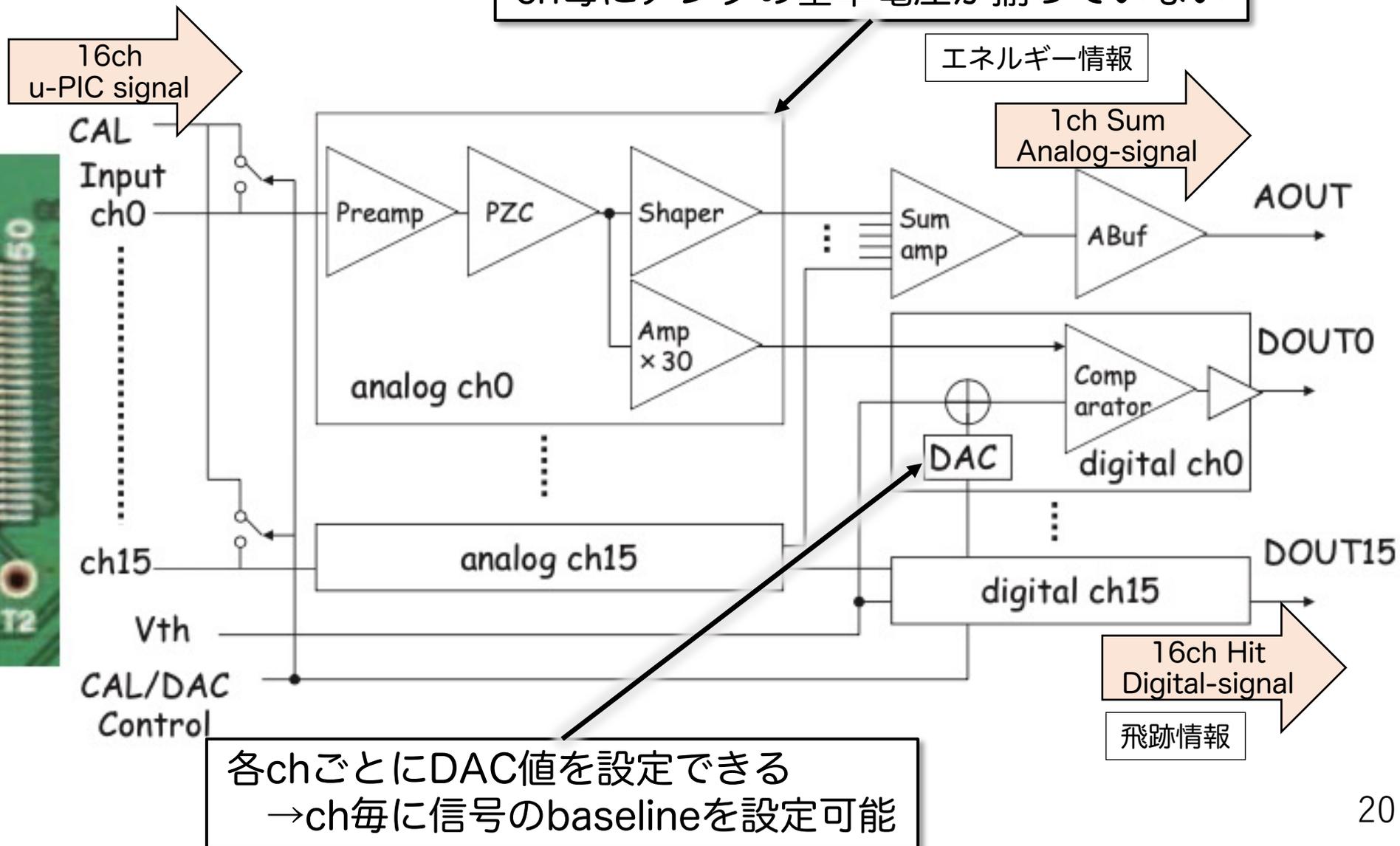
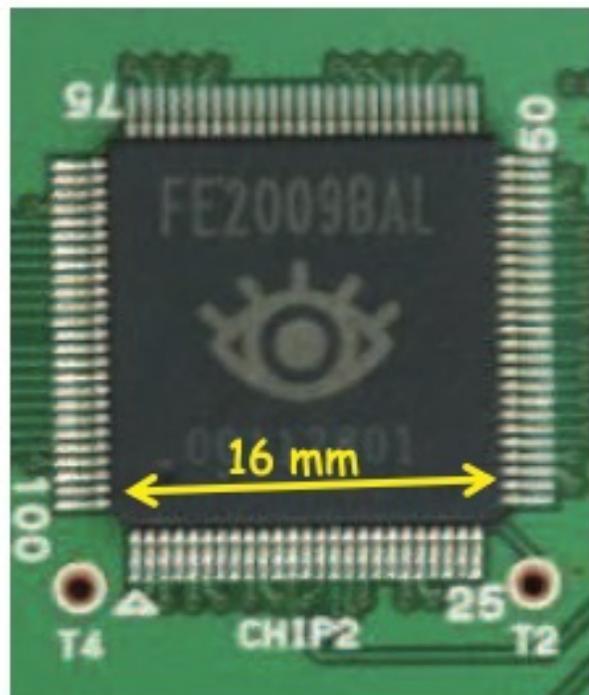


開発状況

- 中間目標：従来の機能を実装する
 - 現在：ASICのch毎の基準電圧特性測定

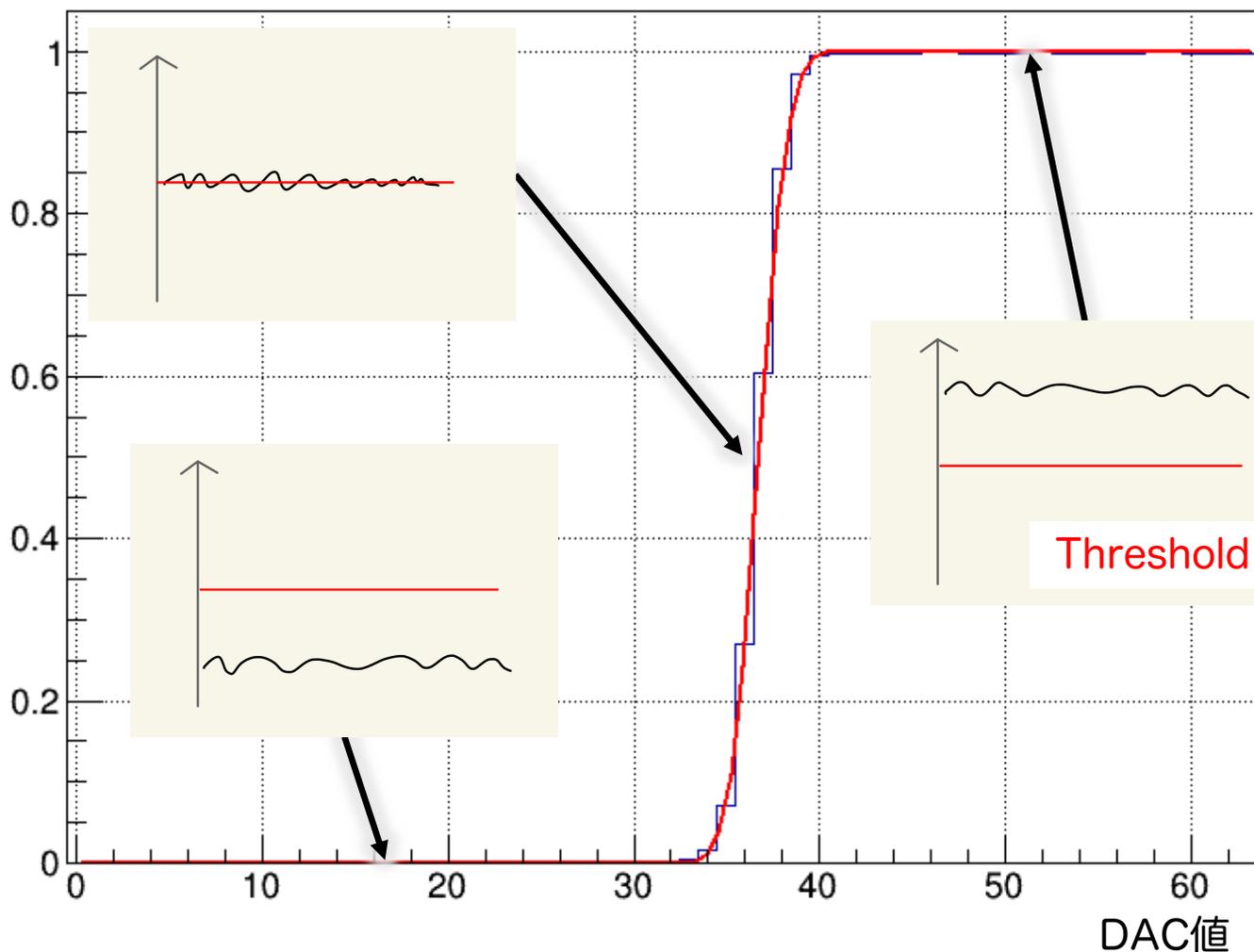


ASIC 各ch基準電圧特性とは

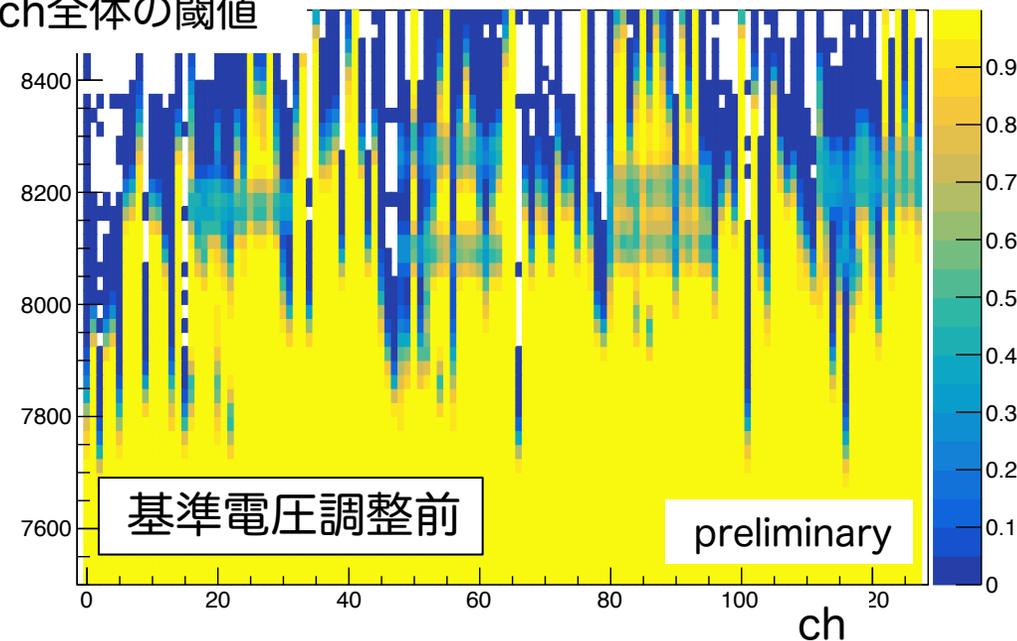


ASIC 各ch基準電圧特性測定

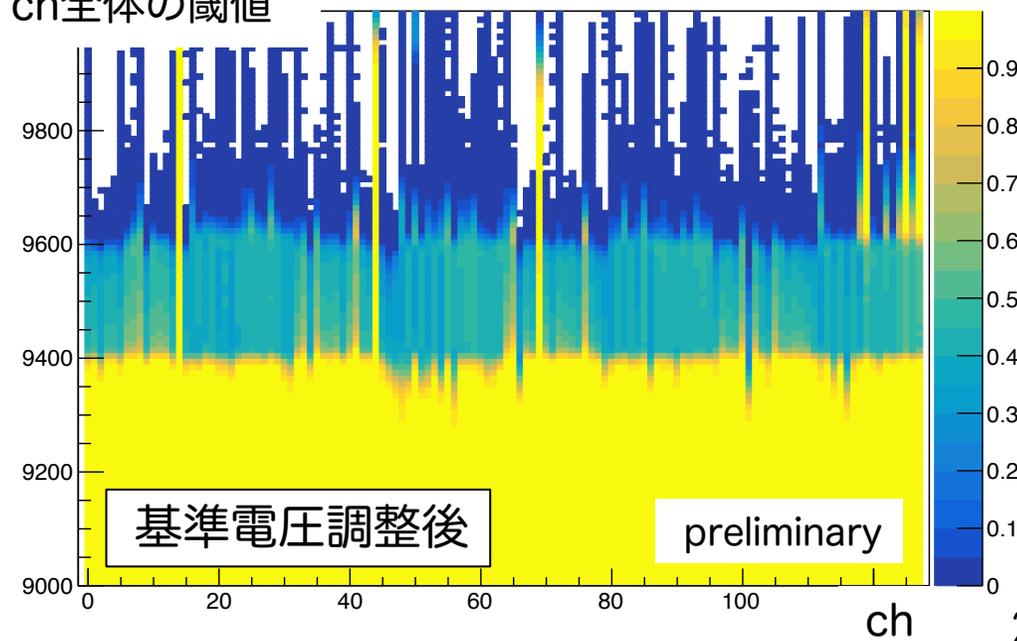
u-PIC信号のノイズがHitしたか (確率)



ch全体の閾値



ch全体の閾値



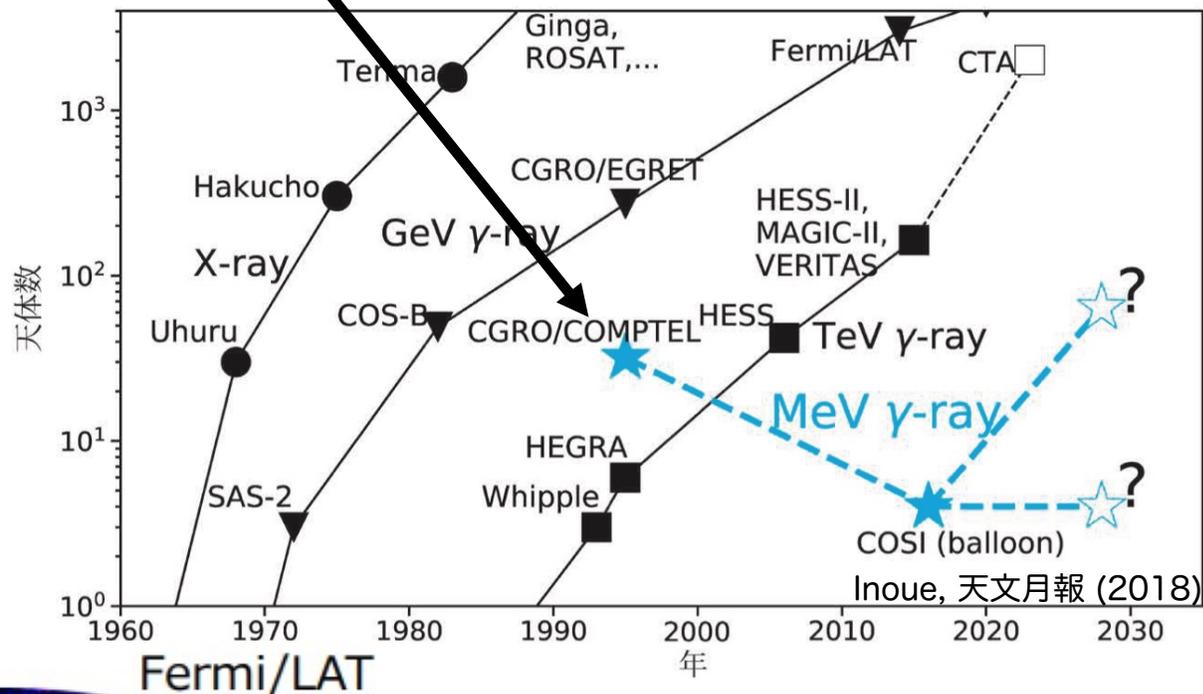
- MeVガンマ線は他波長領域に比べ観測自体が困難
従来コンプトン法では入射方向を一意に定められない
- 反跳電子も測定し入射方向を一意に定められる
次世代のMeVガンマ線検出器ETCCを開発
 - 現在2027年予定の気球実験SMILE-3に向け計画が進んでいる
- SMILE-3に向けて、TPC信号読み出し基板を
FPGA Spartan 7を用いて基板の再設計を行う
 - 現在は従来機能のトレース作業完成間近
- 今後の展望
 - 従来機能のトレース完了へ
 - ASIC 各ch-bias特性測定
 - ETCCからhit信号を読み出す
 - SMILE-3へ向けた新機能の実装
 - 外部Clockによる基板ごとの同期・外部/内部Clock切り替え
 - ASICのlatch up時にresetを自動的にかける
 - 基板の量産化（24枚中10枚は製作中）

Backup

MeVガンマ線観測の困難さ

- 透過力が強くて集光できず、広い有効面積を確保できない。
- コンプトン散乱が優位で入射光子の情報を一部失う。
- 宇宙線と検出器との相互作用で生じる放射性同位体からの雑音が発生する。

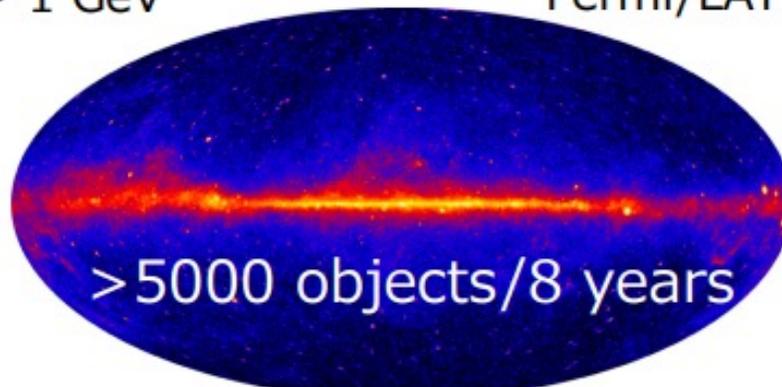
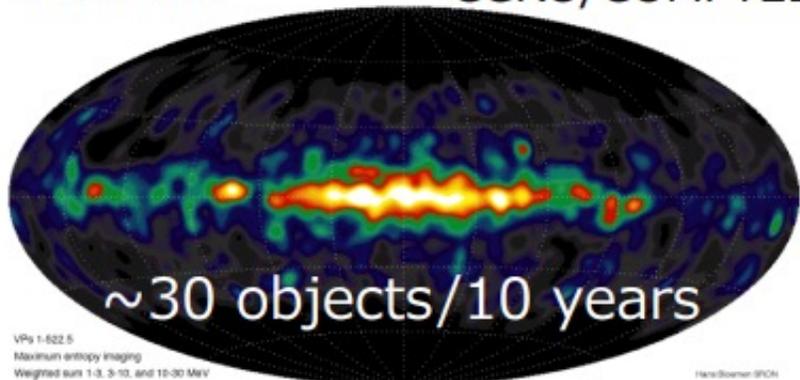
MeVの発見天体数は少ない



1-30 MeV

CGRO/COMPTEL > 1 GeV

Fermi/LAT



角度分解能が高く雑音除去能力の強い次世代のMeVガンマ線検出器が必要

V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

G. Principe+ (A&A, 2018)

MeV sky map

GeV sky map

- SMILE-2+時 : ARM 10.5度, SPD 148度 @0.662MeV
- PSF : 30度 @0.662MeV (HPD)

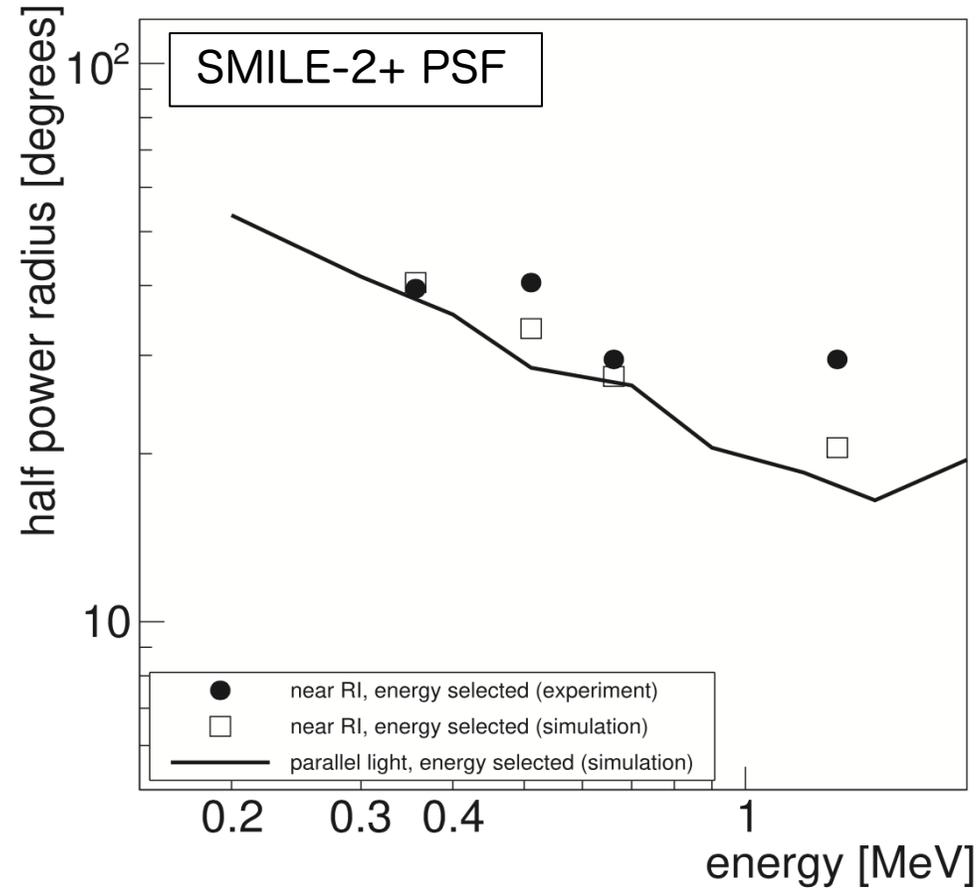


Figure 7. Half-power radius (HPR) of the PSF as a function of incident energy. The filled circles, open squares, and solid line represent the measured HPR using the checking sources, the simulated HPR with a near point source, and the simulated HPR for parallel light, respectively. Takada+, ApJ (2022)

- SMILE-2+時 : FoV 3.1 sr

SMILE-2+ Effective area (Energy)

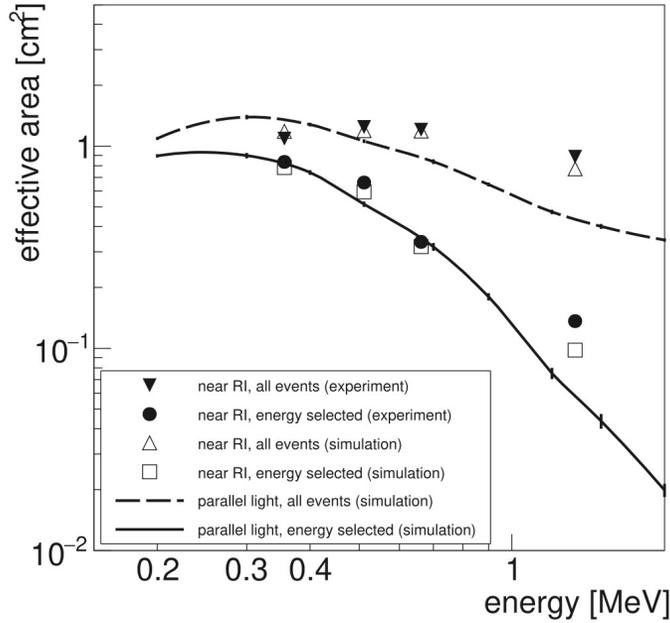


Figure 5. Effective areas as functions of incident energy. Filled and open triangles represent the effective areas of all reconstructed events obtained in the experiments and simulation, respectively. Filled circles and open squares represent the experimental and simulated effective areas after selection within the FWHM of the energy peak, respectively. Dashed and solid lines plot the effective areas of all events and energy-selected events in the parallel light case, respectively.

Takada+, ApJ (2022)

SMILE-2+ Effective area (Zenith)

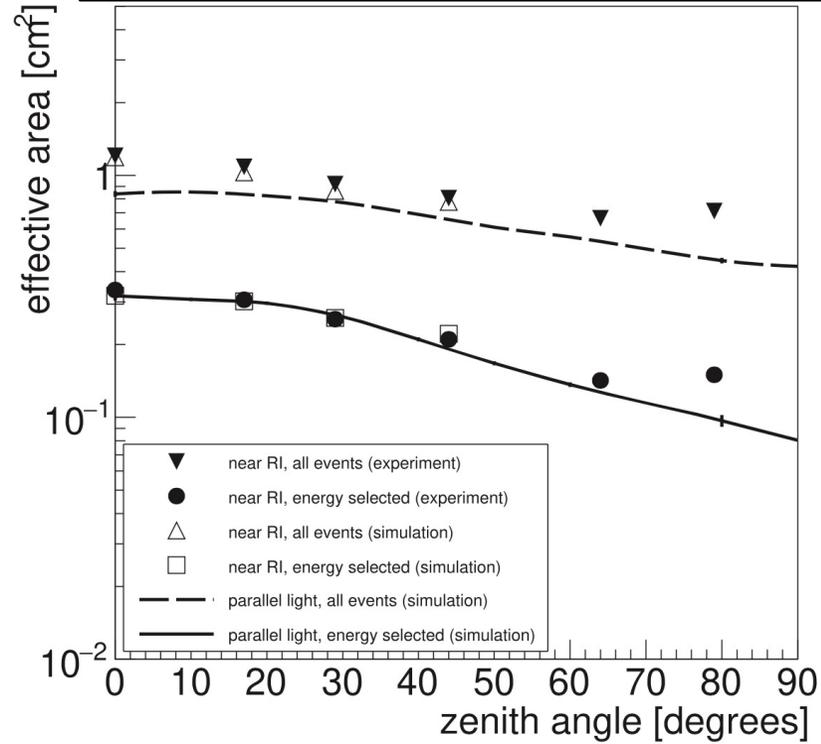


Figure 6. Zenith-angle dependence of the effective area at an incident energy of 0.662 MeV. Symbols are described in the caption of Figure 5.

Takada+, ApJ (2022)

SMILE-2+ Energy Resolutions

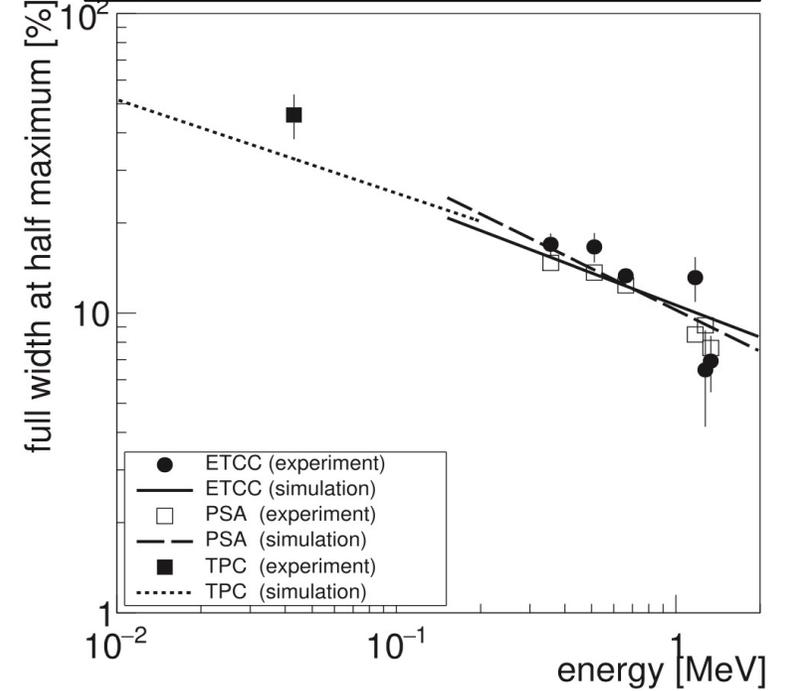


Figure 8. Energy resolutions of the ETCC, TPC, and PSAs as functions of energy. The filled circles and solid line represent the energy resolutions of the SMILE-2+ ETCC obtained via ground calibration and simulation, respectively. The filled and open squares are the averaged energy resolutions of the TPC and PSAs, respectively, measured via ground calibration. The dotted and dashed lines represent the simulated energy resolutions of TPC and PSA, respectively.

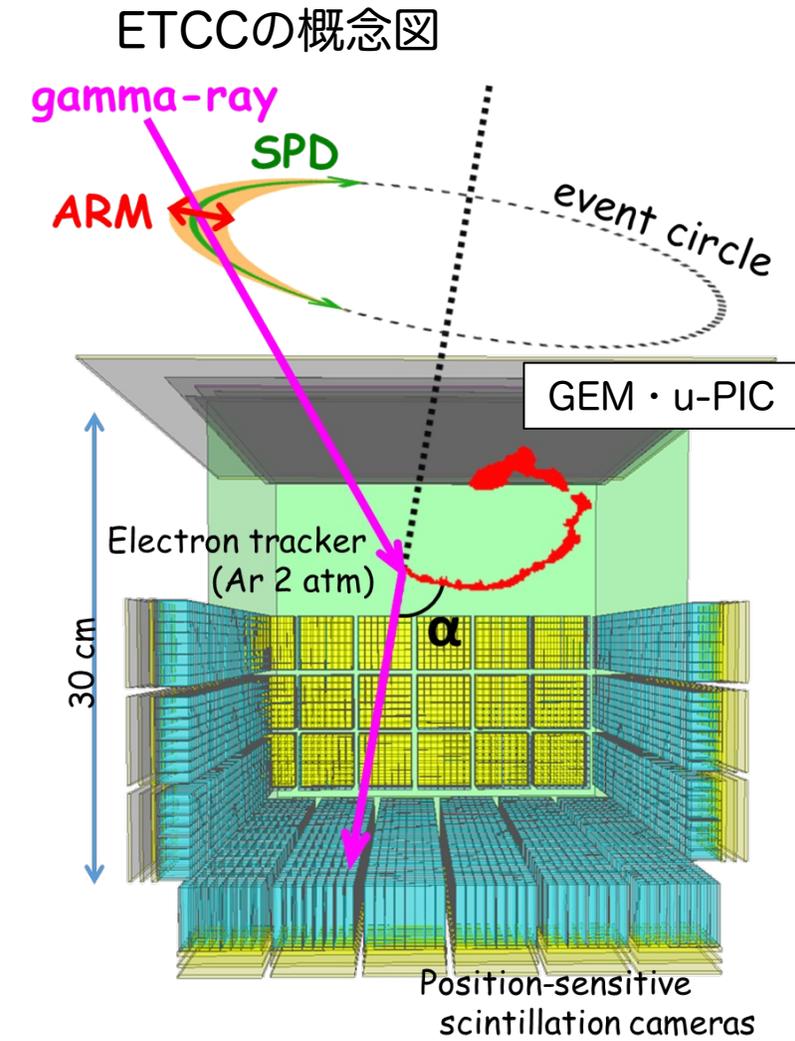
Takada+, ApJ (2022)

- TPC

- u-PIC : 0.8mm間隔
- ガス : Ar : CF₄ : iso C₄H₁₀ = 95 : 3 : 2

- GSO

- Gd₂SiO₅ : Ce
- 1つのPSAsにつき8 x 8 pixel
 - pixel size 6 x 6 mm²
- 下段36個、側面18個 計6912 pixel



PMTとMPPCの量子効率

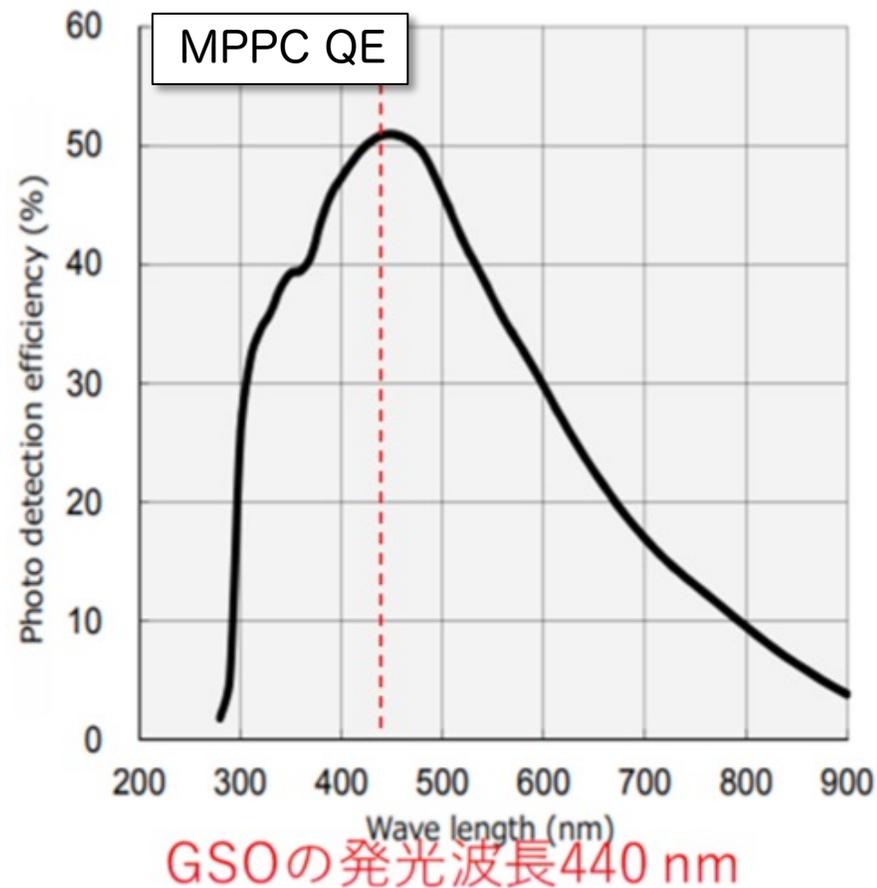
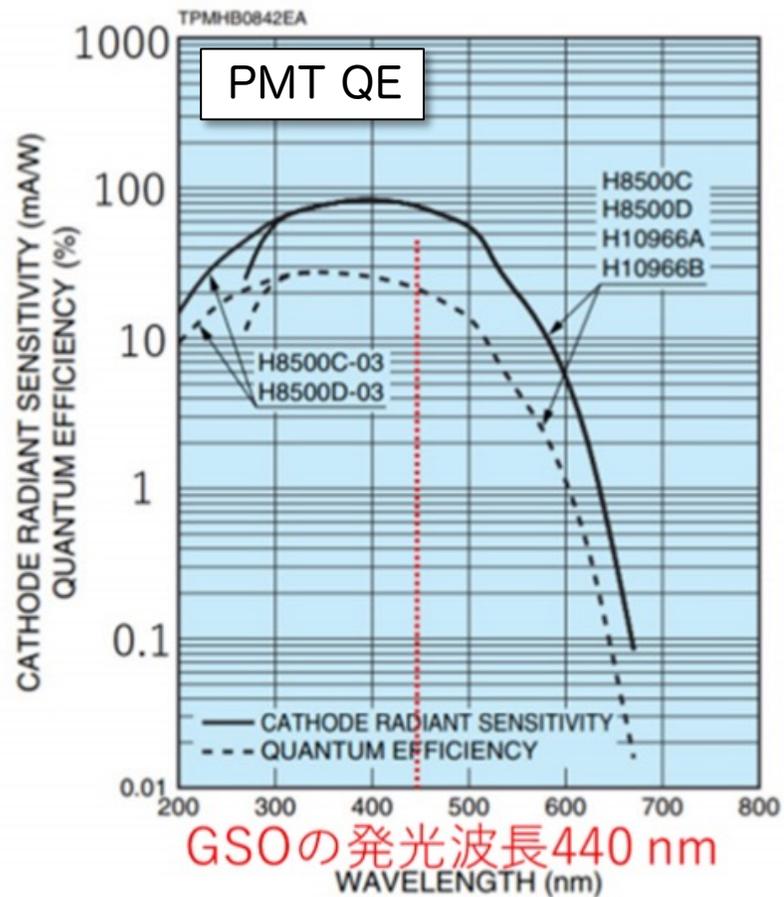
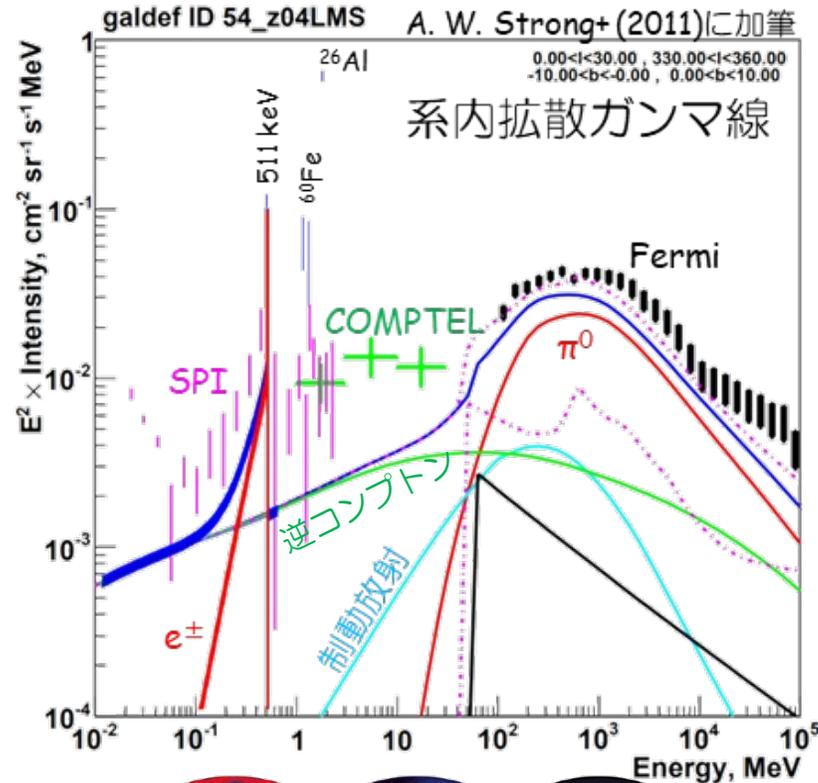


表 3.3.1: SMILE-2+で使用している PMT(浜松ホトニクス社製 H8500C) と現在使用している MPPC(浜松ホトニクス社製 S14161-3050HS-08) の比較 [76]

	PMT (H8500C)	MPPC (S14161-3050HS-08)
動作電圧 (V)	~1000	~40
量子効率 (%) (GSO の発光波長 440 nm での値)	~20 %	~50 %
ゲイン	1.5×10^6	2.5×10^6



➤ MeV帯域での連続成分

- 逆コンプトン散乱で期待されるよりも強い
- MeVに特徴的な放射の存在

➤ 電子陽電子対消滅線

- 陽電子(10-100 eV)の起源が不明
- 空間分布モデルは他波長と大きく異なる



◆ 暗黒物質

放射強度 ∝ 質量密度²

軽いWIMPの対消滅・崩壊
⇒ 電子・陽電子・ガンマ線

◆ 原始ブラックホール

放射強度 ∝ 質量密度

~10¹⁶⁻¹⁷g ⇒ ~MeVでHawking放射

◆ 多数の天体の集まり

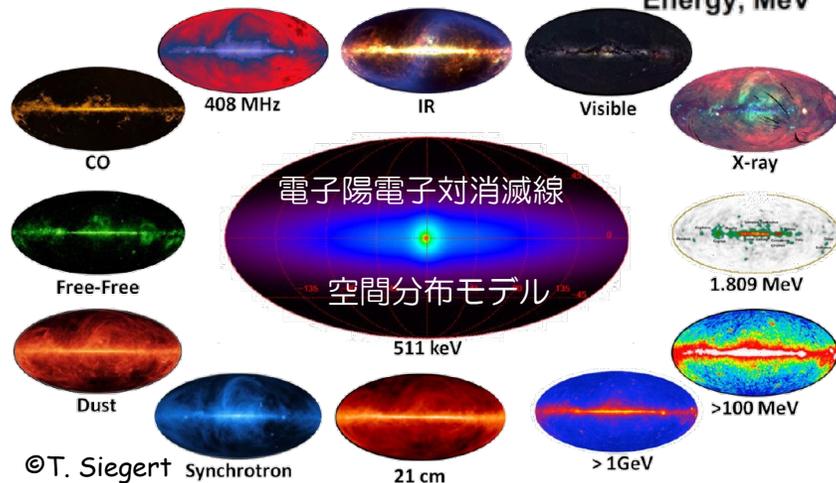
放射は銀河面に集中

MeVに特徴的な放射を持つ天体は未発見

◆ 宇宙線と星間物質との相互作用

放射は銀河面に集中

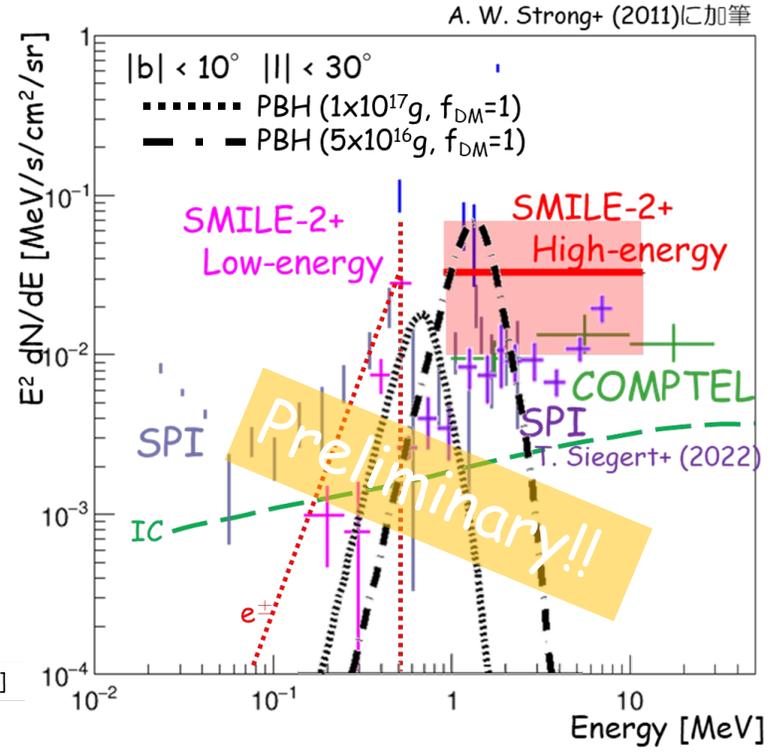
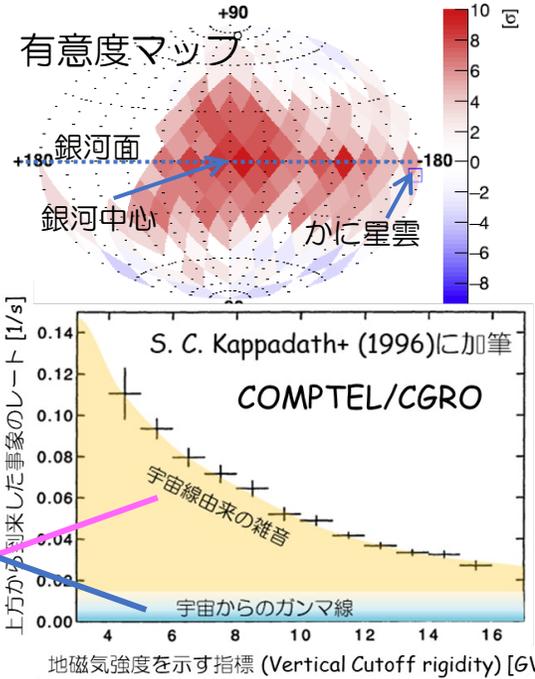
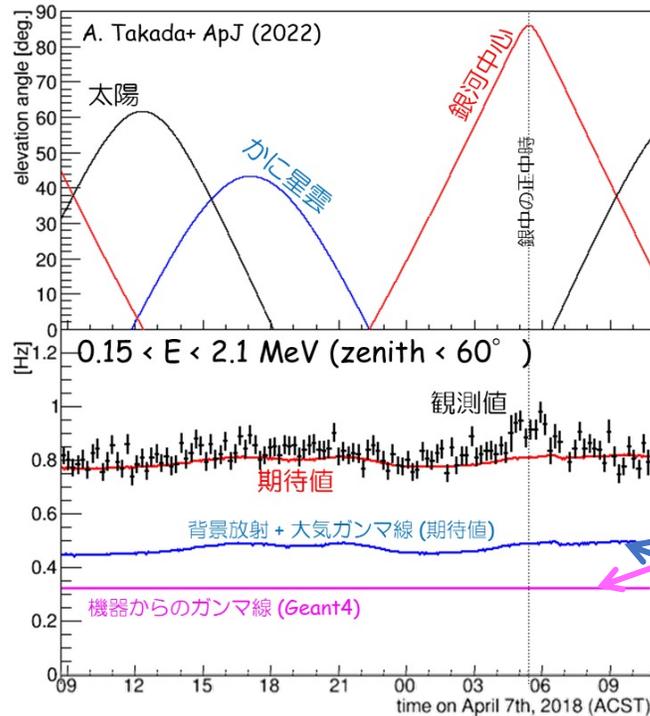
計算では逆コンプトン散乱よりも暗い



系内拡散ガンマ線の起源説明には…

詳細なスペクトル + 広い領域の放射強度分布

が必要



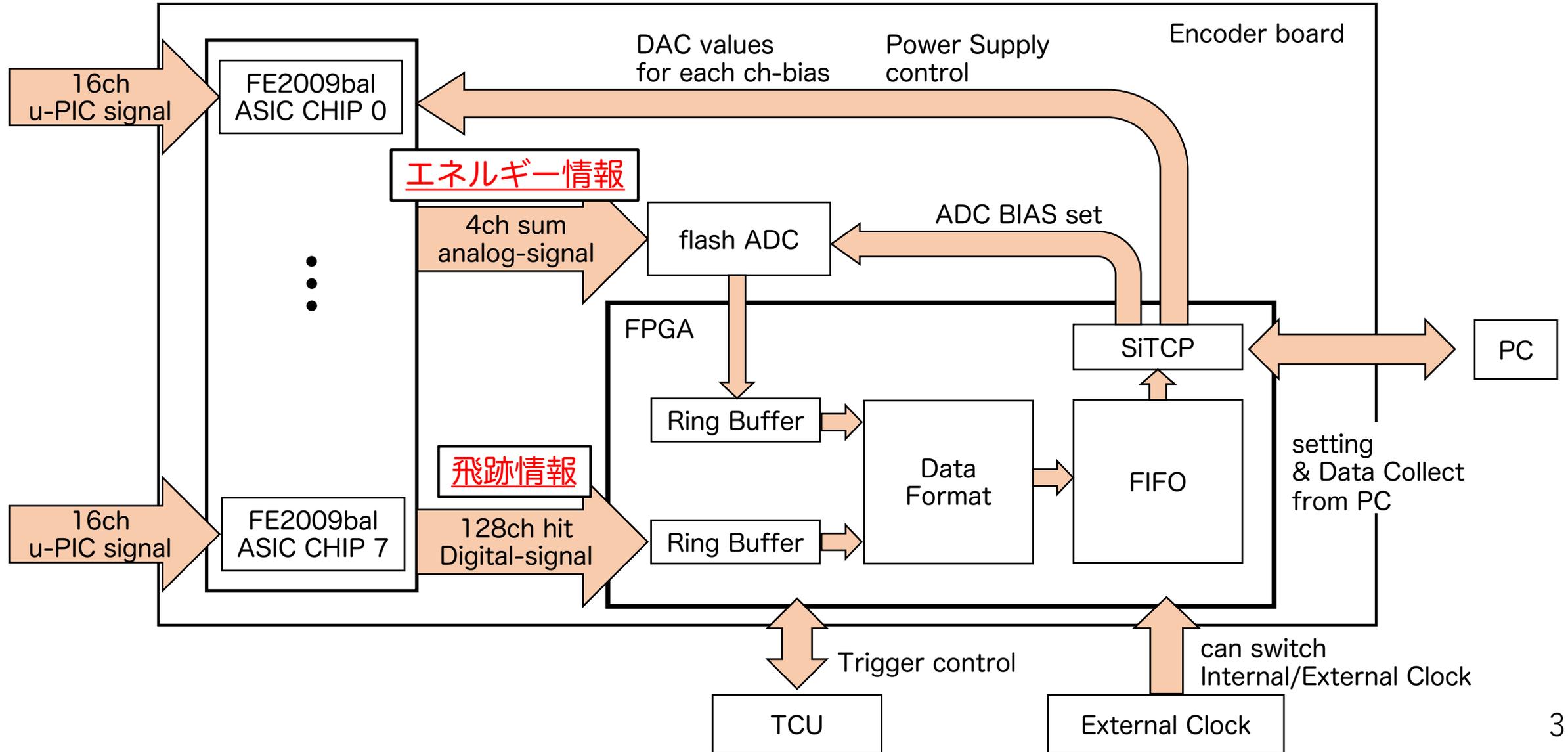
- 2018年に天体観測実証実験としてSMILE-2+を実施
 - ⇒ 実験は成功、想定された観測能力を気球高度にて実証

A. Takada+, ApJ (2022)

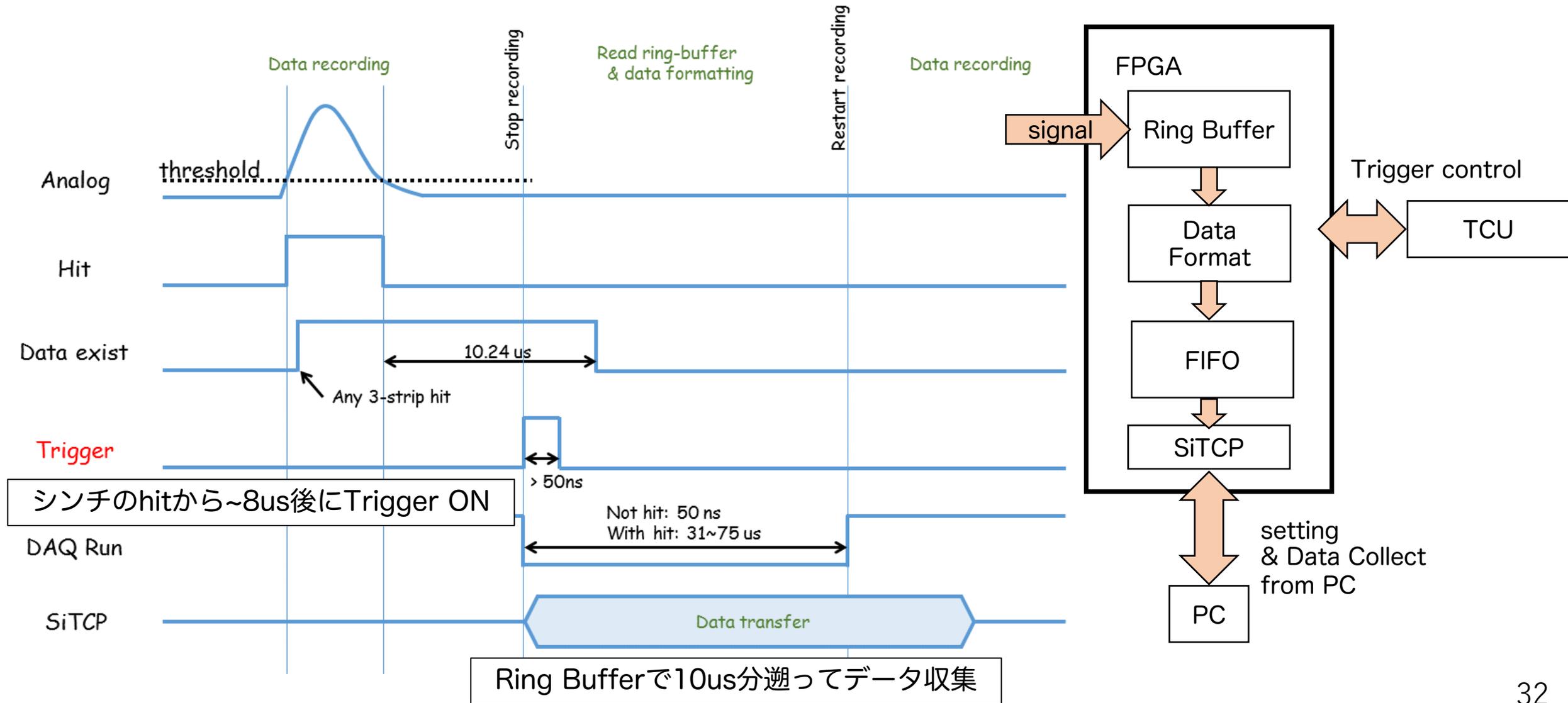
- ガンマ線検出レートが銀河中心の正中時に合わせて上下
- SMILE-2+ (1日間の気球)の観測結果はSPI・COMPTEL (10年間の衛星観測)と同等
- 銀河中心領域の観測から得たエネルギースペクトルはPBHを考慮したモデルでも説明可

➡ 実証機であった為、有意に検出したものの、詳細な議論までには至らず
 統計・空間分解能を向上し、正体を暴きたい ⇒ 本提案研究 SMILE-3

TPC信号読み出し基板 全体ブロック図



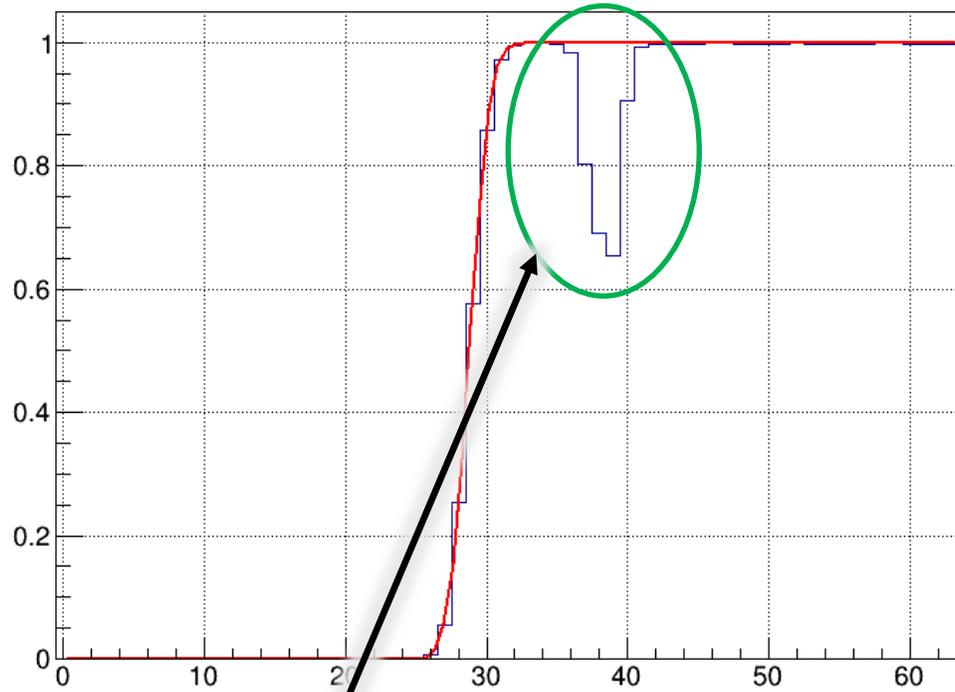
タイミングチャート



u-PIC 各ch-bias特性測定 詳細

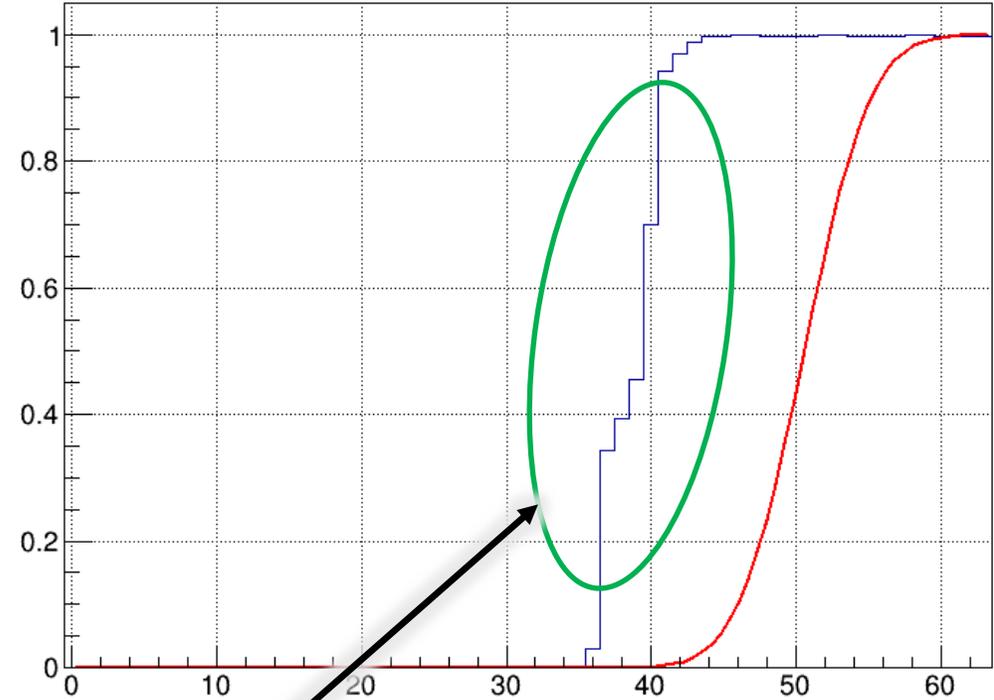
縦：u-PIC信号のノイズがHitしたか（確率）、横：DAC値

Ch 126



常にノイズがHitしていない
Thresholdより信号が大きいはず

Ch 127



Fittingがずれている