

# 極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測 (SMILE-Project)

1. Electron Tracking Compton Camera  
in MeVガンマ線天文学 (SMILE-project)
2. 最遠方ガンマ線バースト検出へ(宇宙最初の星)
3. 極域でのガンマ線バースト @キルナ(スエーデン)  
: 地球大気科学との連携

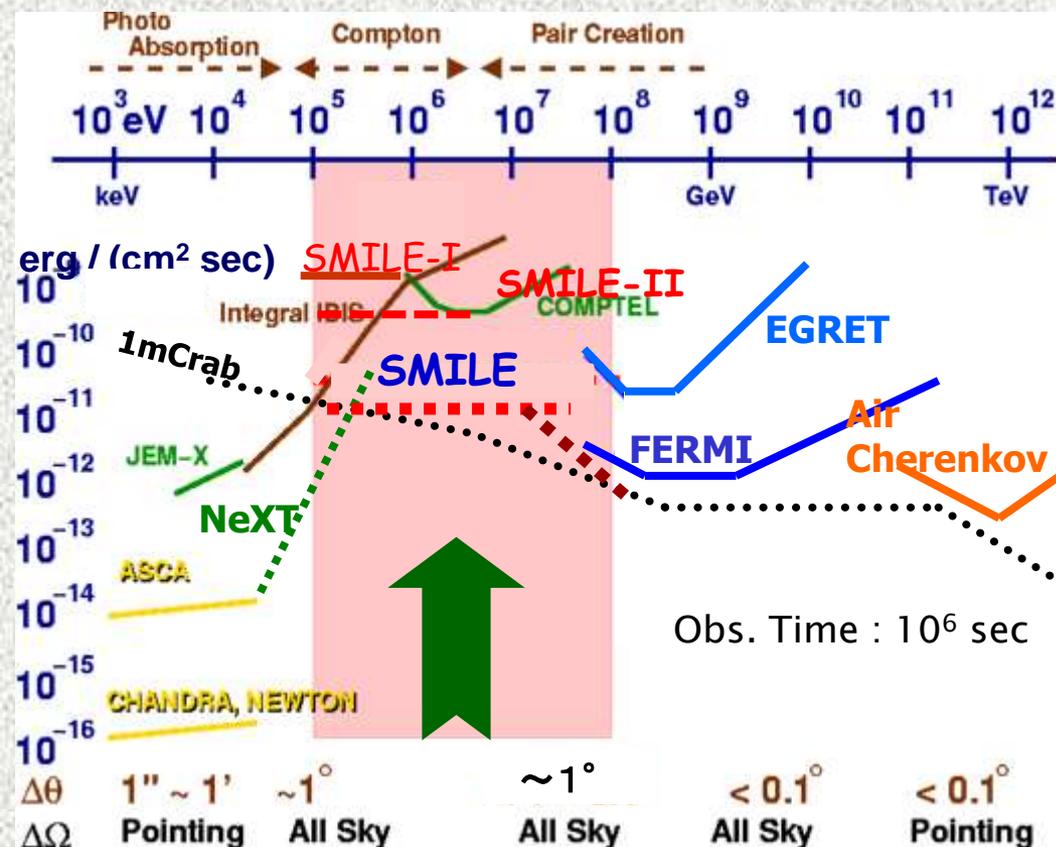
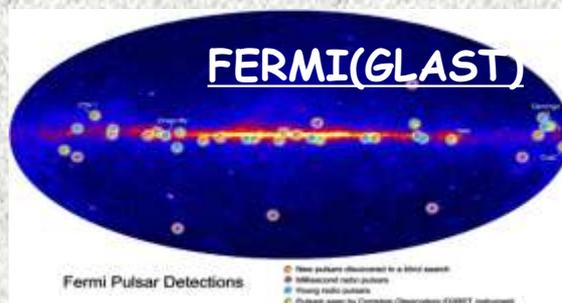
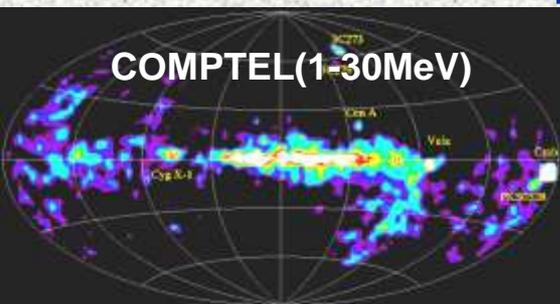
1. まとめ

谷森 達

京大大学院理学研究科 物理第2教室 宇宙線研究室

2010 Sep.17GRB-WS @CRC将来計画シンポジウム

# 高エネルギー天文学の感度

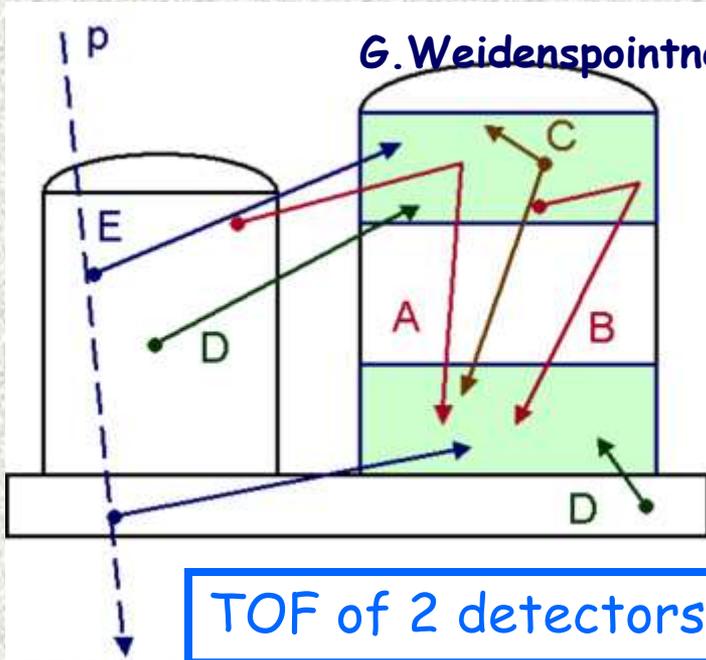


- ◆ 元素合成 (ライン $\gamma$ )  
銀河面分布 :  $^{26}\text{Al}$  · 511 keV  
+
- 連続スペクトル $\gamma$  (Multi-MeV)
- ◆ 宇宙線加速 (AGN, SNR, Pulsar)
- ◆ 宇宙の始まり  
最遠方ガンマ線バースト (GRB)
- ◆ 地球・太陽圏科学  
極地方での最小バースト  
オゾンホール形成の謎

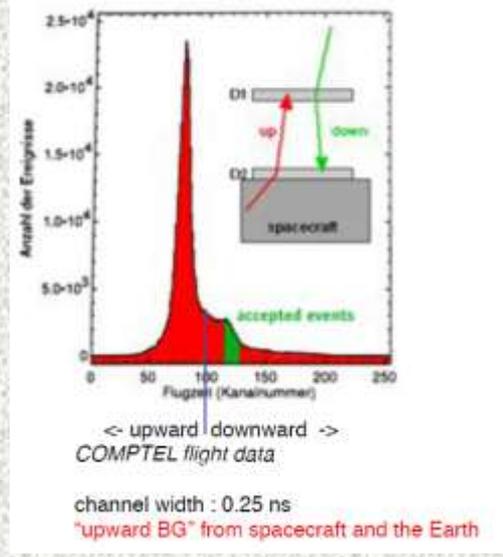
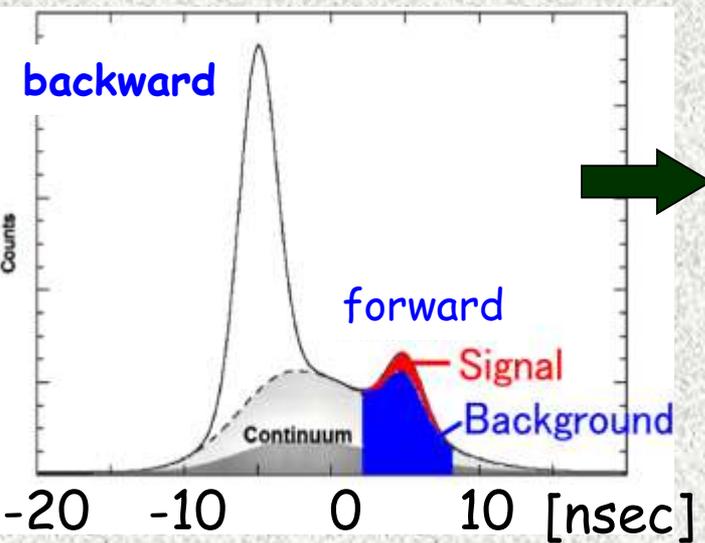
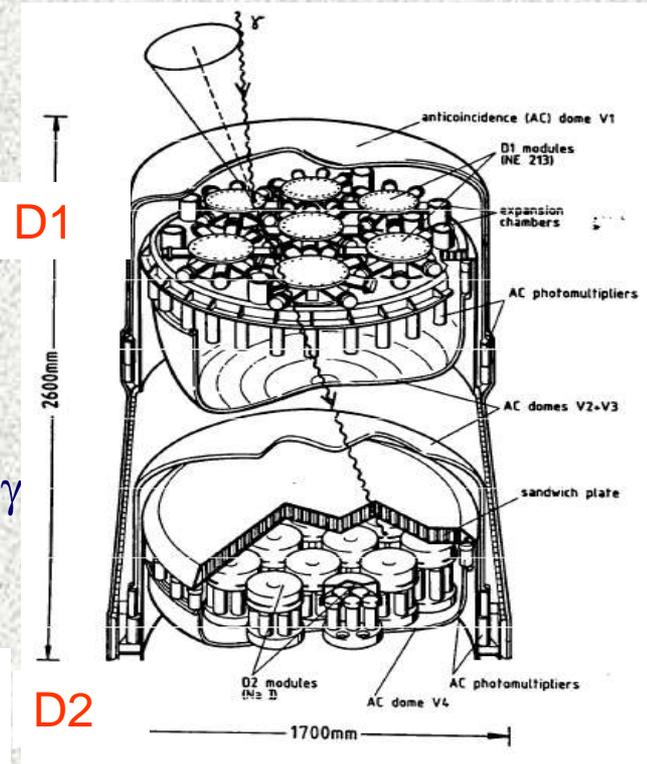
宇宙論 + 高エネルギー宇宙  
+ 地球環境

# Background of COMPTEL

G. Weidenspointner, et.al. (A&A, 2001)



- A: external  $\gamma$
- B: internal  $\gamma$
- C: two  $\gamma$
- D: random coincidence
- E: proton-induced  $\gamma$

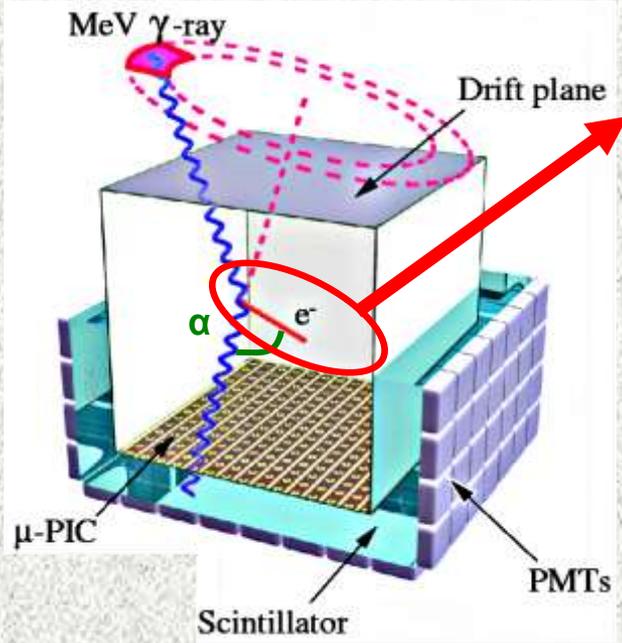


COMPTEL rejected by Time of Flight between 2 detectors, but not completed

Effective Area =  $13\text{cm}^2 @ 1\text{MeV}$

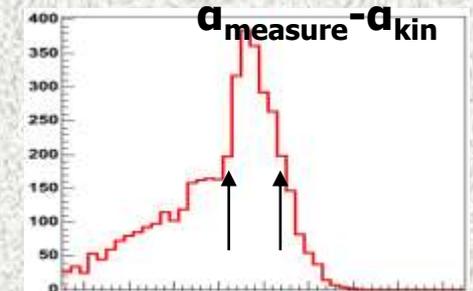
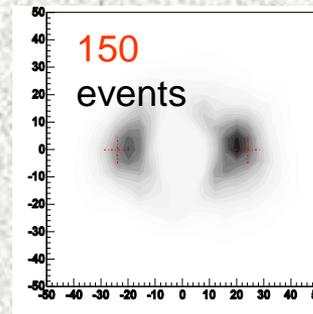
# Electron Tracking Compton Camera (ETCC)

## 電子飛跡検出方コンプトンカメラ

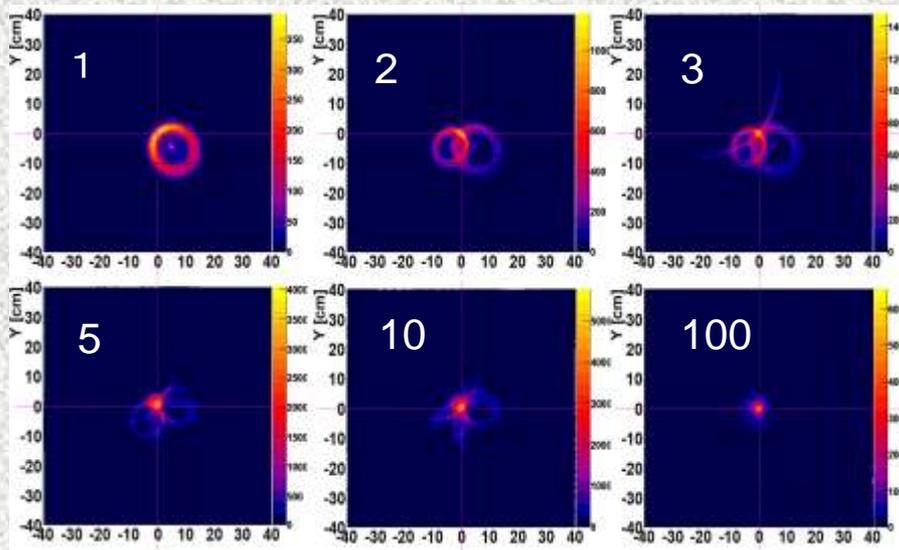
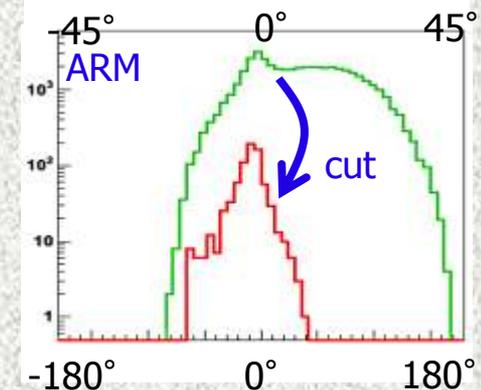
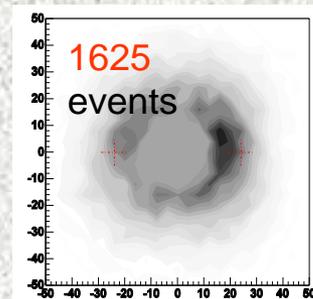


1. ガンマ線の到来方向を完全に決定
2. 運動学的手法による雑音除去( $\alpha$ 角利用)  
連続ガンマ線測定に非常に有効!
3. 広視野(3str 以上)
4. 最終目的、今までの感度の10倍以上の感度での全天探査 (50cm cubic ETCC)

In use of electron track



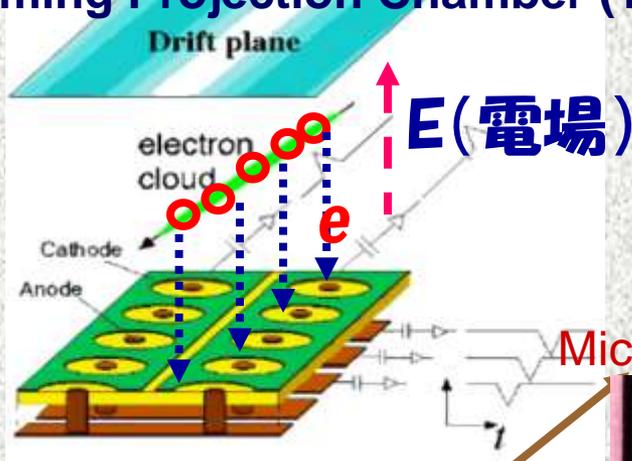
no use of electron track



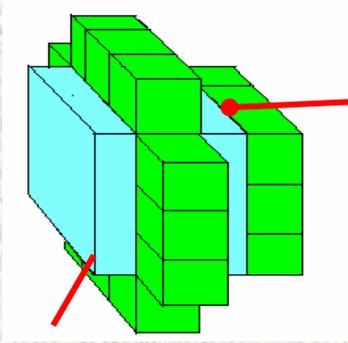
# 10cm-cube $\mu$ -TPC & ETCC

GSO Pixel

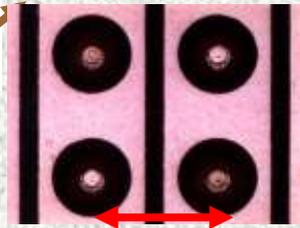
## Timing Projection Chamber (TPC)



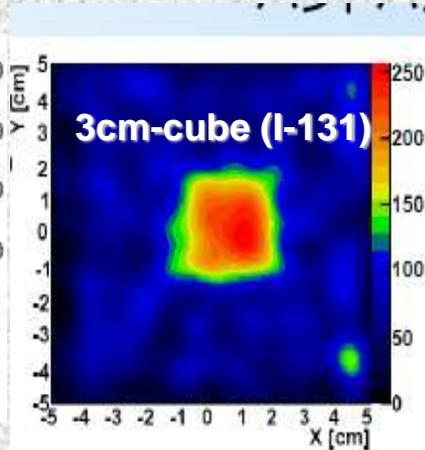
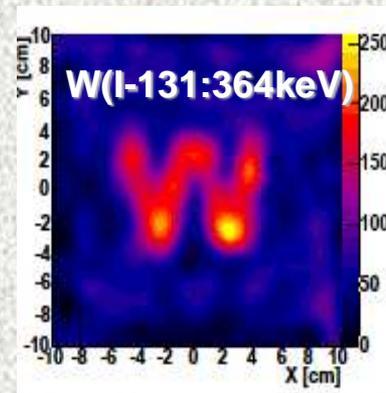
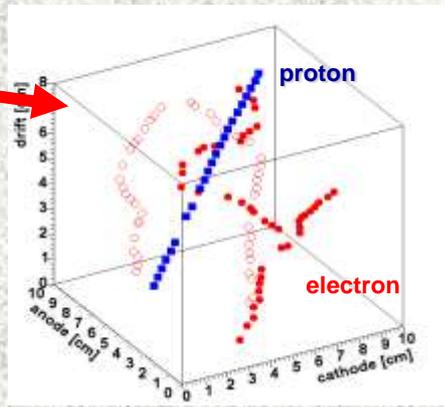
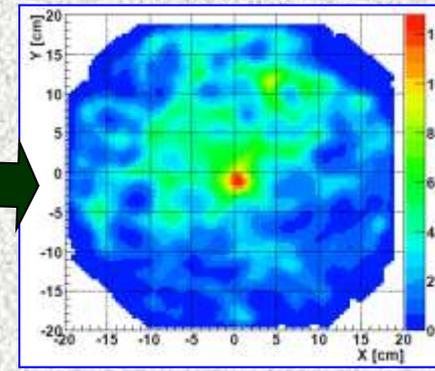
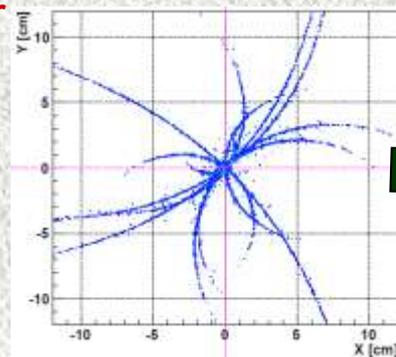
TPC



## Micro Pixel Chamber



## Imaging of 3D tracks



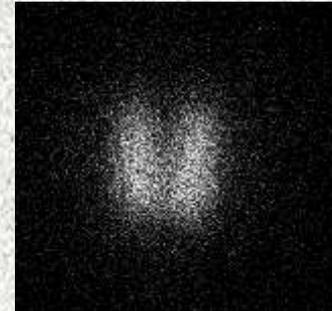
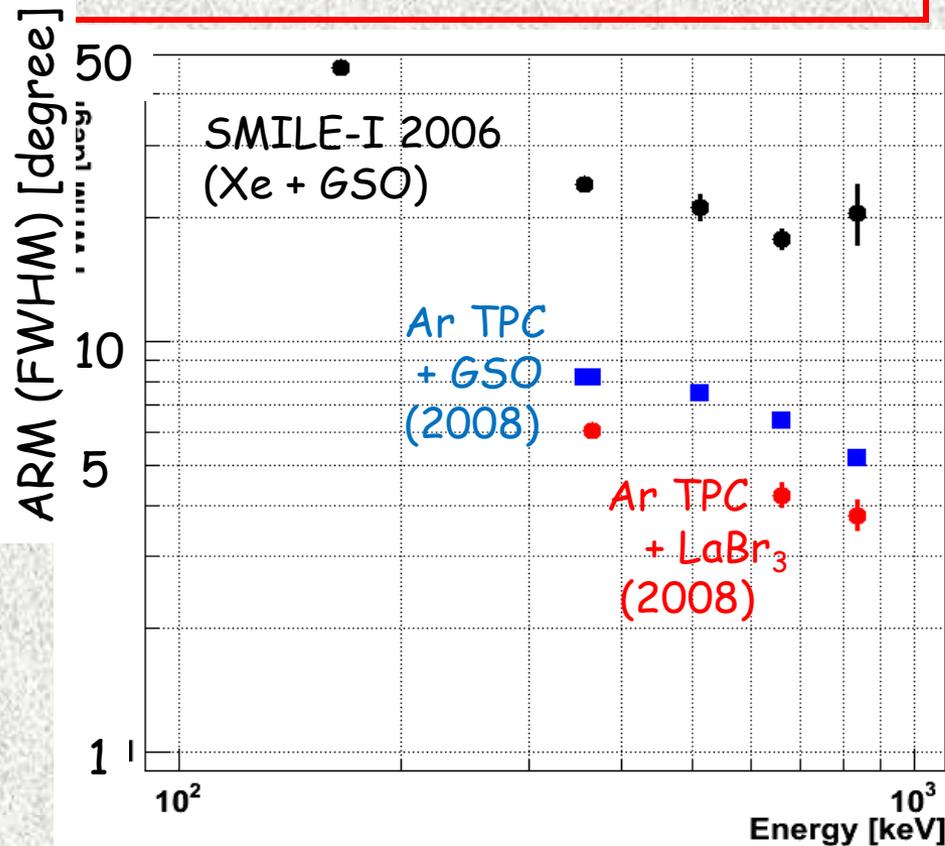
# Improvement of Angular resolution

一方向のみの観測で3D画像  
(Preliminary)

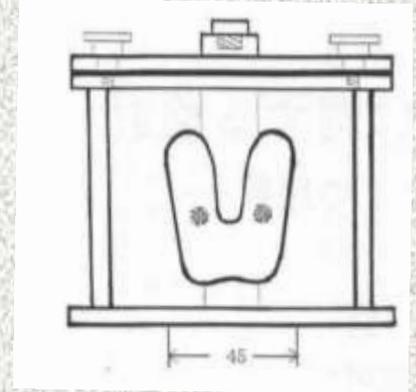
$\text{Ar} + \text{GSO}(\text{Ce}) \Rightarrow \text{Ar} + \text{LaBr}(\text{Ce})$

$6.2^\circ \Rightarrow 4.2^\circ @ 662\text{keV}(\text{FWHM})$

$3.8^\circ @ 854\text{keV}(\text{FWHM})$



市販γ線カメラ像

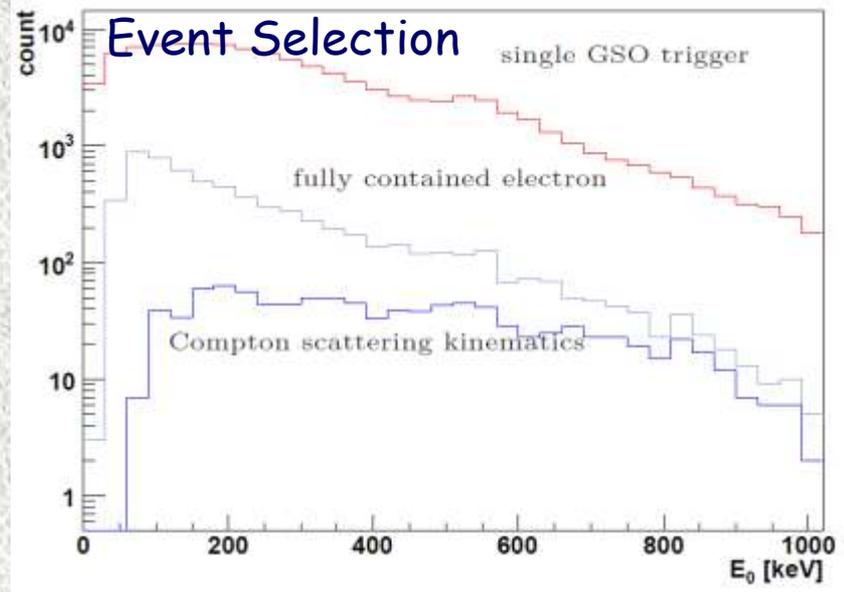


甲状腺ファントマ  
(ヨウ素131-364keV)

# First Balloon Experiment (Smile-I)

Test flight using 10cm cube ETCC to measure

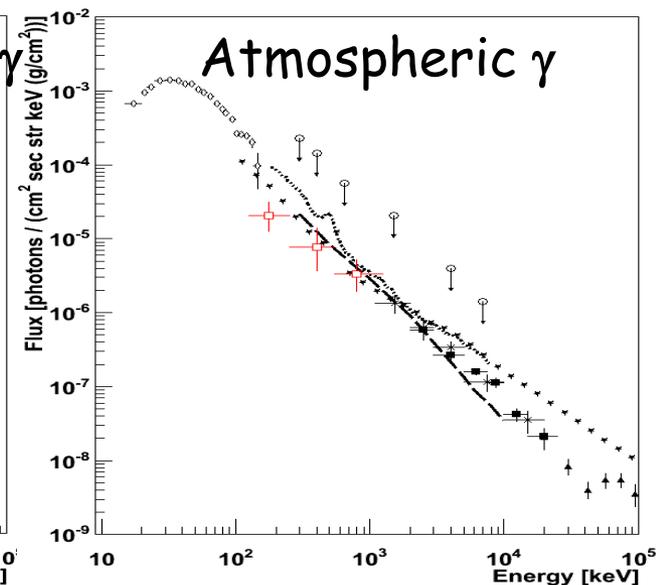
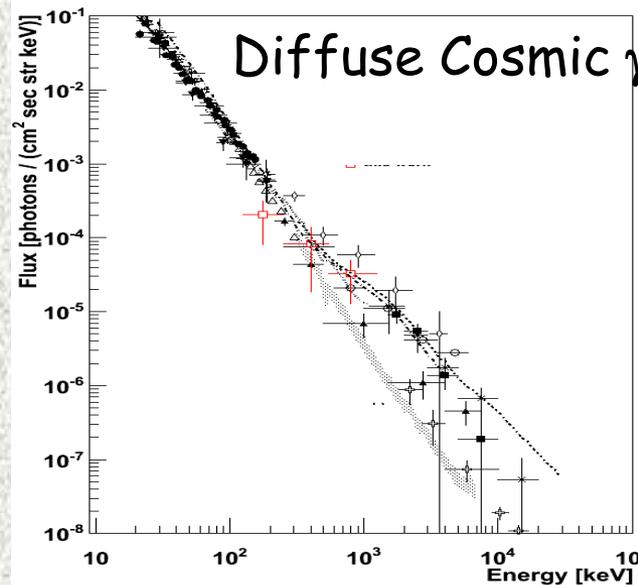
Diffuse Cosmic and Atmospheric gamma rays in 0.1-1MeV  
3hours observation @35km



All Trigger event  $2.3 \times 10^5$  events

Signal  $\Rightarrow$  ~420 events Simulation  $\Rightarrow$  ~400 events (GEANT4 base)

2006 Sep.



# Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment (SMILE) Roadmap

10cm cube camera @ Japan (Sep. 1<sup>st</sup> 2006)



- Observation of diffuse cosmic/atmospheric  $\gamma$   
~400 photons during 3 hours (100 keV~1MeV)

30cm cube camera with Domestic balloon (@Kiruna)

- Observation of Crab/Crg X-1 + REP- $\gamma$



40cm cube camera with long duration observation



- Galactic survey & Gamma-Ray Burst Detection

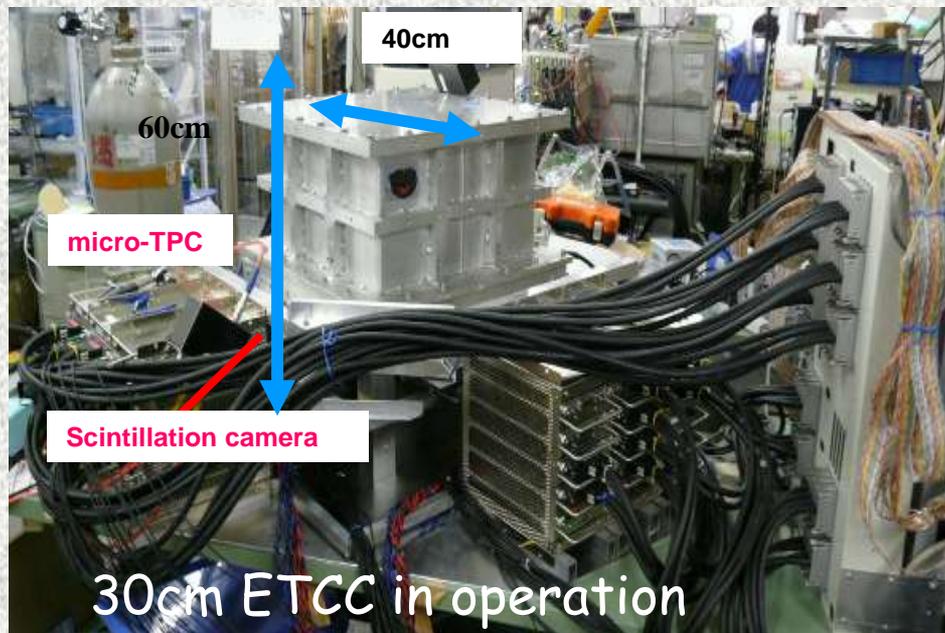
50cm or 1m cube camera with satellite

- All sky survey, detection of highest-z GRB

# SMILE-II project

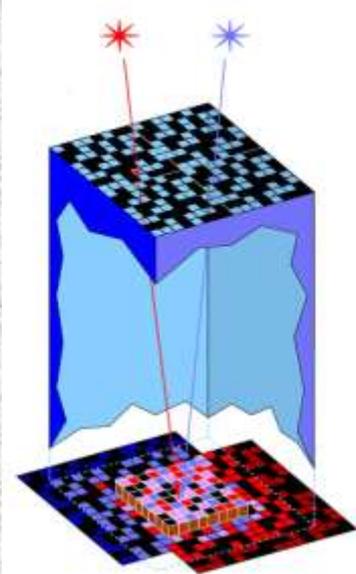
- Frist: Observation of sub-MeV gamma from Crab or CygX-1 with  $>5\sigma$  for 3hours @ Japan 2012 -> 12hour@Kiruna (2012)
- Second: With long flight, Galactic Survey, & GRB new trigger test

Required Sensitivity:  $>10x$  SMILE-I (frist),  $> 20x$ (Second)



# 超遠方GRB ( $z > 10$ ) の検出

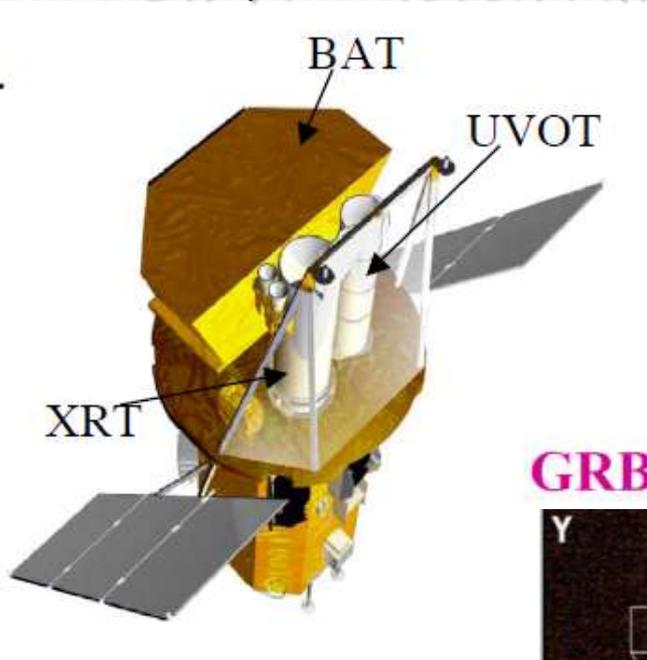
## 米徳氏の話の一部



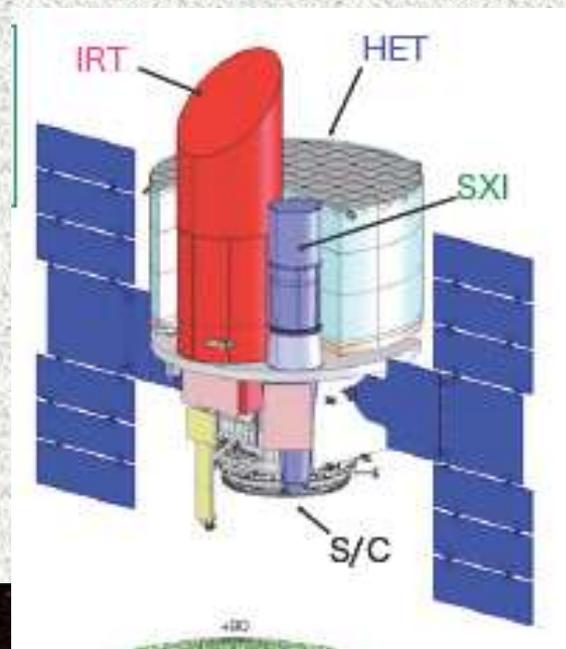
- ▶ 広視野 (Coded Mask) X線イメージング検出器 (バースト検出)  
2分角以下の精度 視野 1str以上

他に、X-ray望遠鏡、赤外線・紫外線望遠鏡を搭載  
(画像化に多くのX線が必要、雑音に弱い)

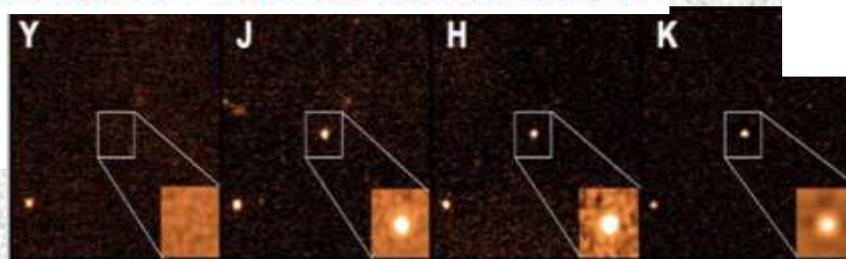
Swift: Photon limit  $z \sim 7$



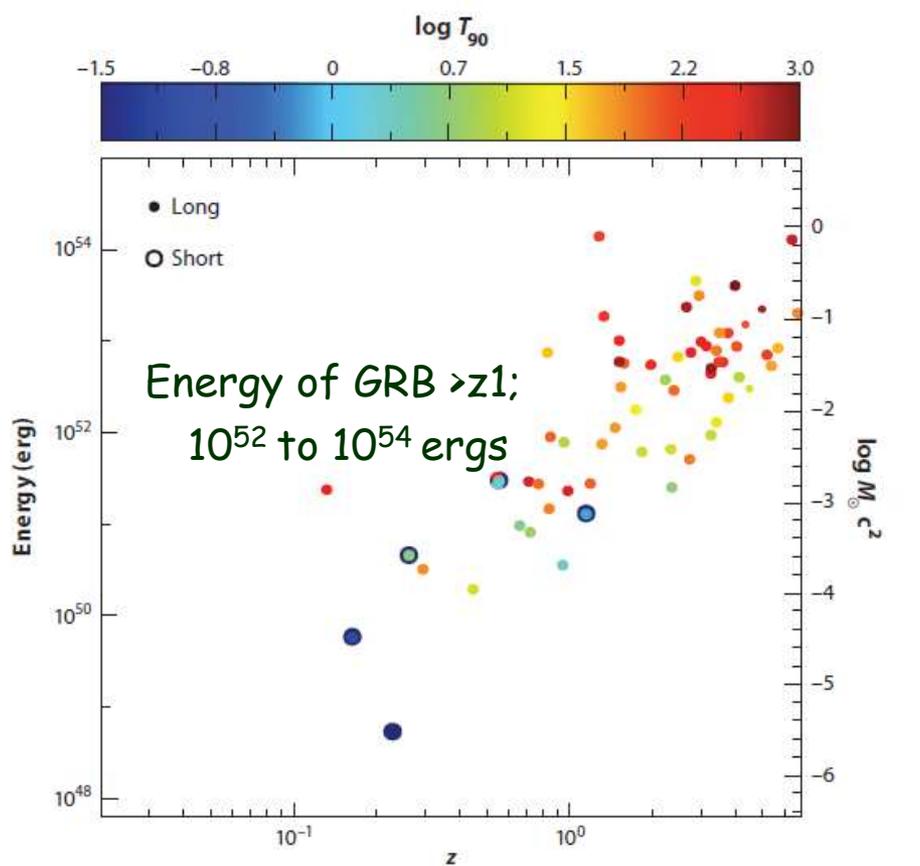
Exist: (10 x Swift)  
 $z \sim 12$



GRB090423 at redshift 8.2

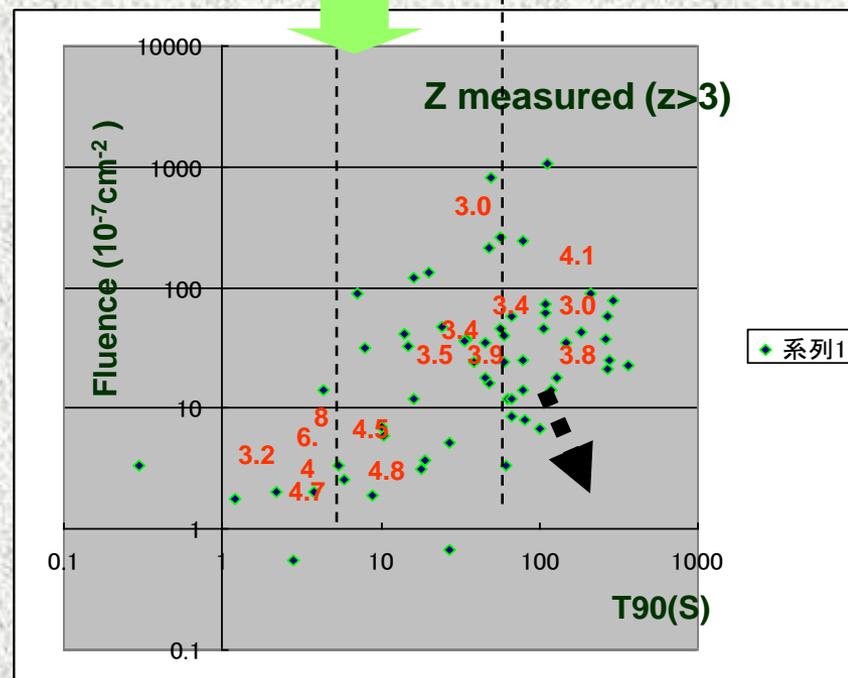
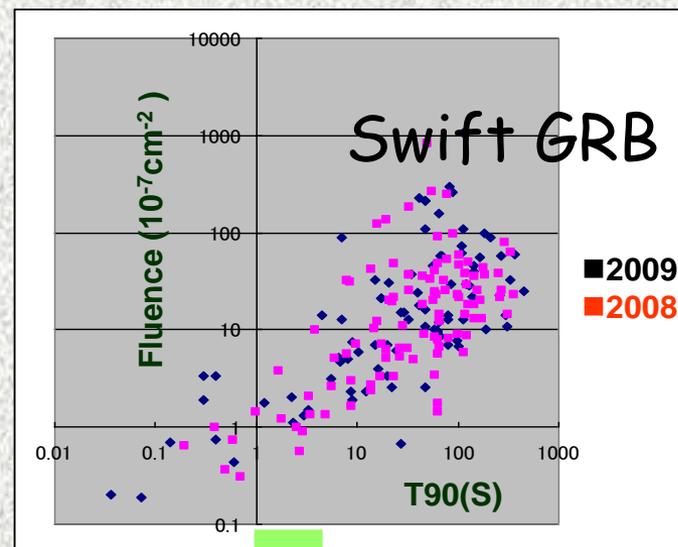


# GRBs detected by Swift



Geherels, Ramirez-Ruiz and Fox(2009)

Trigger bias looks to appear  
above for long GRB with  $z > 4$

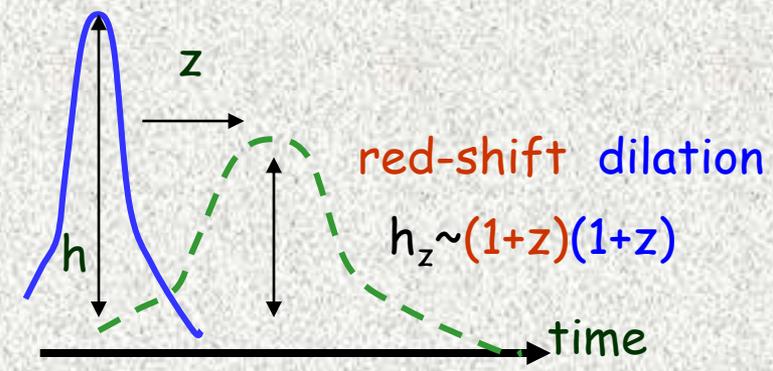


# Sensitivity of X-ray Burst Trigger

➤ Diffuse X-ray BG:  $\sim 10 \text{ ph./cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1} > 5 \text{ keV}$

➤  $\text{Ph.}_{\text{lim}} \propto \sqrt{A}$  (A: Detection Area)  
 $A(10^4 \text{ cm}^2 > 5 \text{ keV}) \rightarrow 10^5 \text{ counts s}^{-1}$  in A  
 $\rightarrow 0.20 \text{ Ph./cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  at  $8\sigma$

➤  $\text{Ph.}_{\text{lim}} \propto h z \sim (1+z)^2$   
 $z+1 \propto (A)^{1/4}$   
 If  $z_{\text{lim}}(\text{Swift}) \sim 7 \rightarrow z_{\text{lim}}(\text{Swift} \times 10) \sim 12$



## Salvaterra et al. 2008

Instrument	Band (keV)	Field of view (sr)	$P_{\text{lim}}$ (photon $\text{s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )	$z_{\text{max}}$	GRBs per year	
					at $z \geq 6$	at $z \geq 10$
Swift	15–150	1.4	0.4	6.3–7.5	1.3–4	0.09–0.1
			0.25	7.0–8.3	2–7	0.16–0.25
			0.1	7.5–9.9	3–16	0.3–0.9
INTEGRAL/IBIS	20–200	0.1	0.2	3.8–5.2	0.1–0.5	<0.01
GLAST/GBM (on-board)	50–300	9	0.7	6.2–6.3	1.2–1.5	<0.1
GLAST/GBM (ground)			0.47	6.8–6.9	1.8–2.4	0.05–0.12
SVOM	4–50	2	1.0	6.7–7.4	2–4	0.1–0.13
EDGE	8–200	2.5	0.6	6.9–8	2–6	0.18–0.23
EXIST	10–600	5	0.16	9.7–11.3	11–56	0.9–2.8

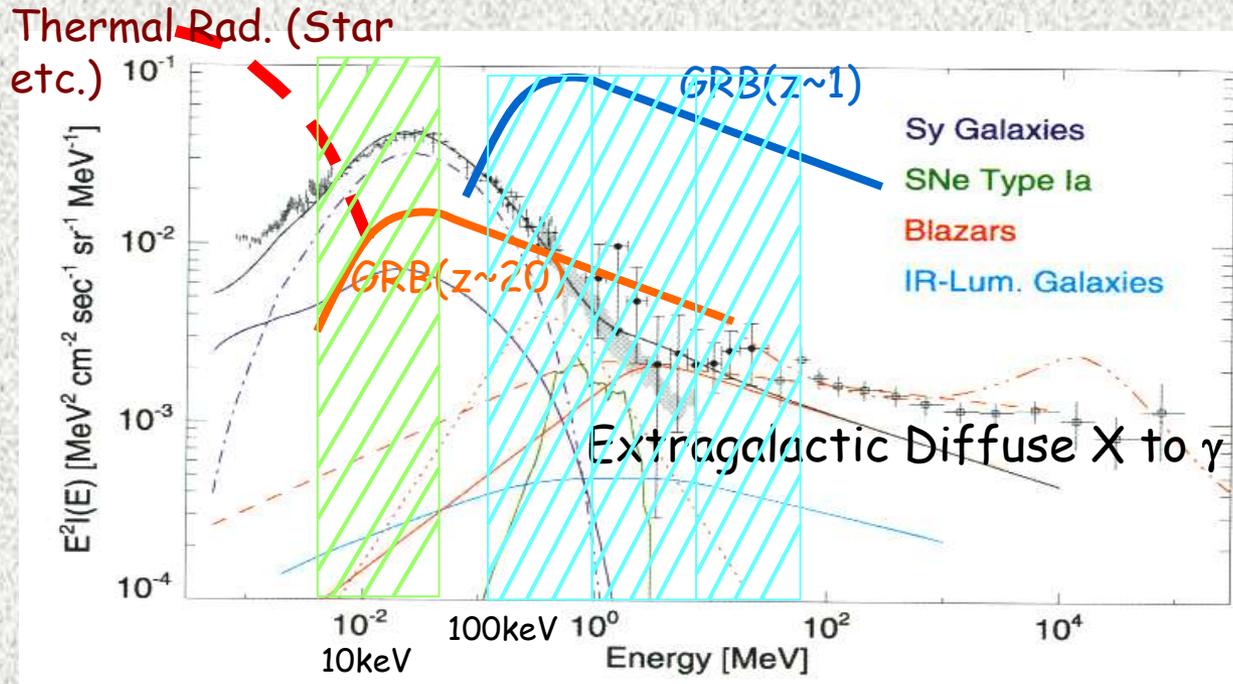
# New Trigger Strategy

- B.G.大 → peak Trigger; sensitivity  $\propto (1+z)^2$  で悪くなる (遠方で急激に悪化)
- B.G.小 → Integrated Trigger; sensitivity  $\propto (1+z)$  (遠方まで見える。)

Imaging ability for each photon

Even  $10^\circ$  resolution  $\rightarrow$  1/100 B.G. of 1 str Detector

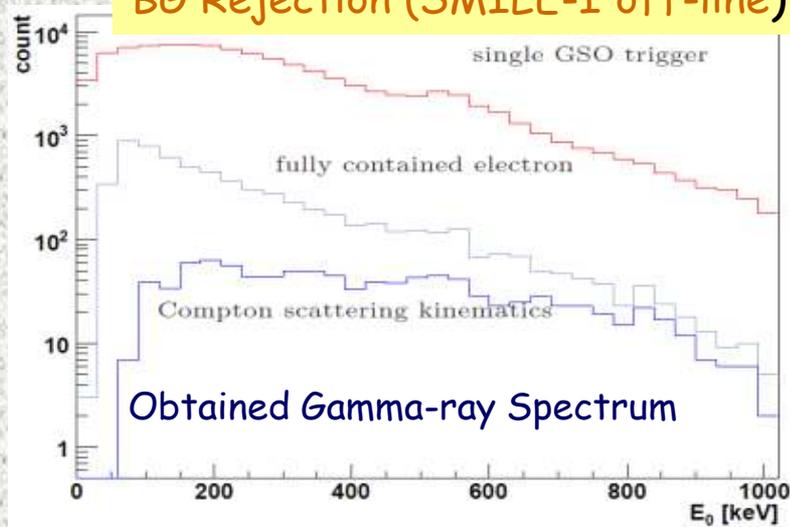
$\rightarrow$  Imaging Trigger photon by photon in ETCC



# Imaging GRB Trigger in Sub-MeV

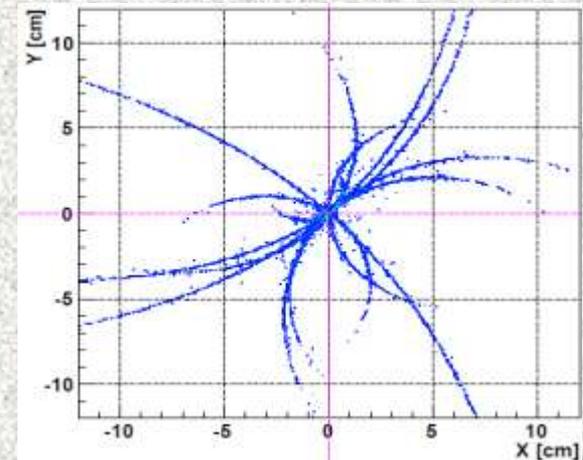
- ETCC measure the each photon direction  $>100\text{keV}$  , and accumulates in  $2^\circ \times 2^\circ$  grid on the sky during  $10, 10^2, 10^3\text{s}$
- Diffuse Cosmic BG  $>100\text{keV}$ ;  $\sim 0.2\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{str}$ ,  
Then  $\rightarrow \sim 80\text{ph.}/10^3\text{s} >100\text{keV}$  in  $4^\circ \times 4^\circ @100\text{cm}^2$
- BG; several 10 x of Diffuse  $\gamma$  but rejected by Kinematical cut

## BG Rejection (SMILE-I off-line)



$2.23 \times 10^5$   
events

↓  
 $420 \gamma$



Several  $\gamma$  Mapping in Lab.

- $P_{lim} \sim 30 \text{ ph.} >100\text{keV}$  in  $4^\circ \times 4^\circ @100\text{cm}^2$  in  $10^2 \text{ sec}$  ( $8\sigma$ )
- Point Accuracy for GRBs  $<0.2^\circ$  for  $300\gamma$ ,  $0.5^\circ$  for  $30\gamma$

# Expected Flux >100keV for GRB@z~20

Fluence(>100keV) -> #of Photon >100keV (>MeV) Position Accuracy.

$10^{-6}$  erg/cm<sup>2</sup>       $\sim 10^3$  photon (several  $\times 10^2$  photon)      <0.1°

$10^{-7}$  erg/cm<sup>2</sup>       $\sim 10^2$  photon (several  $\times 10$  photon)      <0.3°

$10^{-8}$  erg/cm<sup>2</sup>       $\sim 10$  photon (several)       $\sim 1^\circ$

Expected Photon  $\phi$ (>100keV) for GRB @z=20 &  $E_{iso} = 10^{52}$  erg -> 1000 ph.

Detection limit  $\sim 100$ ph. ->  $10^{51}$ erg @z=20 and 3str -> 1 GRB@day

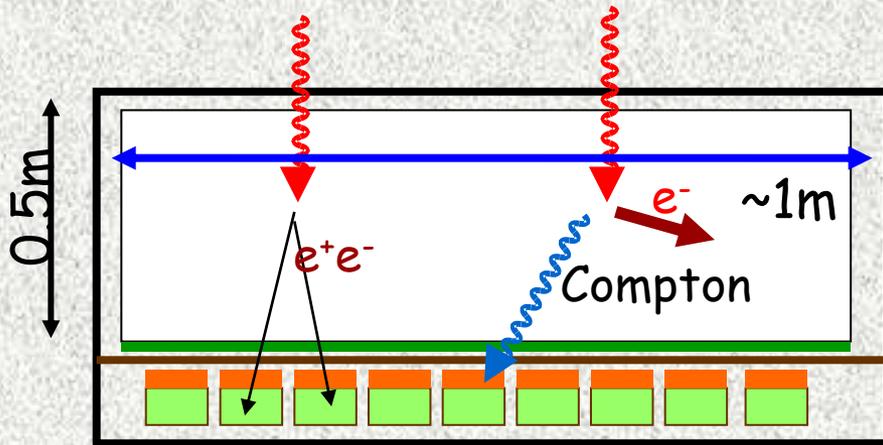
(宇宙の視野内のほぼ全てのGRBが観測可能)

\*Fluence(100keV-10MeV)  $\sim 10 \times$  Fluence(5-50keV) for typical GRB

GRB	z	Epeak (keV)	Fluence ( 5- 50 keV) (erg/cm2)	Peak Flux (ph/cm2/s)	Eiso (10 <sup>52</sup> erg)	Expected $\gamma$ (>100keV)
090423A	20	36 +/- 7	(2.6 +/- 0.2) x 10 <sup>-7</sup> ✓	0.3 +/- 0.1 ✓	89	2.6 x 10 <sup>3</sup>
080913	20	48 (+83, -18)	(2.1 +/- 0.2) x 10 <sup>-7</sup> ✓	0.2 +/- 0.1 ✓	7	2 x 10 <sup>3</sup>
050904	20	152 (+116, -52) !?	(1.7 +/- 0.1) x 10 <sup>-6</sup> ✓	0.1 +/- 0.1 ▲	38	1.7 x 10 <sup>4</sup>
060927	20	23 (+8, -3)	(0.3 +/- 0.1) x 10 <sup>-6</sup> ✓	0.3 +/- 0.1 ✓		3 x 10 <sup>3</sup>
060510B	20	27 +/- 17	(1.2 +/- 0.1) x 10 <sup>-6</sup> ✓	0.1 +/- 0.1 ▲	20	1.2 x 10 <sup>4</sup>
060223A	20	18 (+26, -3)	(1.7 +/- 0.1) x 10 <sup>-7</sup> ✓	0.1 +/- 0.1 ▲	3	1.7 x 10 <sup>3</sup>
060206	20	18 +/- 5	(2.0 +/- 0.1) x 10 <sup>-7</sup> ✓	0.2 +/- 0.1 ✓	5	2 x 10 <sup>3</sup>

using Dr. Yonetokus' table

# Satellite ETCC Detector



Double Scintillator  
( $\text{LaBr}_3 + \text{BGO}$ ?)

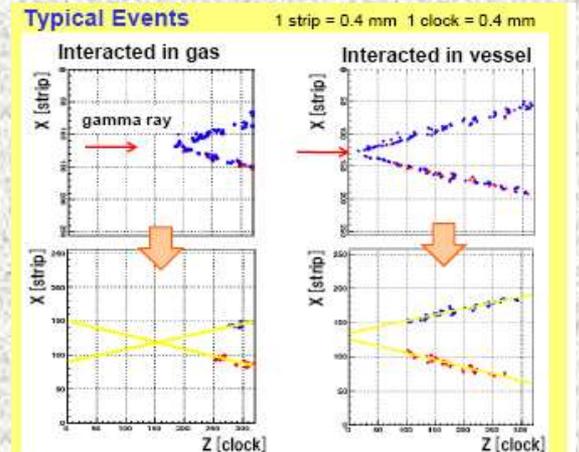
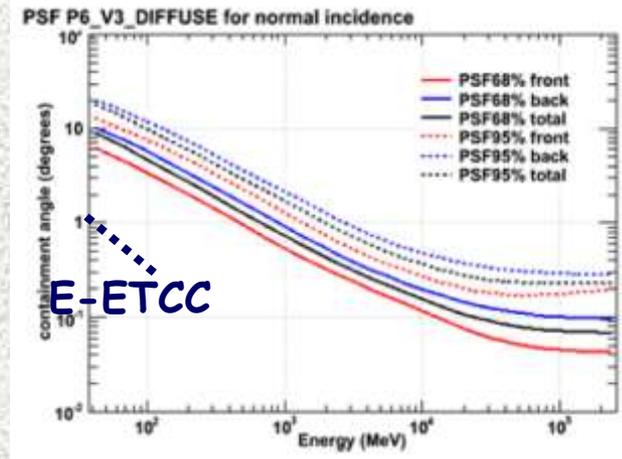
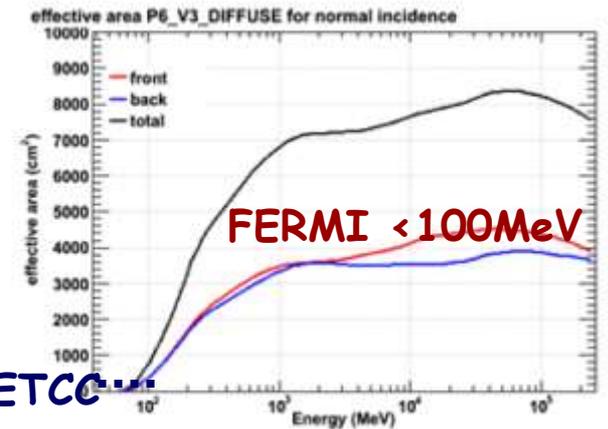
## Requirements

- Detection Area  $\sim 100\text{cm}^2$  from 0.1-100MeV
- Angular Res.  $\sim 4^\circ - \sim 0.3^\circ < 0.1-100\text{MeV}$
- $\rightarrow$  Position Resolution  $0.2^\circ$  for 100 photons

## Satellite ETCC=

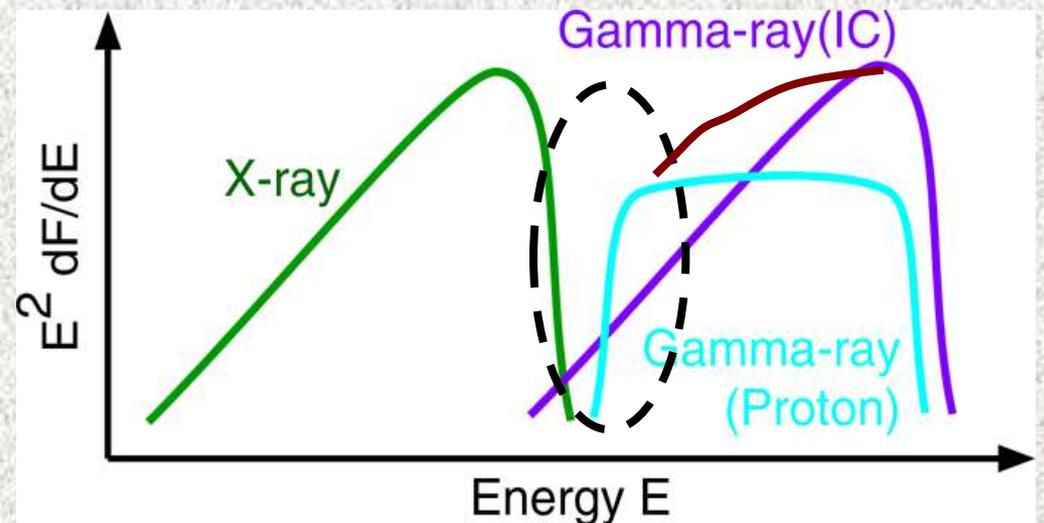
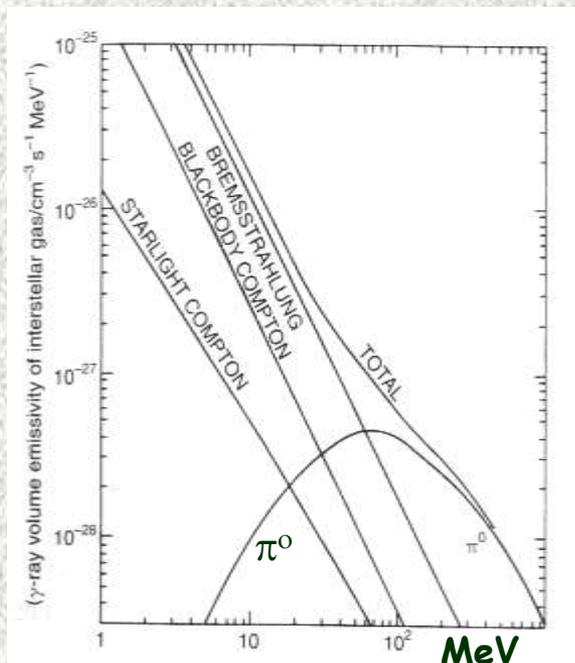
ETCC with Double Scintillators for  $e^+e^-$

- $\rightarrow \sim 1 \times 1 \times 0.5\text{m}^3$  Detection Volume
- $\rightarrow$  Effective Area  $\sim 100\text{cm}^2$ .



# Other Astrophysics in Pair mode

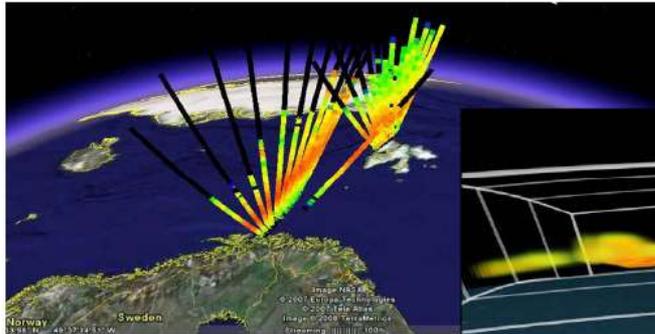
- Except usual Compton Camera objects
- Good & High Statistical Images for 50-100MeV  
 $\Delta\theta \ll 0.5^\circ$
- Cosmic-ray origin (Proton identification from Spectrum; 10-100MeV)



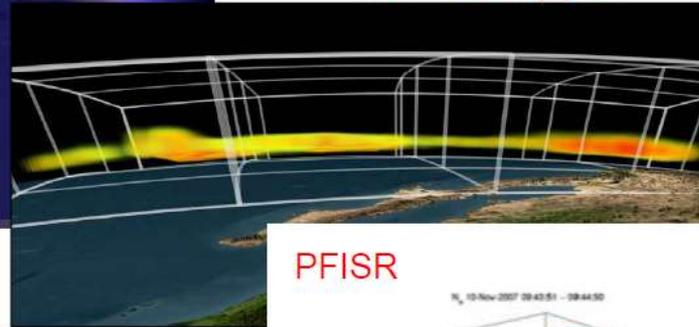
# EISCATとの連携 極域ガンマ線バースト

Study of the lower thermospheric wind  
磁気圏—電離圏—熱圏結合

EISCAT



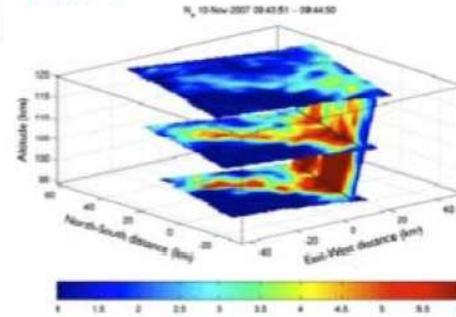
EISCAT\_3D



EISCAT\_3Dでは現行のアンテナスキャンに代わり、真の広域3次元・高解像度観測が実現する。  
これにより、観測上の制約から難しかった多くの研究課題に対してブレークスルーが期待される。

2008.10.30-31 Council 71

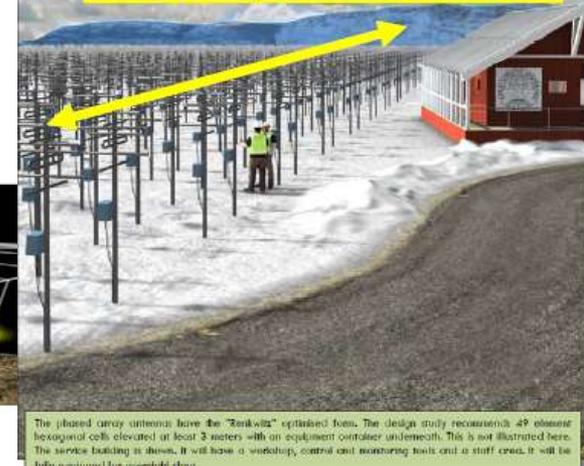
PFISR



(Semeter, 2008)

送・受信局(コア)

直径120 m (約16,000本のアンテナ)



The (ribbed) array antennas have the "Berkwitz" optimized form. The design study recommended 49 element hexagonal cells elevated at least 3 meters with an equipment container underneath. This is not illustrated here. The service building is shown. It will have a workshop, control and monitoring tools and a staff canteen. It will be fully automated for remote data collection.

今年初め、  
EISCAT-Director  
Dr. Turunenから  
共同観測の提案

EISCAT-Japan, 名大STE研、国立極地研  
他にも、京大理、京大生存圏研など関連研究者多数

# $\gamma$ -ray burst due to Relativistic Electron Precipitation (REP: 相対論的電子降下) in 1996 @Kiruna

K.R.Lorentzen et al.,(2000)

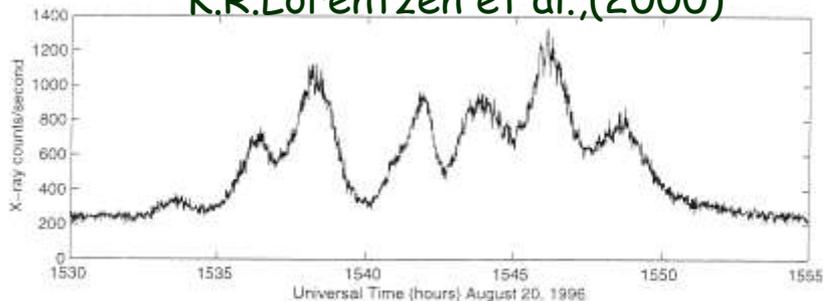
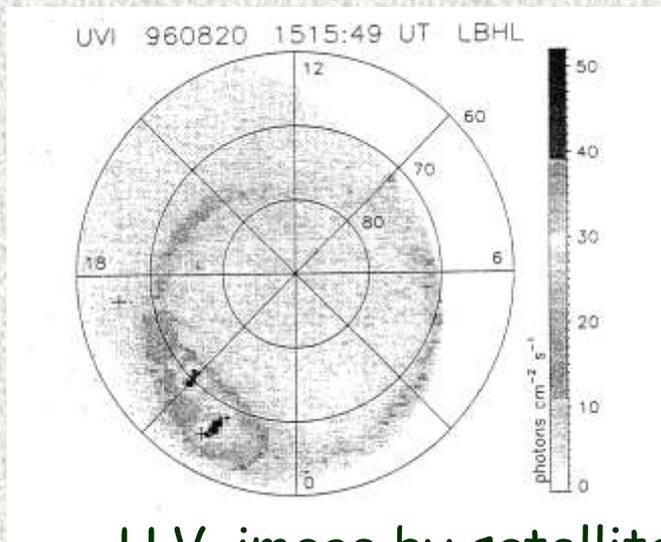


Figure 1. X-ray imager data taken during the relativistic electron precipitation event of August 20, 1996. The X-ray count rate between 20 and 120 keV is averaged over 1 s. The 10–20 s modulation is most clearly visible superposed on the peak starting near 1545 UT.

- REPバースト、測定例極めて少数。
- SIMILE-II(30×30×30cm ETCC)では2000  $\gamma$  が観測可能(大気雑音20 $\gamma$ 程度;イメージング能力)

- 気球観測は、REPバーストの位置分布と時間変化を一度に観測できる唯一の手段。
- 太陽風陽子、中性子、電子バーストも観測。

**• ERGとの共同観測一>  
相対論的加速の精密解析が可能！**



U.V. image by satellite

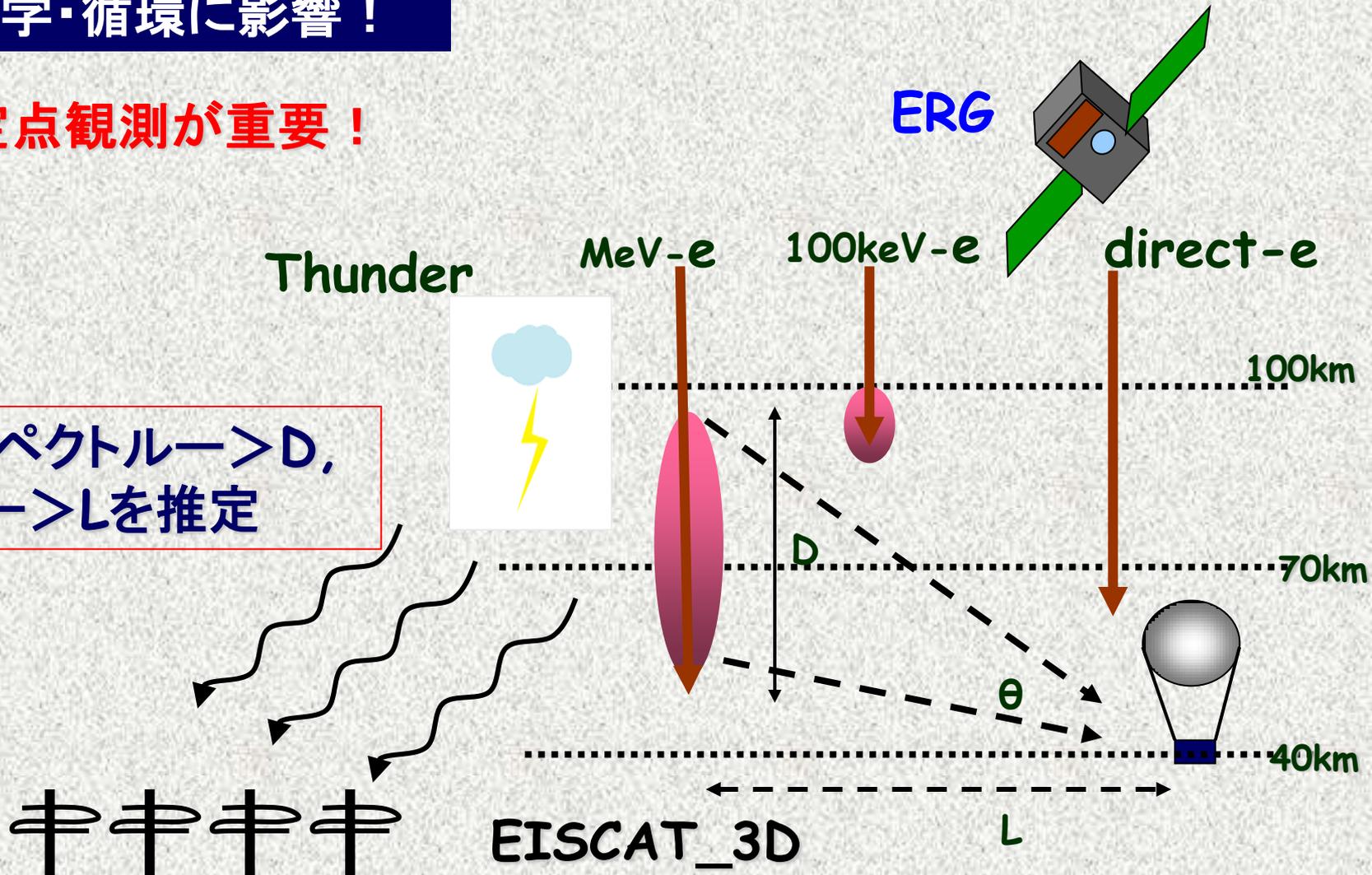
# REP $\gamma$ 線観測

REP: O, Nをイオン化、  
オゾン層形成など  
大気化学・循環に影響!

$\gamma$ 線イメージング、スペクトル、方位と  
Light-Curveを同時測定

定点観測が重要!

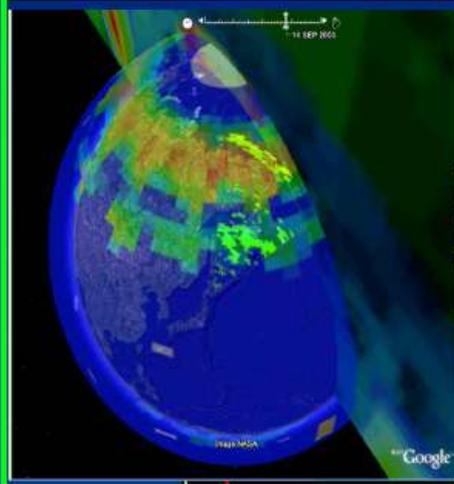
$\gamma$ 線スペクトル  $\rightarrow$  D,  
Dと $\theta$   $\rightarrow$  Lを推定



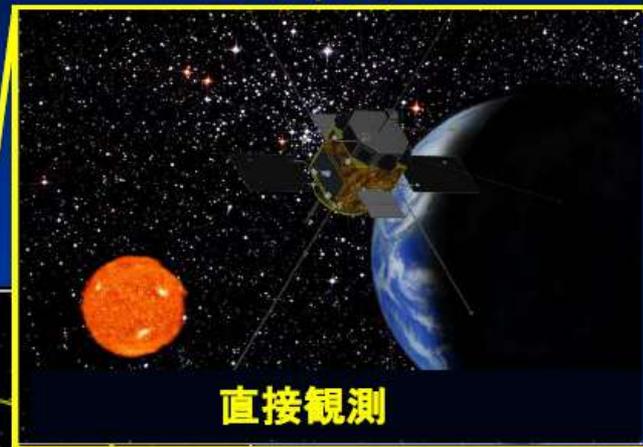
## 2. ERG プロジェクトチーム

### ERG-地上ネットワーク

#### リモートセンシング

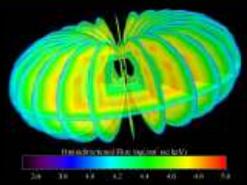


### ERG-衛星

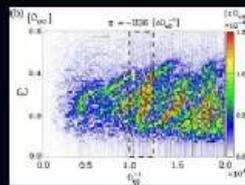


直接観測

### ERG-理論・シミュレーション・総合解析



マクロ・マイクロシミュレーション



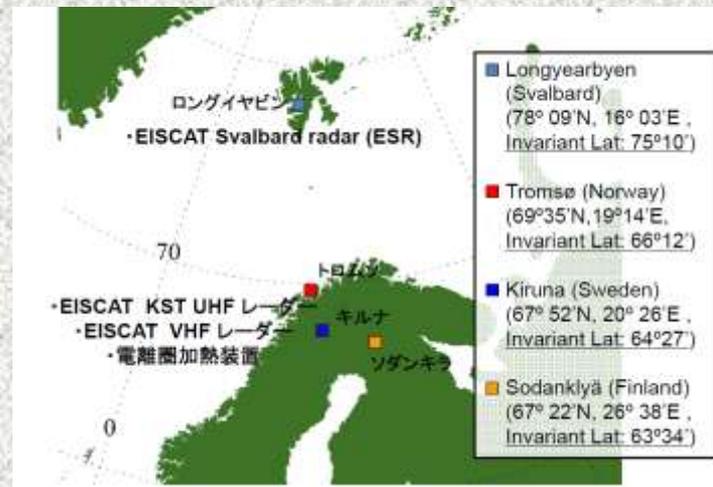
ERG-science coordination team

ERG-プロジェクトサイエンスセンター

2013年予定。  
極地研、名大STE  
研、JAXA、東  
北大、京大他

衛星・地上・シミュレーションのデータを統合的に研究・解析。

# 北極ガンマ線バースト気球観測 (定常且つ長期観測の拠点)



- スウェーデン、キルナ 20- 40時間観測可能、周回観測一>年間300時間も可能。
- 気球、3トン(観測装置 2.トン程度)が可能。  
大型装置、複数装置の観測が可能
- 2012年テスト観測、2013年より本格観測
- $\sim 1\text{m}^2$  ETCC(0.5-1t,  $\sim 100\text{cm}^2$  Eff. Area)  
観測時間 $\times$ Eff.Area $\sim 3 \times 10^4$   $\text{cm}^2 \cdot \text{時間}/\text{年}$
- Multi-MeV(領域も観測可能)
- 小型衛星ETCC(400kg、 $\sim 15\text{cm}^2$ 、MeV領域以下)  
観測時間 $\times$ Eff.Area $\sim 6 \times 10^4$   $\text{cm}^2 \cdot \text{時間}/\text{年}$

# まとめ(今後)

- ▶ 中型ETCC, SMILE-II 2012 @ Kirunaで放球へ。
- ▶ SMILE-II は、天体MeV $\gamma$ 線と REP- $\gamma$ , のイメージング測定。
- ▶ さらに毎年100時間程度の観測  
地球( REP- $\gamma$ 、雷- $\gamma$ )、 宇宙(銀河探査、GRB検出の試験)。
- ▶ ガンマ線バースト現象科学  
粒子加速機構の精密測定、地球環境、宇宙初期研究
- ▶ 定点観測(気球の必要性)による新しい地球・宇宙観測基地へ
- ▶ 極地バースト $\gamma$ 観測グループ  
京大(理、生存圏研)、名大STE研、極地研、北大理、JAXA(ERG)、  
+EISCAT\_3D(欧州) (JAXA気球グループはサポート)
- ▶ 宇宙はGRB探査グループ(米徳氏の講演)
- ▶ 分野横断型競争資金 +複数組織からの小規模概算要求