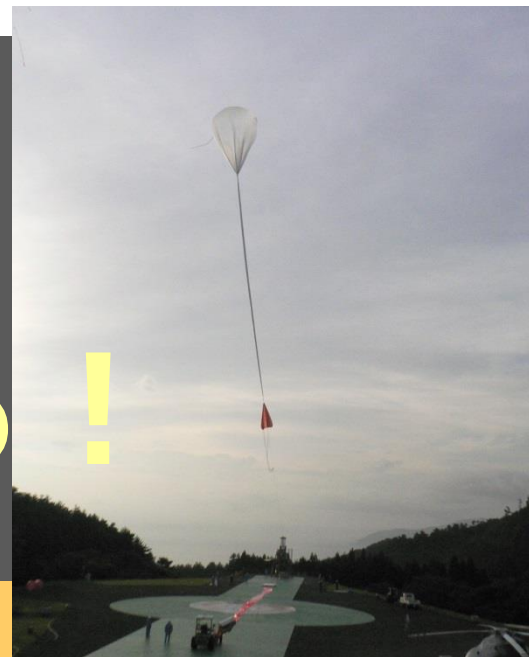


シンポジウム「宇宙に広がる人類文明の未来」

宇宙の怪傑 ガンマ線を捕まえる！



水村 好貴 → インフルエンザ

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

代理 谷森 達

京都大学 宇宙総合学研究ユニット
理学研究科



ガンマ線観測で狙えるサイエンス

基本的には宇宙の高エネルギー現象と密接に関係

◆宇宙での元素合成

超新星残骸,
銀河面のラインマッピング

◆強重力環境の物理

ブラックホール天体

◆宇宙線の加速

活動銀河核、パルサー、など

◆宇宙の進化

初期宇宙からのガンマ線バースト

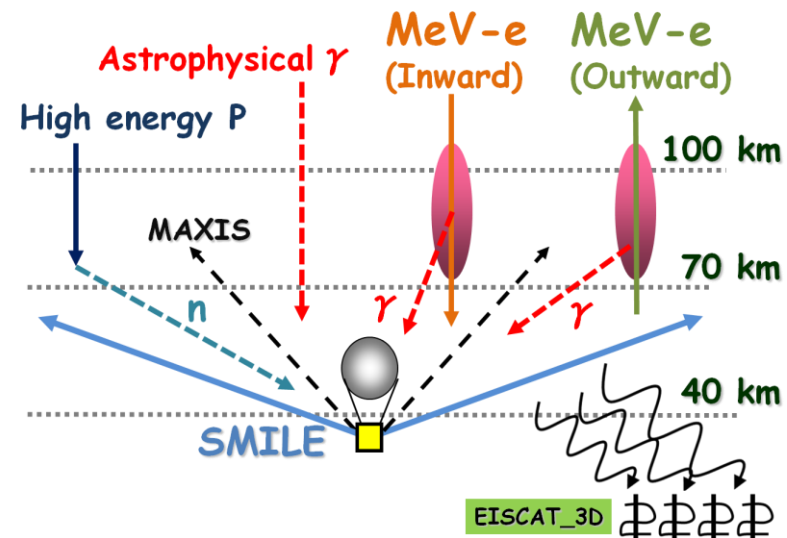
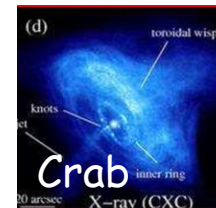
◆地球科学

地球大気内でのガンマ線バースト現象
(Relativistic Electron Precipitation)

↓
極域周回気球なら可能

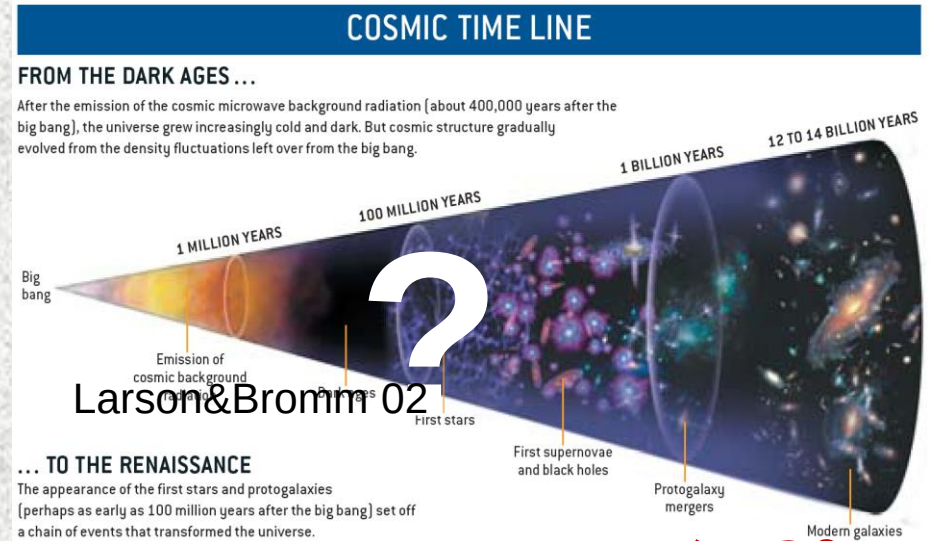
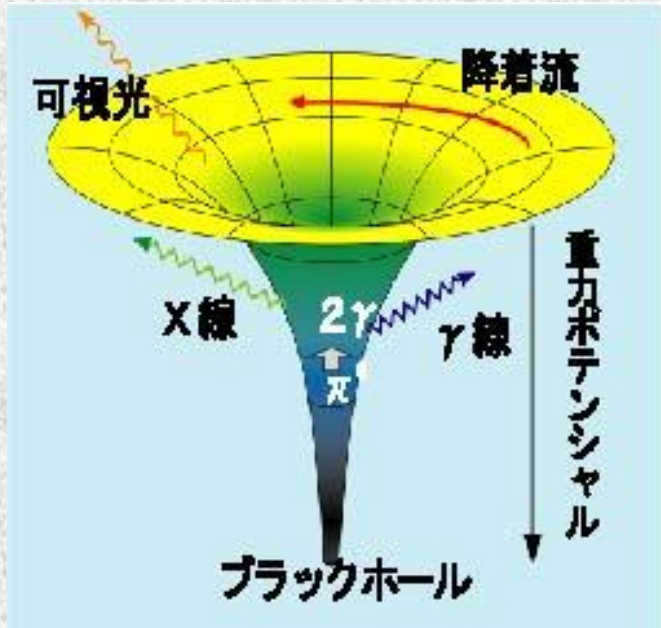
MeVガンマ線天文学

高感度な衛星搭載装置で、
目指す。



MeVガンマ線天文学とは

GRB => 宇宙最大事象 10-1000倍 のSuper Nova



GRB

$z \sim 6-30$

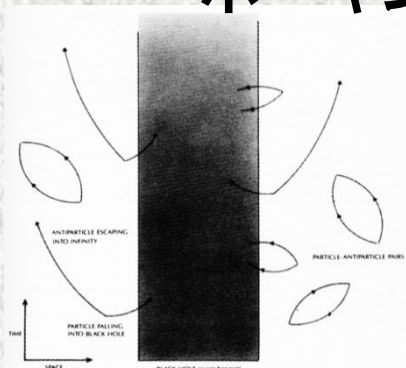
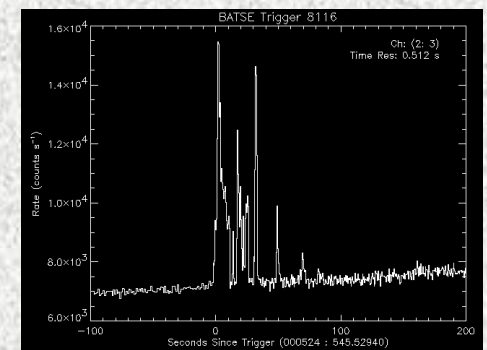
銀河、クエーサー

$z \sim 7$

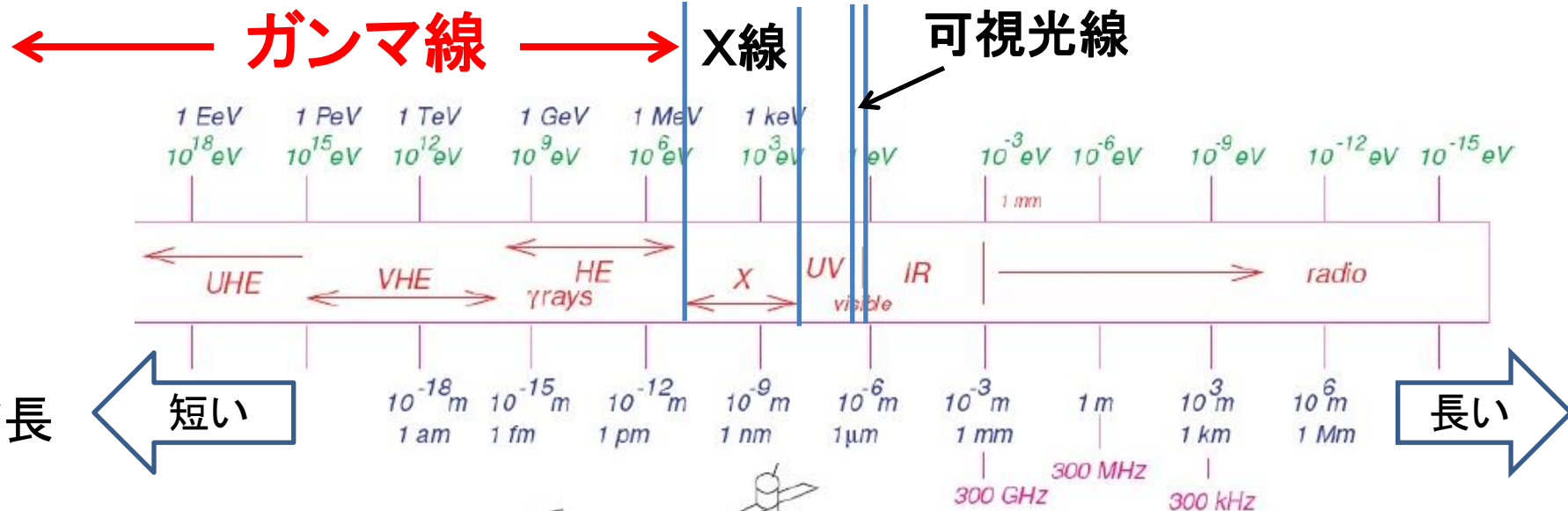
ホーキングBH(ビッグバン)

$$\hbar\omega \sim 100 \text{ MeV} \left(\frac{10^{15} \text{ g}}{M} \right)$$

ホーキングBH
現在 熱的MeV
ガンマ線放射天体



一口にガンマ線と言っても



波長

短い

長い

大気への侵入深さ

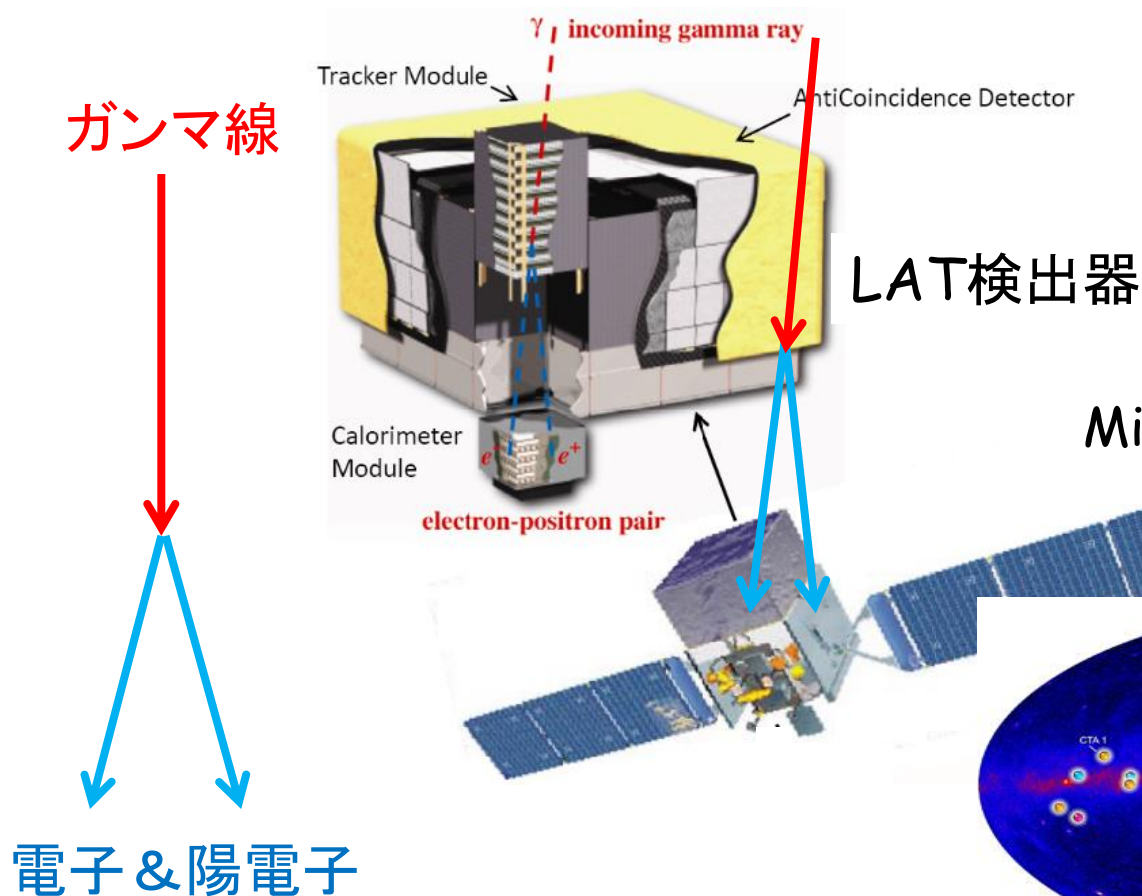
何桁もの波長帯に広がっていて、
その観測方法は様々



N. Tonello
(Ph.D Thesis, 2006)

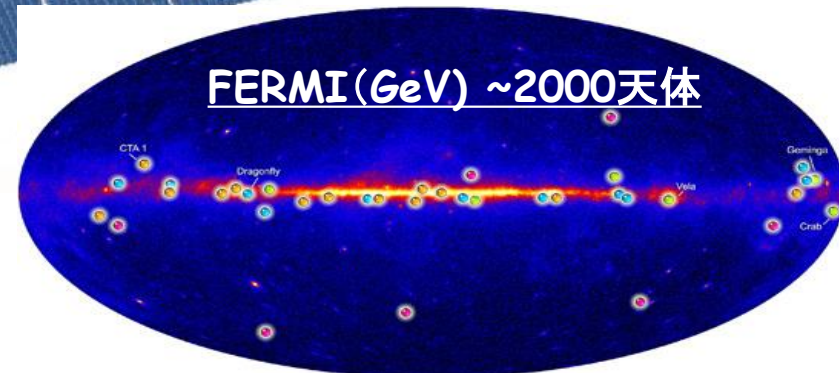
例えば、 1 GeV (10^9 eV) のガンマ線

- ◆ 対生成で生じた電子 & 陽電子のペアを捕まえる！
⇒ 間接的に、入射したガンマ線の取り調べ



Michelson+ (2010)

Fermi衛星

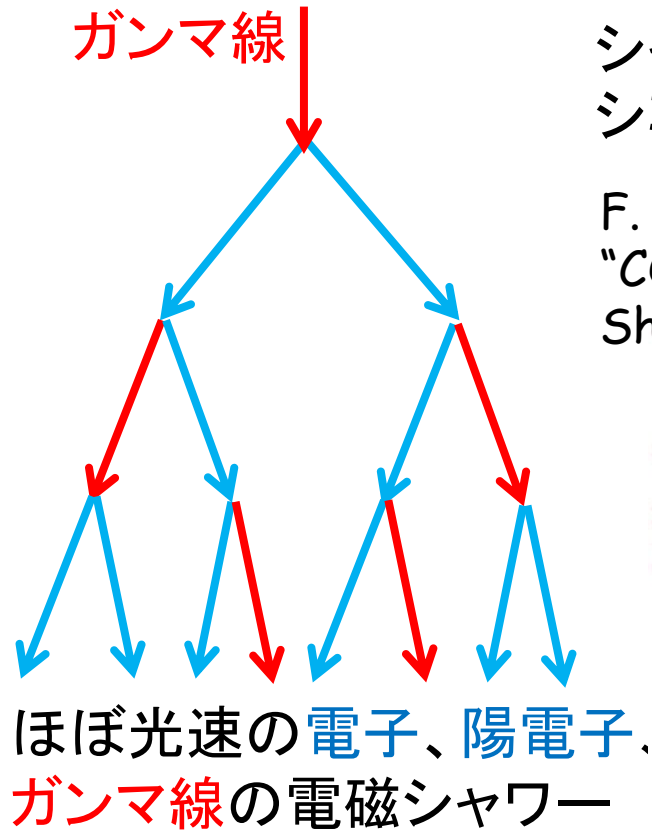


Fermi Pulsar Detections

- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

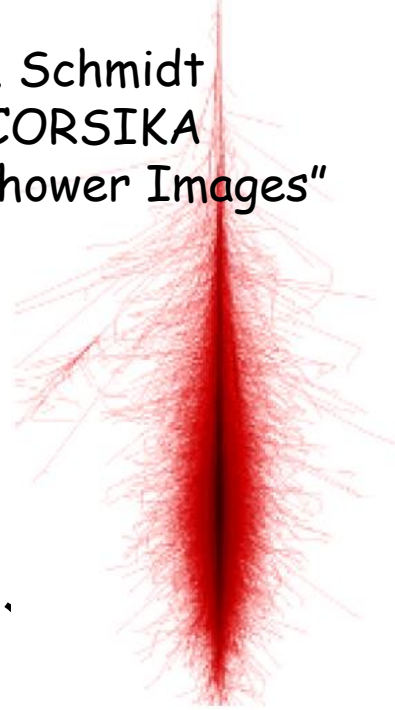
例えば、1 TeV (10^{12} eV) のガンマ線

◆ 大気中で生じる電磁シャワーからの
二次放射を捕まえる！ ⇒ 入射したガンマ線を推定！

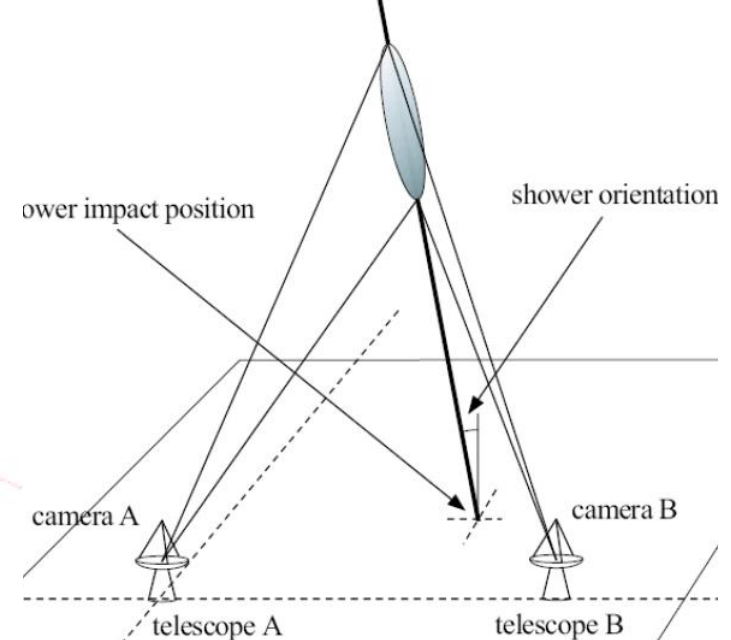


シャワー発達の
シミュレーション

F. Schmidt
"CORSIKA
Shower Images"



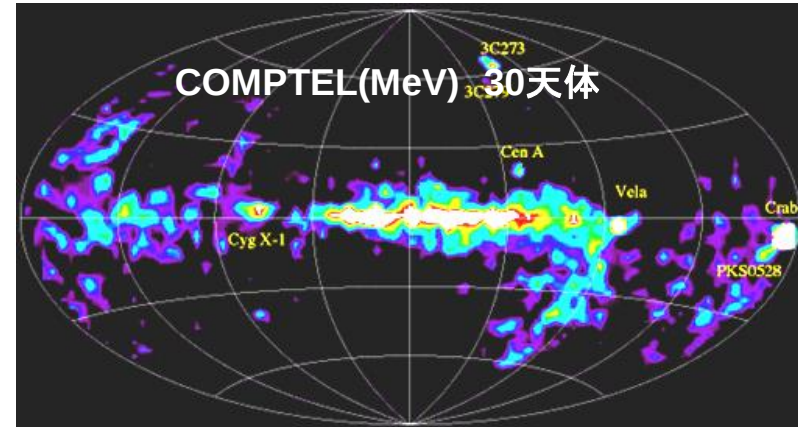
地上の複数台の望遠鏡で、
シャワー形状を3次的に測定



荷電粒子がチェレンコフ光を放射！
(衝撃波の光版)

例えば、 1 MeV (10^6 eV) のガンマ線

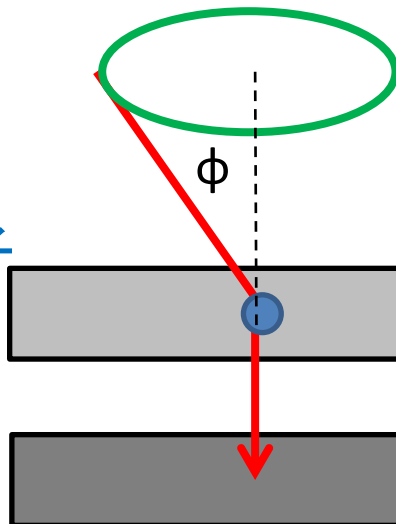
- ◆ コンプトン散乱で反跳した電子と、散乱したガンマ線を測定！
⇒ 元々のガンマ線の情報を推定！



ガンマ線

ϕ

電子



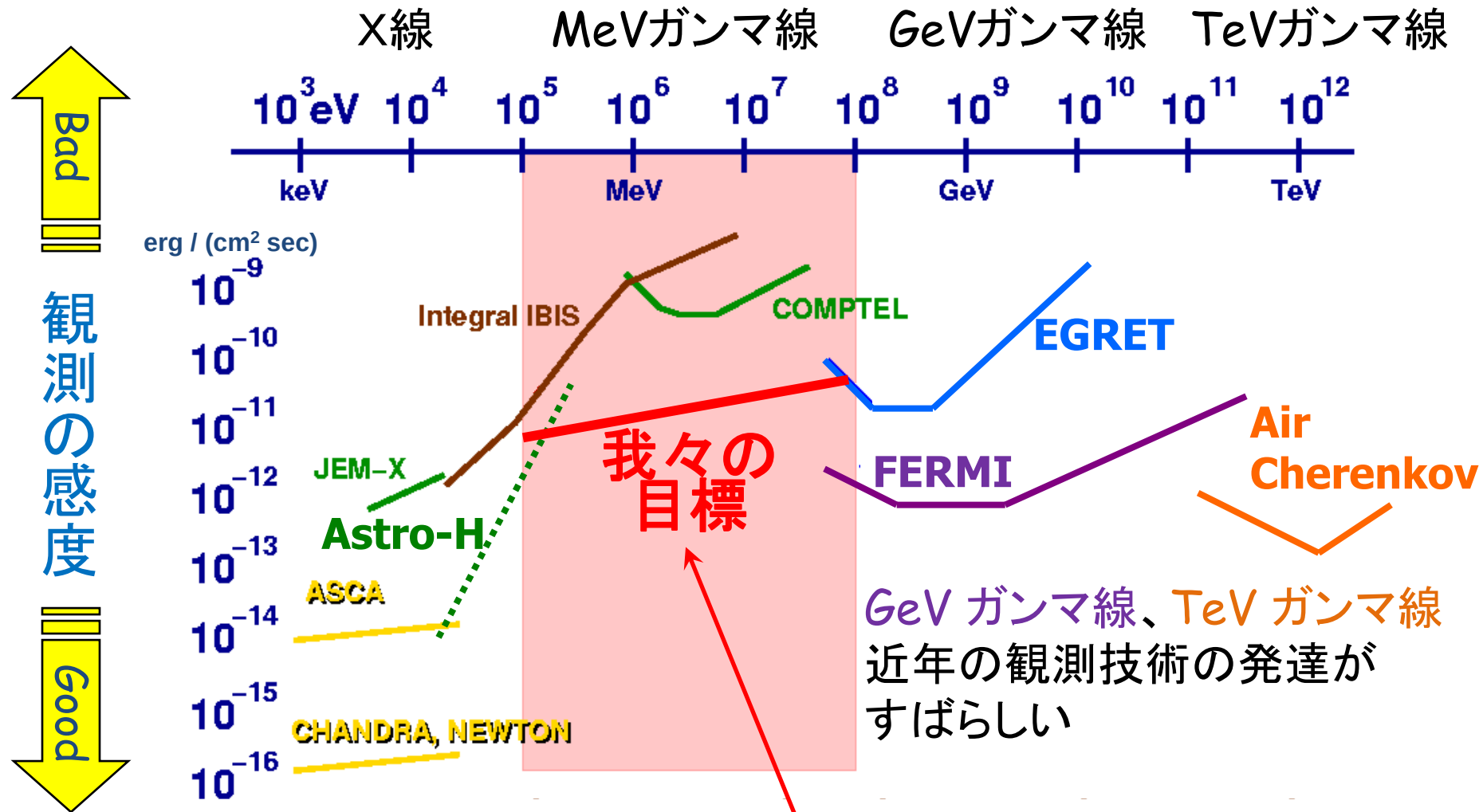
散乱角 ϕ を決定可能

↓
この円周方向のどこかから、
ガンマ線が入射したと推定可

前段検出器

後段検出器

宇宙怪傑(ガンマ線)の観測包囲網！！

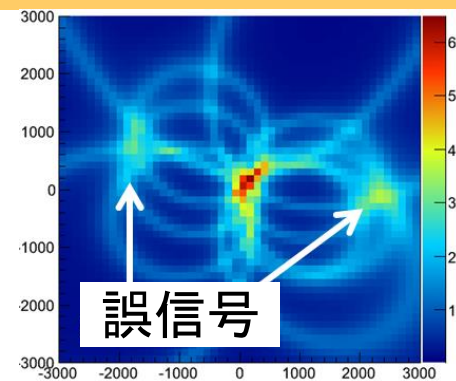
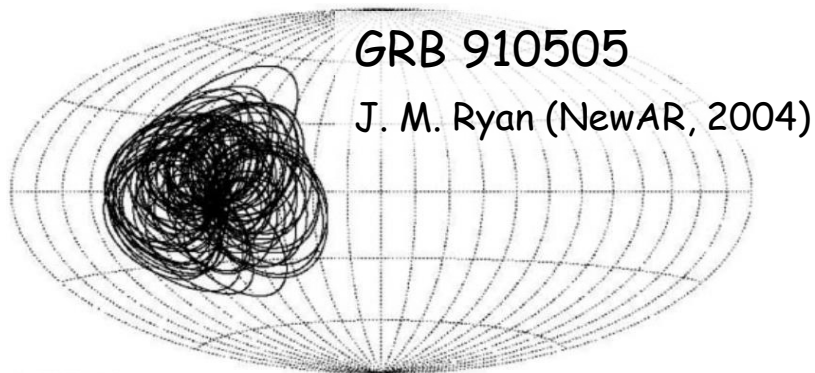
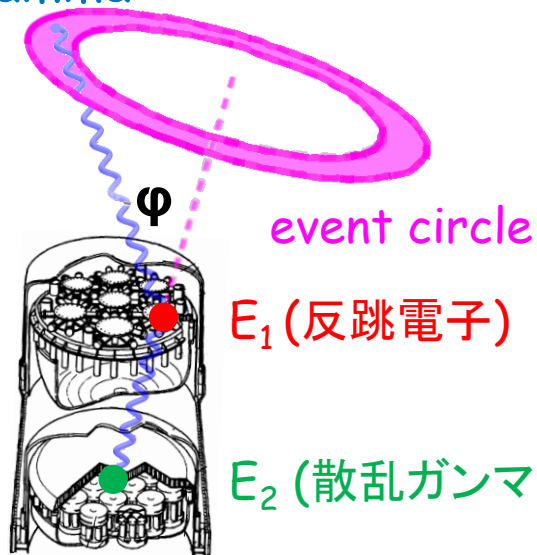


X線領域では、
もう逃げられない！

COMPTEL以降、発展のない
MeVガンマ線をしっかり捕まえたい！

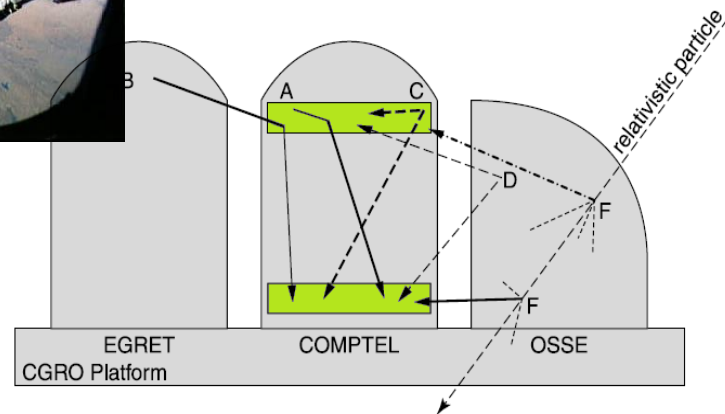
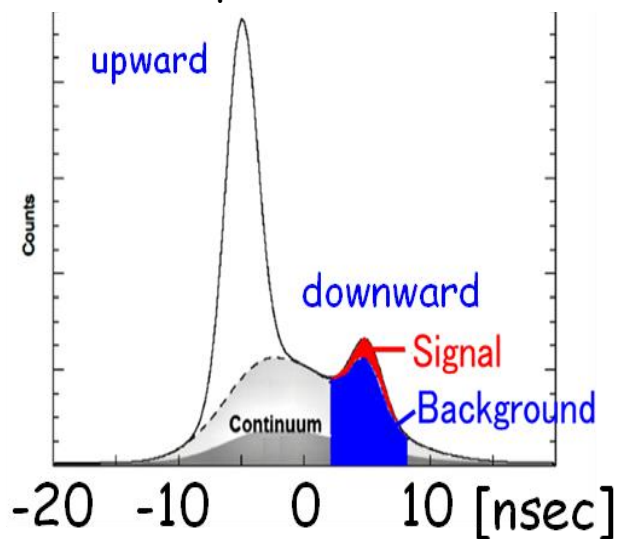
MeVガンマ線観測の難しさ

gamma



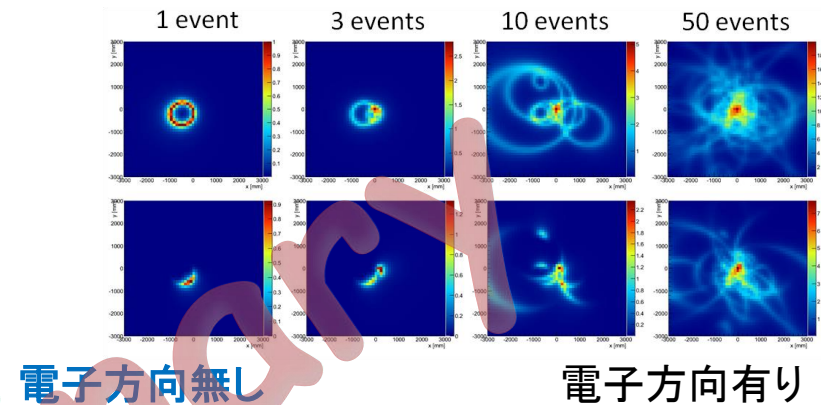
- ① イメージング(撮像)の技術的難度
- ② 大量のバックグラウンドの存在

G. Weidenspointner+ (A&A, 2001)



バックグラウンド除去能力に優れ、撮像能力も高い検出器が必要！

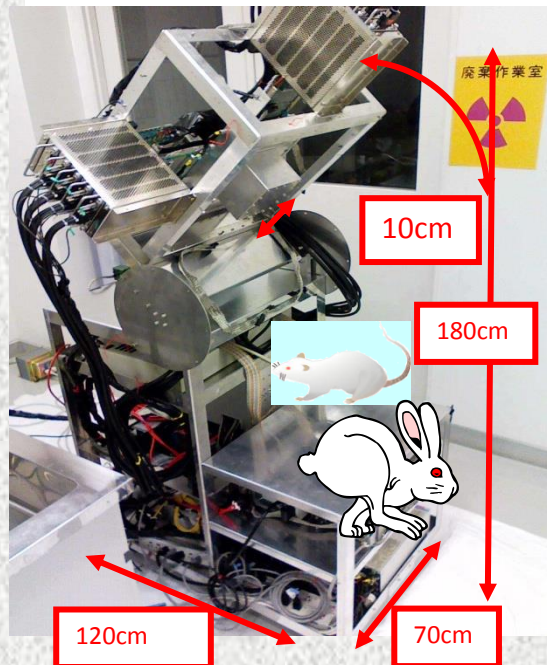
◆ 前段検出器にガスを用い、粒子の3次元飛跡をも測定する新しいタイプのガンマ線カメラ(逆転の発想！)



- ◆ 高い撮像能力
 - 1光子毎に到来方向を決定可
- ◆ バックグラウンド除去
 - 運動学チェック
 - エネルギー損失率による粒子識別
- ◆ 広視野 ~4 str

ETCC for Molecular Imaging

10cm ETCC-Medical



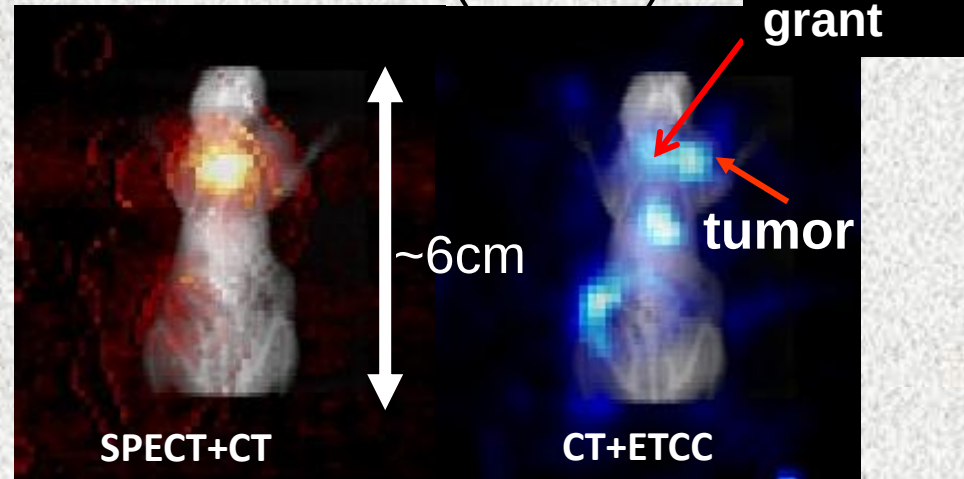
Recovery error ~10%

Position res. ~8mm(FWHM) at 10cm
front @551keV, 4-5mm @1MeV

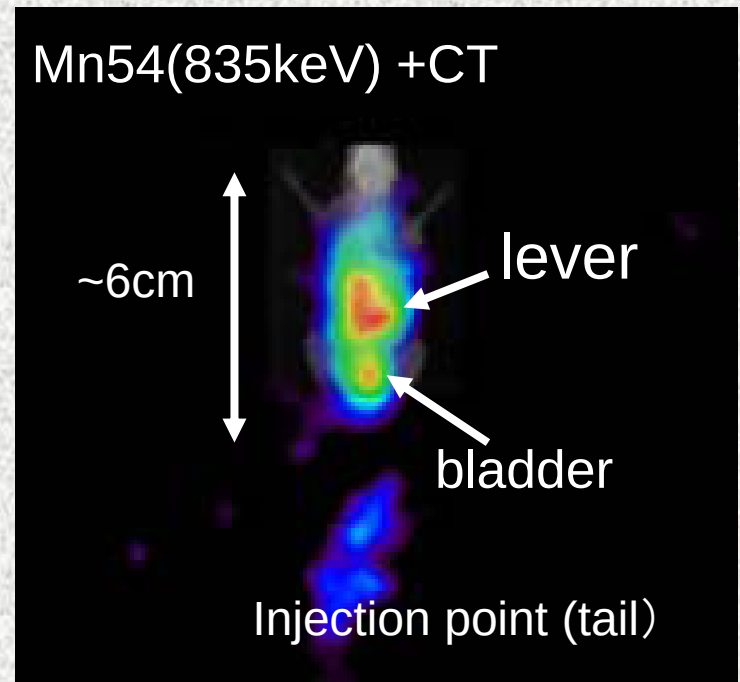
核物質を選ばない！
40以上の核種（分子イメージン
グ）

Ca, Fe, Na, Zn, Cu, Mn, S,

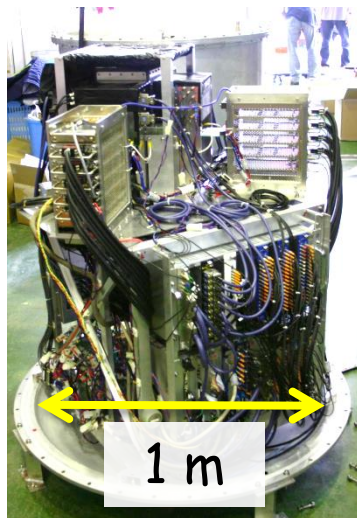
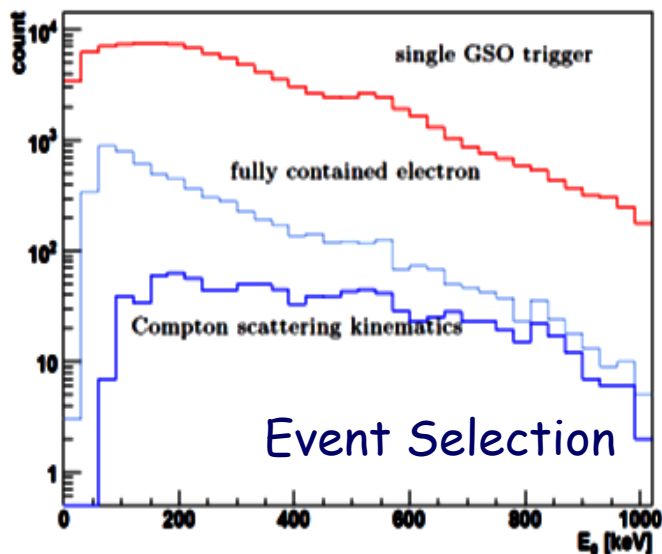
I-131-MIBG(364keV)



Mn54(835keV) +CT



SMILE-I $\Rightarrow$ SMILE-II

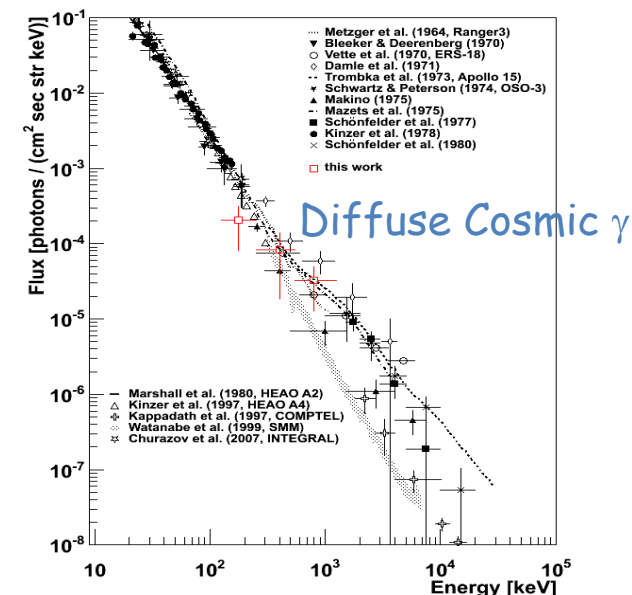


SMILE-I

(10cm)³ サイズ検出器

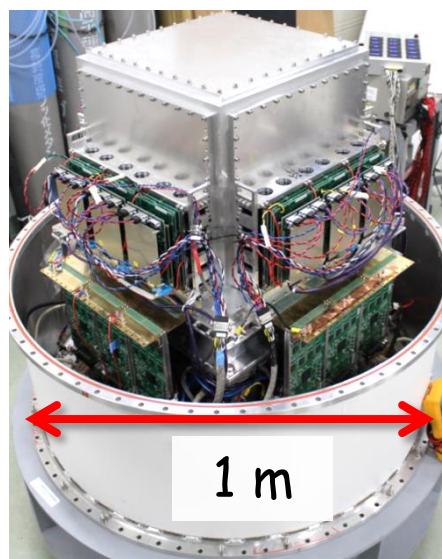
- ◆ 気球高度での動作試験
- ◆ 大気ガンマ線 & 宇宙拡散ガンマ線の測定

8 時間の飛行で実験に成功
@ Japan (Sep. 1, 2006)



Takada et al. ApJ (2011)

SMILE-II



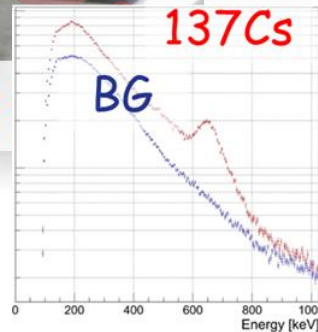
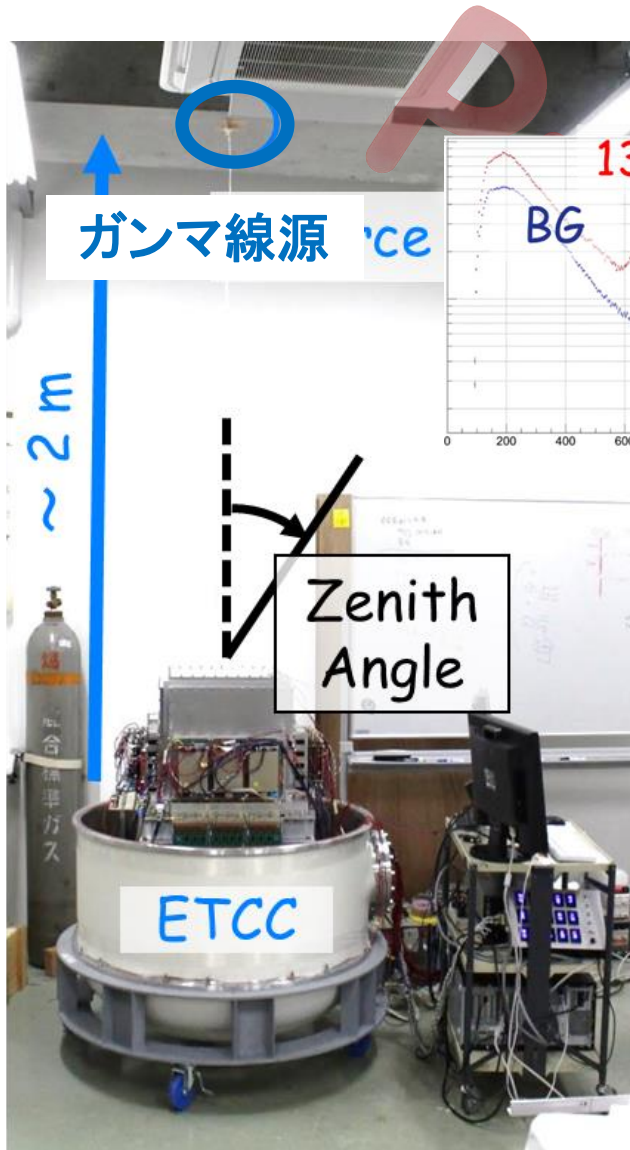
(30cm)³ サイズ検出器

- ◆ ガンマ線撮像の試験
- ◆ カニ星雲の観測

検出するための装置要求値
有効面積 $>0.5 \text{ cm}^2$
角度分解能 $<10^\circ$

1日程度の飛行
@ Fort Sumner (2014—2015)

SMILE-II ETCC の基礎性能試験

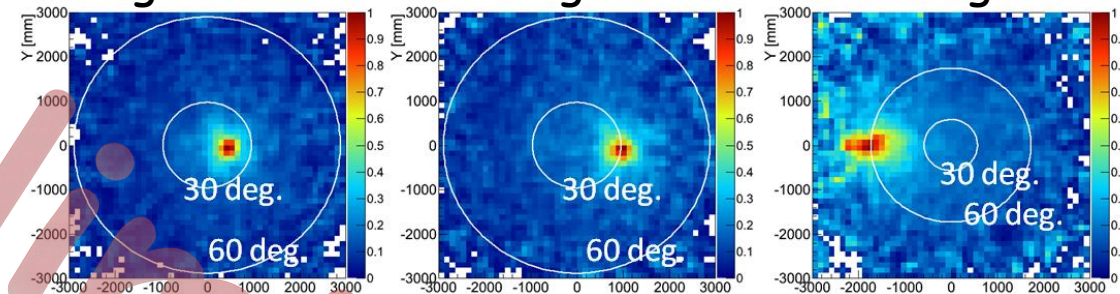


(662 keV:0.05 μ Shv/hour)

15 deg.

30 deg.

60 deg.



⇒ 3 sr 以上の広視野を持っている事を確認

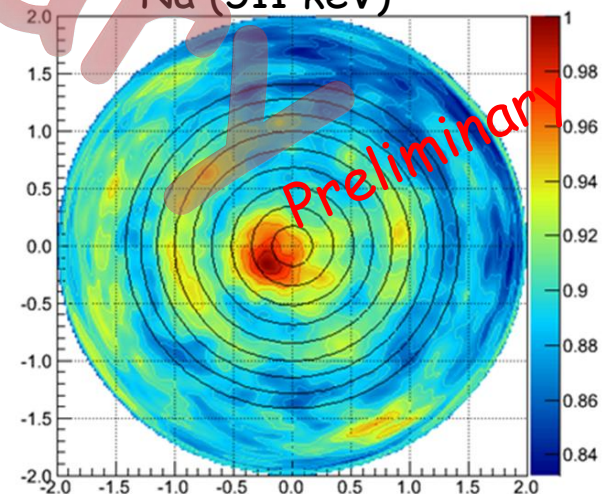
暗い線源での
イメージングテスト

カニ星雲観測時に
予想される S/N 比

世界で最も高感度
が実証！

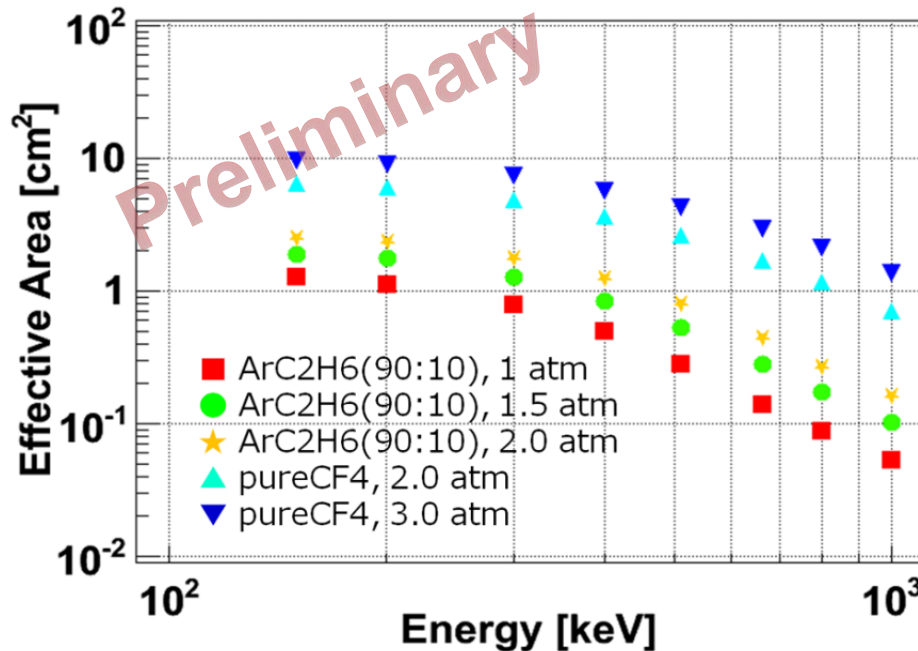
25 kBq 5.5m離れたイメージ

^{22}Na (511 keV)

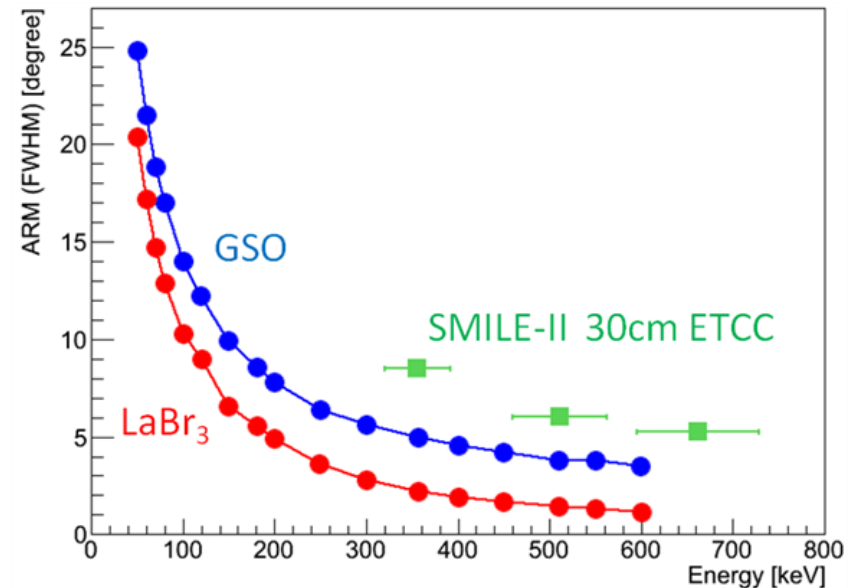


ガンマ線カメラとしての有効面積

現在と将来のSMILE-II 30cm
ETCC感度



角度分解能



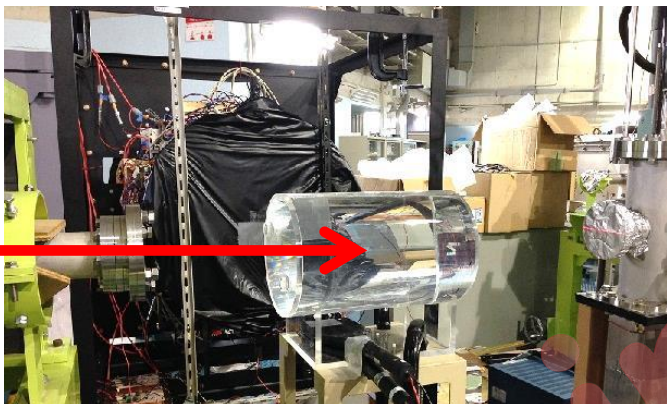
更に、もっと高みへ登れる可能性が
ガスの最適化: $\text{CF}_4 + 3\text{気圧} \Rightarrow \sim 10 \text{ cm}^2$
シンチレーターの被覆率増倍 $\Rightarrow \sim 20 \text{ cm}^2$

3sr の広視野、低バックグラウンド、高品位なイメージングを
保ちつつ、COMPTELと同等の有効面積に到達可能

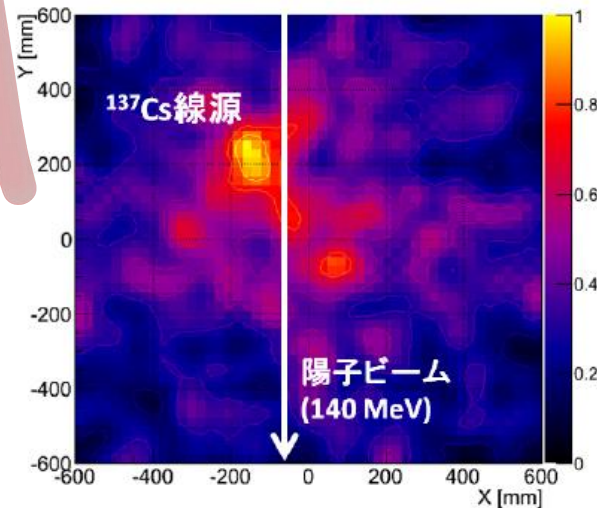
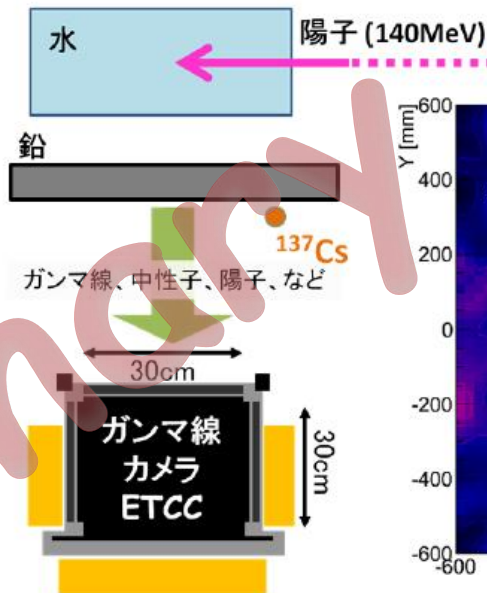
擬似宇宙環境での動作試験

◆ 大量の連続ガンマ線と中性子環境を再現！

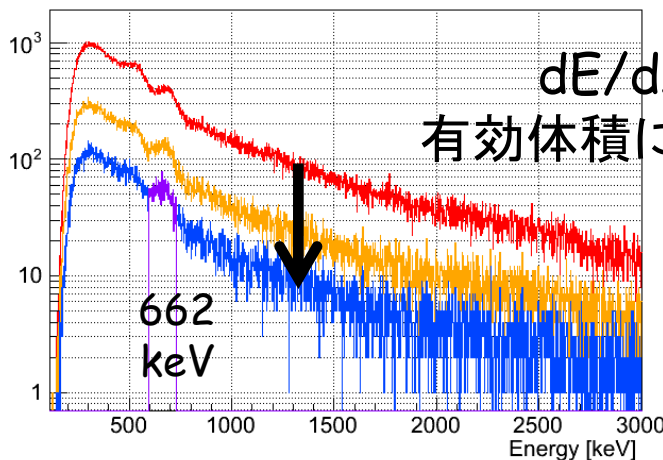
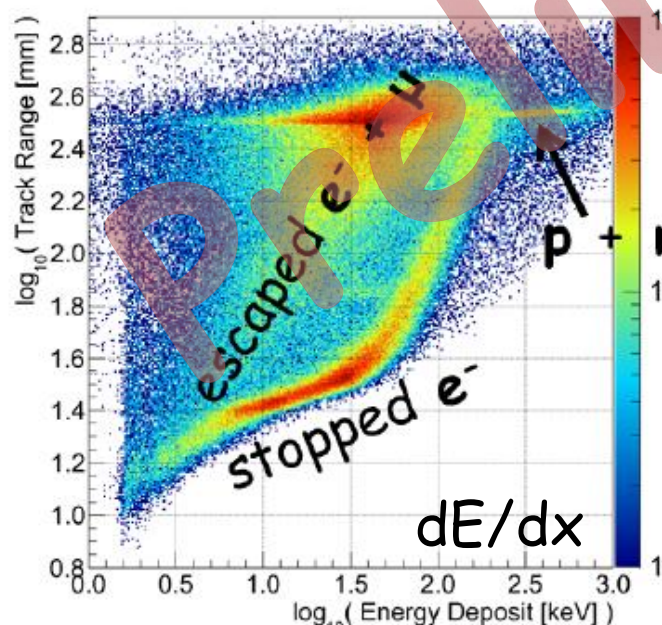
140 MeV
Protons



気球実験想定値の5倍以上高い
放射線環境(最強度雑音化試験)

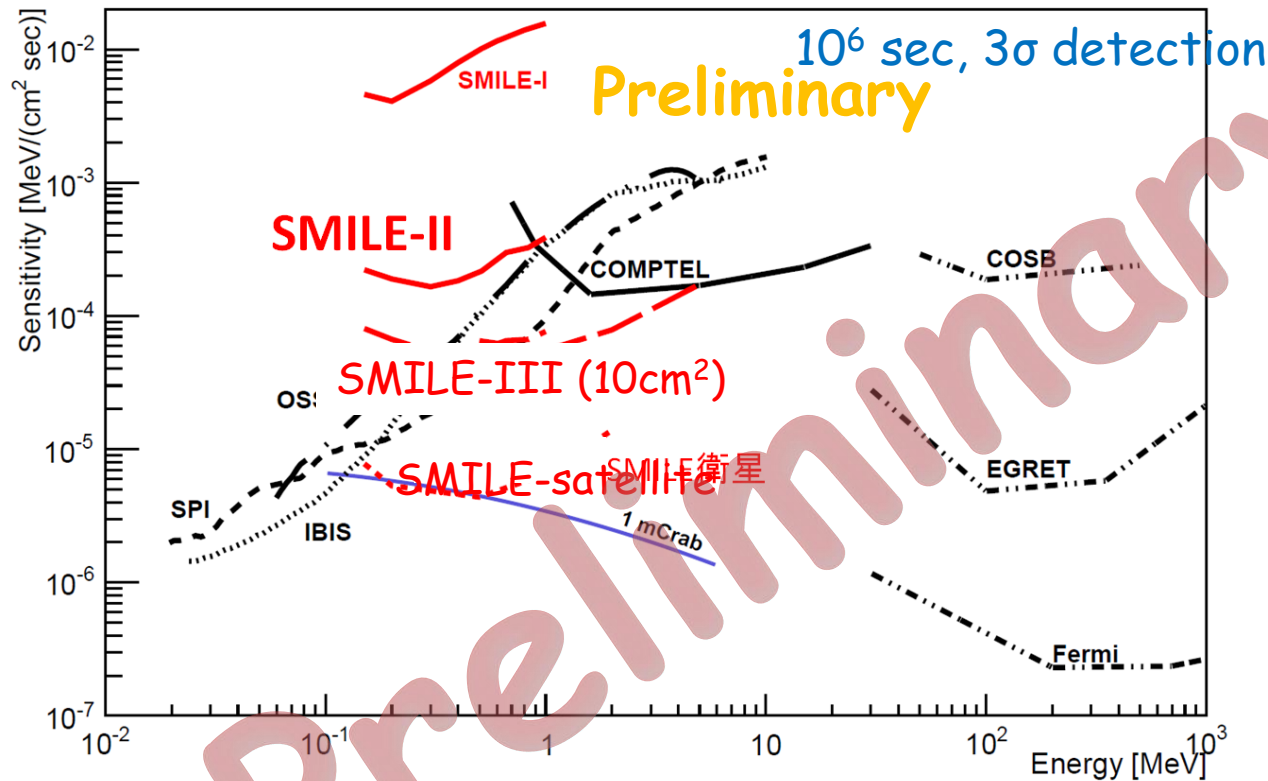


確認用線源をクリアーにイメージング成功



dE/dx による粒子識別と
有効体積によるイベント選出で
バックグラウンドを
約 1 桁抑制！

Sensitivity & SMILE-III



◆ SMILE-II (in USA)

- ゴダード宇宙センターの研究者と協議中
- カニ星雲を 5σ 以上の有意度で検出し、撮像能力を証明する

◆ SMILE-III (in 極域)

- ETCCをさらにアップグレードし高感度化
- 銀河面探査
- MeVガンマ線背景放射の異方性検証
- 地球科学領域の観測

相対論的電子降下(REP)からの ガンマ線バーストも重要な観測対象

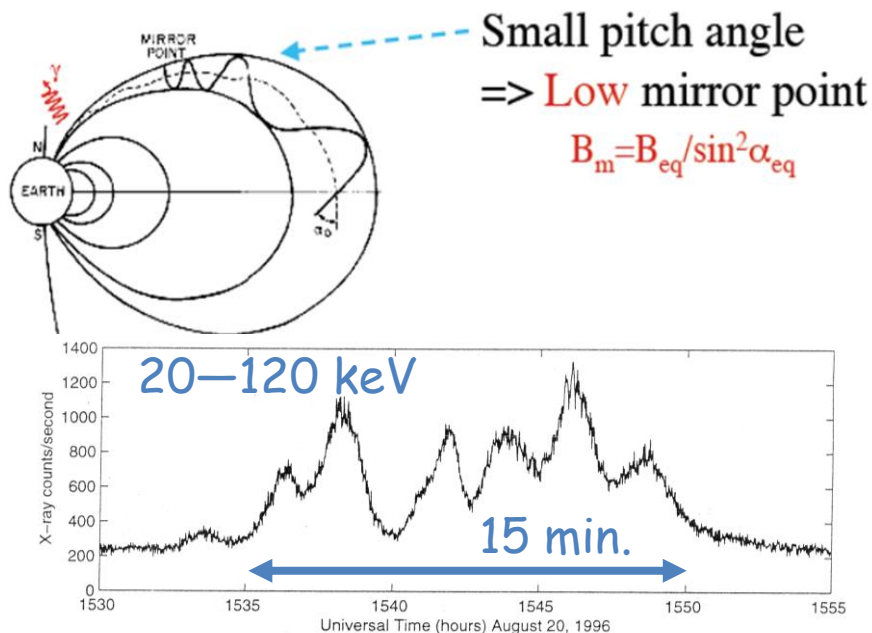
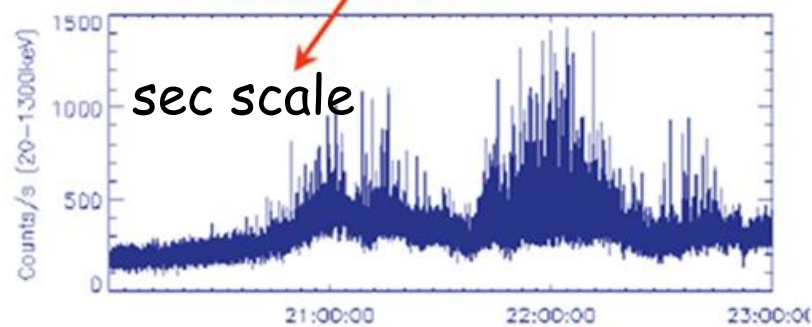


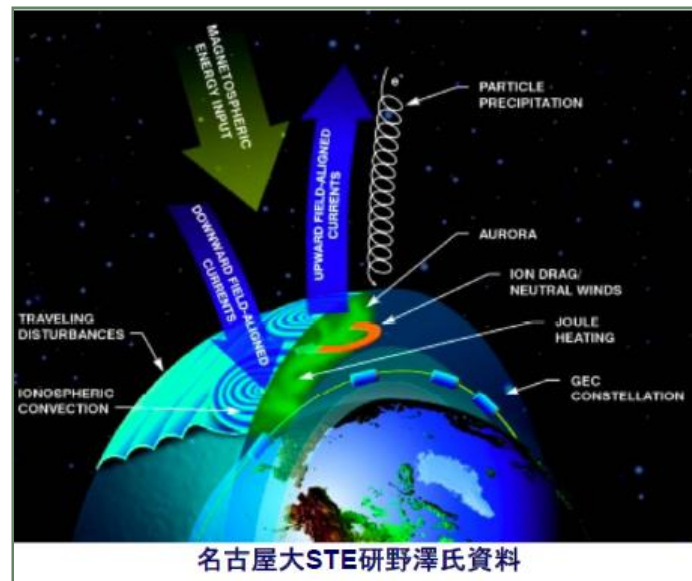
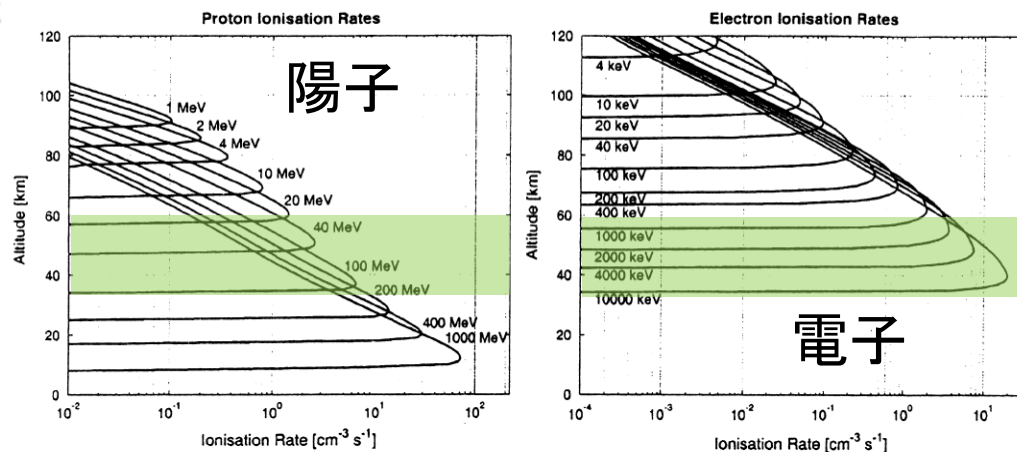
Figure 1. X-ray imager data taken during the relativistic electron precipitation event of August 20, 1996. The X-ray count rate between 20 and 120 keV is averaged over 1 s. The 10–20 s modulation is most clearly visible superposed on the peak starting near 1545 UT.

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

MAXIS Observations of ~100 keV
microburst precipitation



E. Turunen et al. / Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 71 (2009) 1176–1189



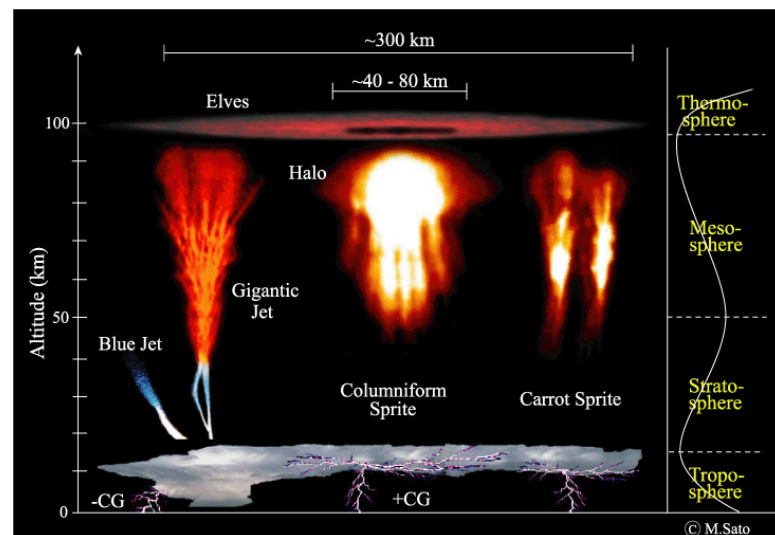
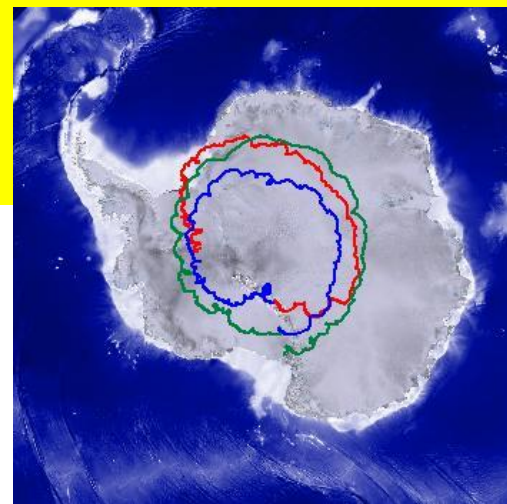
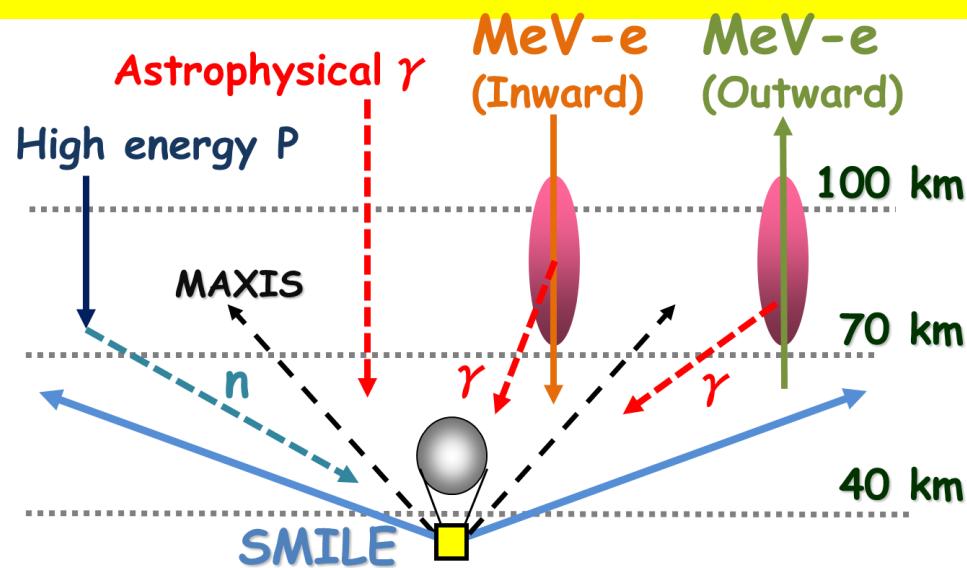
極域オゾン層の生成に関与

もし SMILE 実験で REP を狙うと

- ◆ 広視野 (>3 sr, 半径 約 300 km) とエネルギー範囲 (0.1—数 MeV) 大気内でのガンマ線バーストのモニターに適している！

⇒ 数百事象が観測予想(現在まで10例程度)

- ◆ 雷からのガンマ線も期待できる



まとめ

- ◆ 宇宙の怪傑ガンマ線の
国際協力観測包囲網は急速に進展してきている
 - MeVガンマ線領域は、電子飛跡検出型
コンプトンカメラ(ETCC)が包囲網の鍵を担っている
- ◆ 2013年春に検出器部の仮組みを完了し、開発を推進
解析ツールの開発・整備
 - 基礎性能評価 ⇒ カニ星雲観測の要求を満たす値
 - 擬似宇宙環境下での動作試験
⇒ 高雑音下および超微弱線源の撮像に成功
多分 世界最高感度？(調査中)
 - 装置のアップグレード
- ◆ 1日程度の気球実験SMILE-IIを
2014年度以降に実施予定、数年後には極域長時間観測へ
- ◆ この技術は医療、環境計測などへ重要な貢献が期待されている。