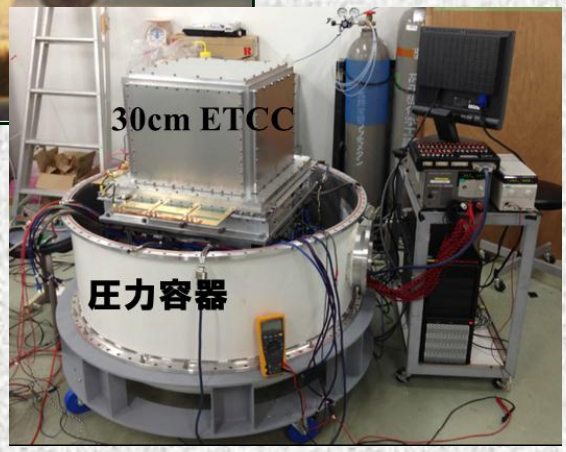
γ線で宇宙と地球を見る



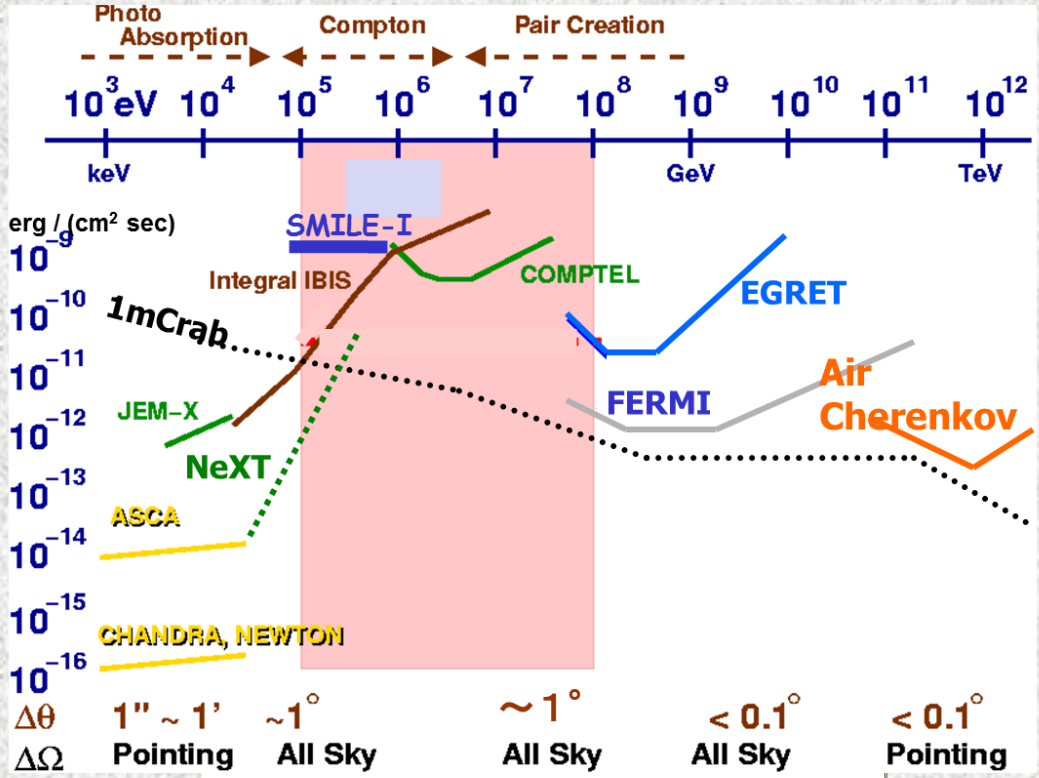


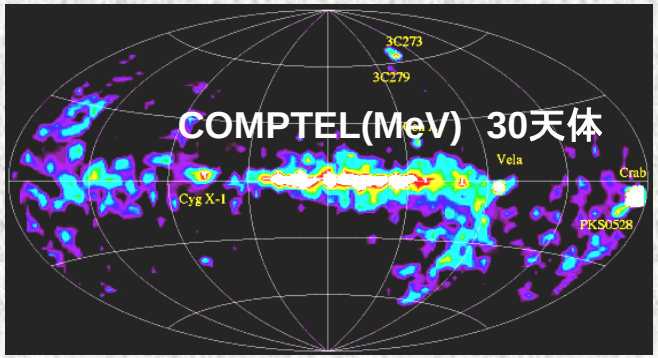
CONTENS

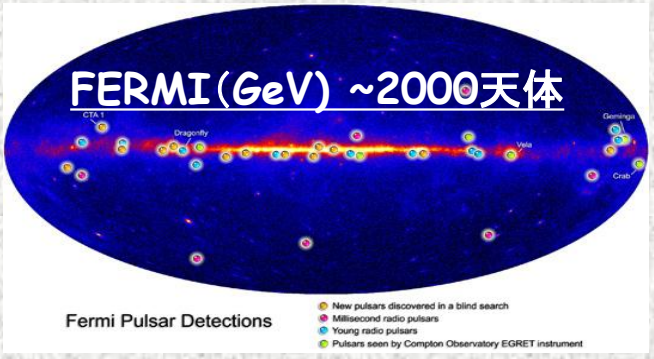
1. 核ガンマ線（MeV領域）による天文学と地球科学
2. 宇宙からのMeVガンマ線を見る手法
3. SMILE-II 北極周回気球観測
4. まとめ

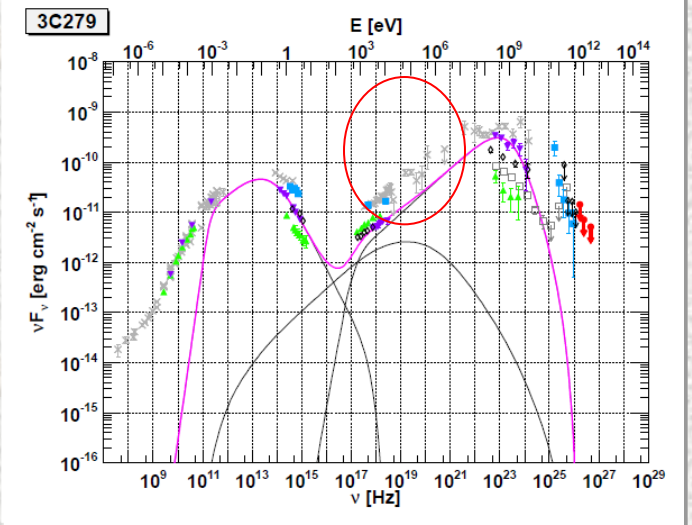
谷森達[1], 窪秀利[1], 身内賢太朗[2], 水本哲矢[1], 水村好貴[1], Parker, J.[1], 古村翔太郎[1], 岩城智[1], 澤野達哉[1], 中村輝石[1], 松岡佳大[1], 佐藤快[1], 中村祥吾[1], 高田淳史[3], Arvelius S[4], Turunen E[5], Yamauchi, M[6]
[1]京大大学院理学研究科 [2]神戸大理学部 [3]京大生存圏研究所 [4]ルーレオ工科大宇宙工学科
[5]EISCAT [6]スウエーデン宇宙科学研究所(IRF)

MeVガンマ線天文学



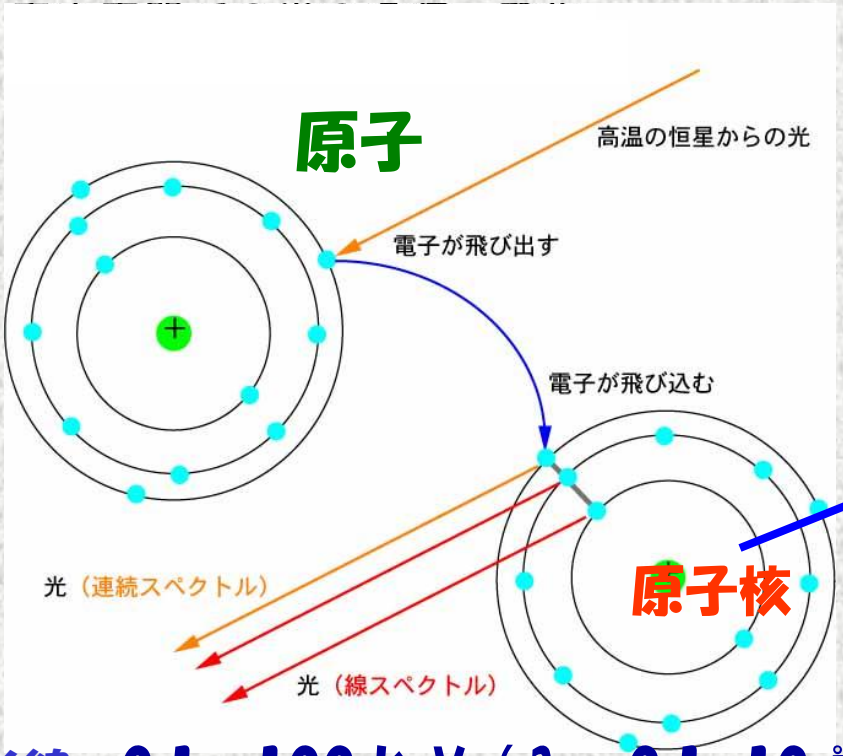


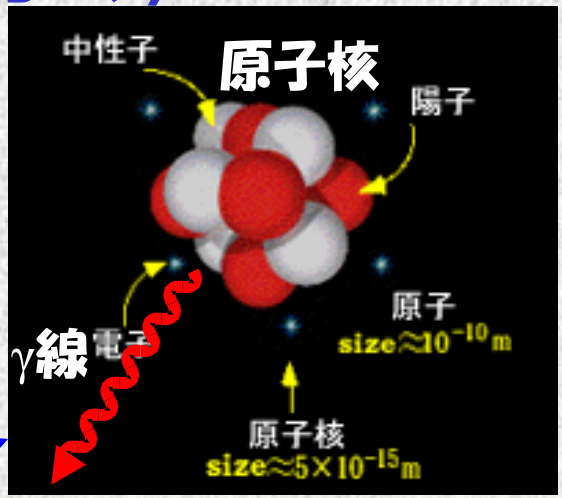




- 元素合成 (ラインγ)
  - 銀河面分布：^{26}Al・511 keV
  - ブラックホール等
  - 連続スペクトルγ (Multi-MeV)
- 宇宙線加速（AGN,SNR,Pulsar)
- 宇宙の始まり
  - 最遠方ガンマ線バースト（GRB)
- 地球・太陽圏科学
  - 極地方での最小バースト

X,γ線放射(原子、原子核から)



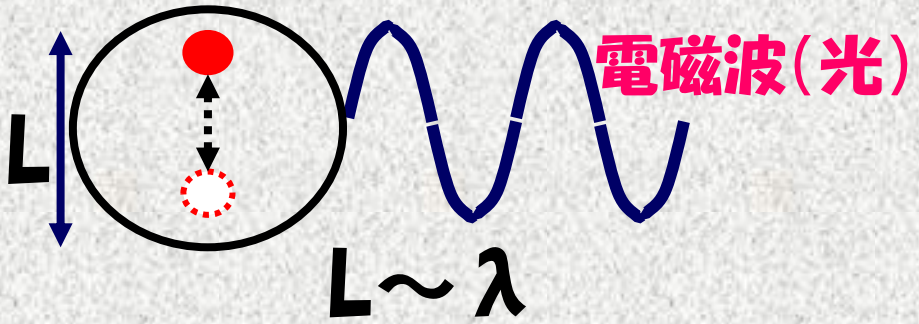


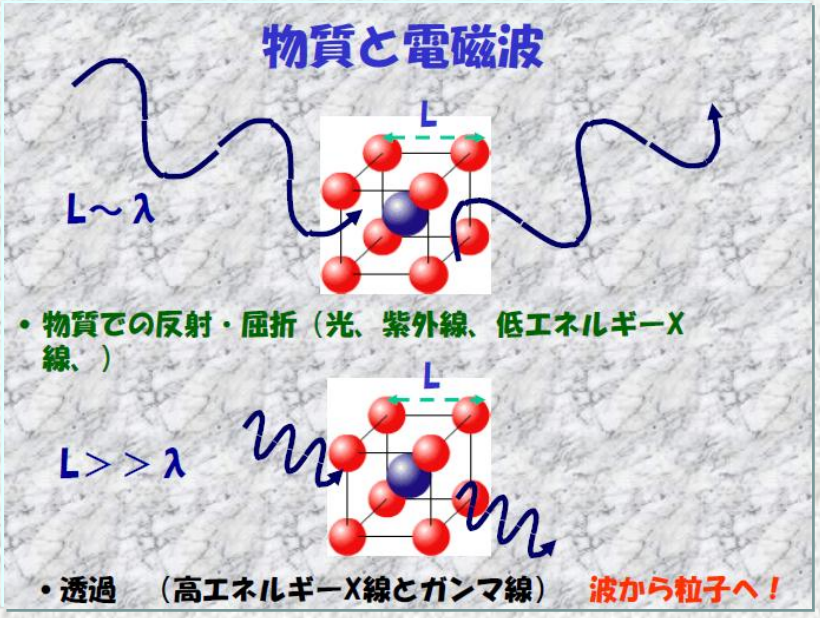
γ線 0.1～10 MeV（λ～10fm）

原子核内の核子からのガンマ線（線スペクトル）

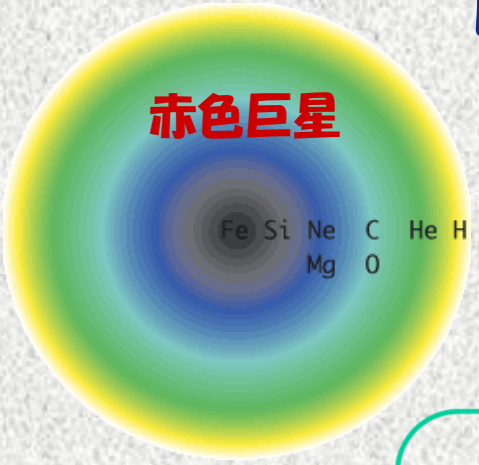
X線 0.1～100 keV（λ～0.1-10Å）

原子起因 蛍光X線（線スペクトル）





Line-ガンマ線(元素合成)

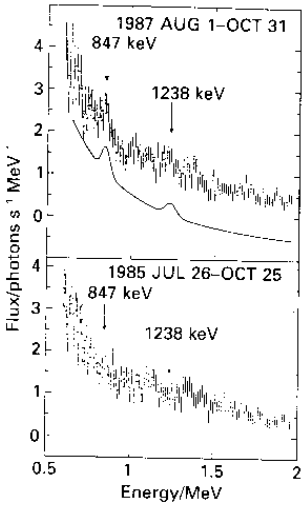


超新星爆発

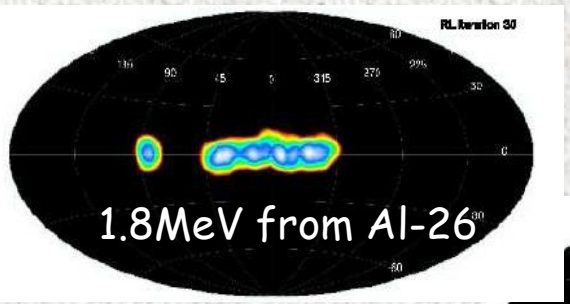
	Energy [keV]	Decay
^{56}Ni	158,270,480,759,812	6.10d
^{56}Co	847,1238,2598	77.2d
^{57}Co	122,136	271.7d
^{44}Ti	1157	63year
^{26}Al	1809	7.4x10^{5} year



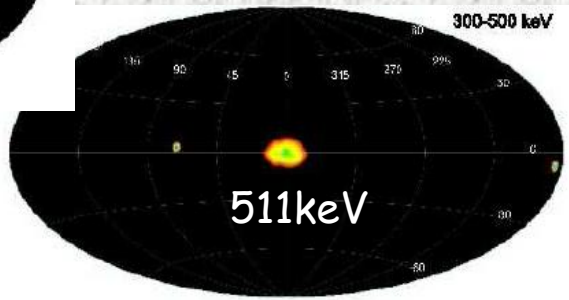
SN 1987 A



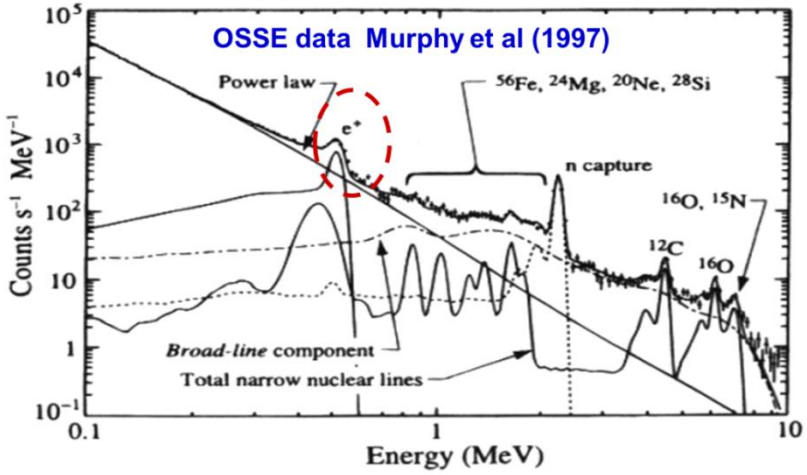
太陽



Integral

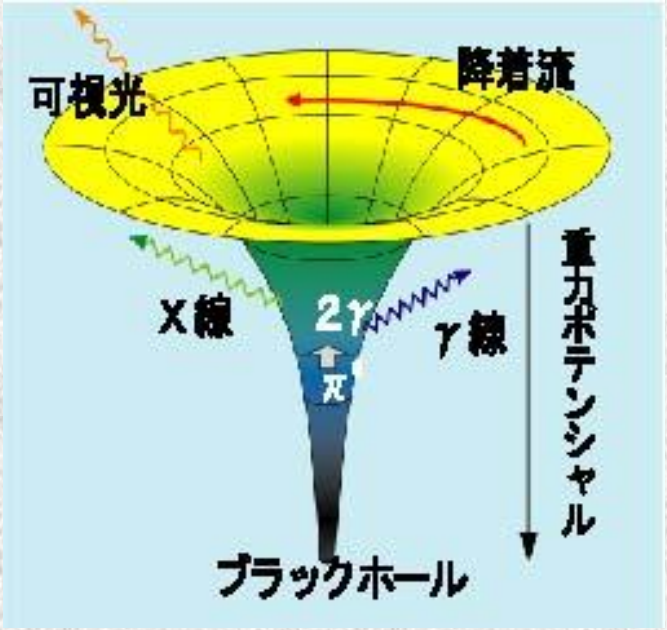


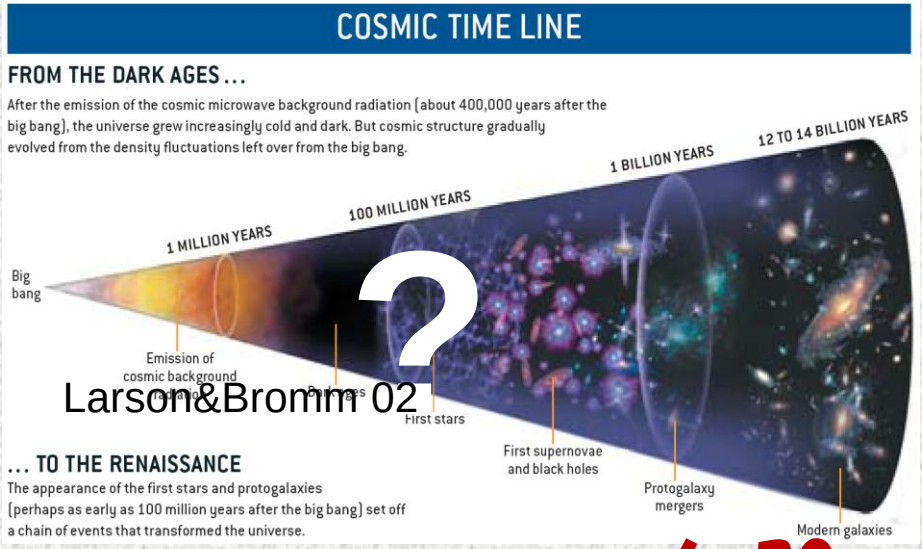
Gamma Rays from 1991 June 4 Flare



MeVガンマ線天文学とは

GRB => 宇宙最大事象 10-1000倍 のSuper Nova





Larson&Bromm 02

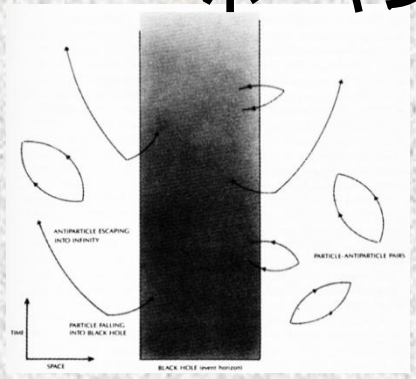
z~6-30

GRB

z~7

銀河、クエーサー

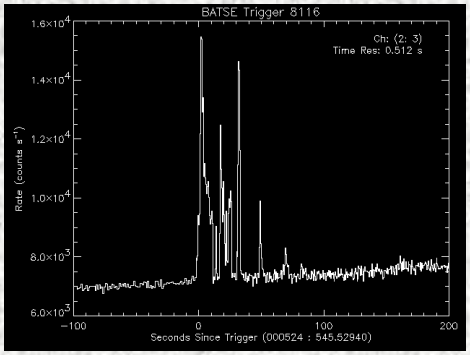
ホーキングBH(ビッグバン)



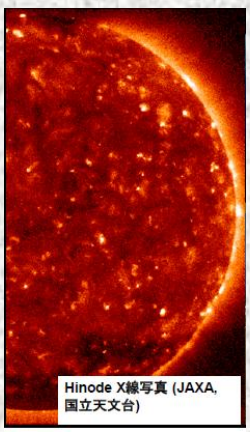
$$\hbar\omega \sim 100\,\mathrm{MeV}\left(\frac{10^{15}\,\mathrm{g}}{M}\right)$$

ホーキングBH
現在　熱的MeV
ガンマ線放射天体

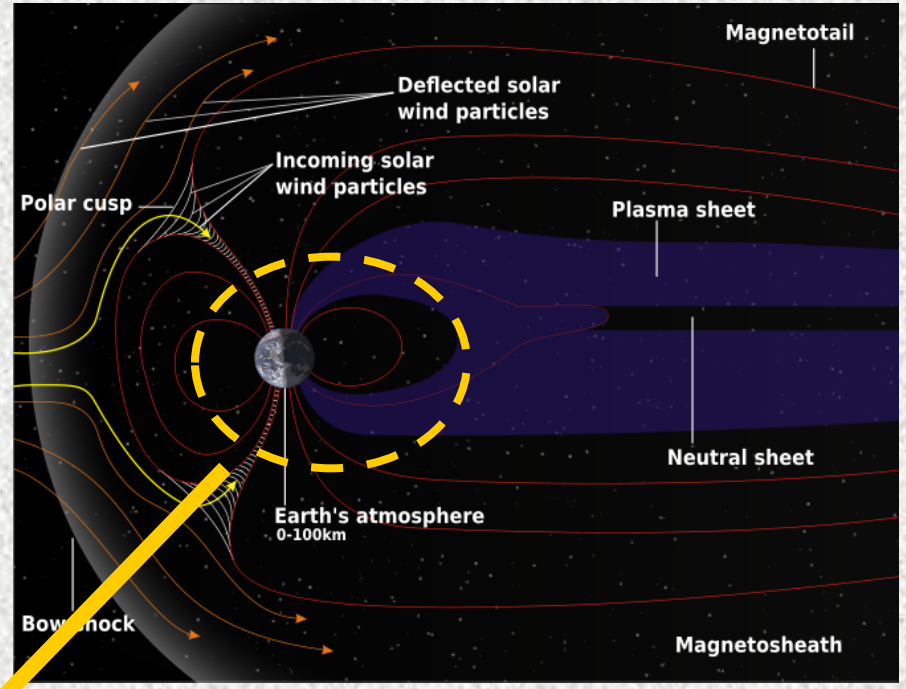




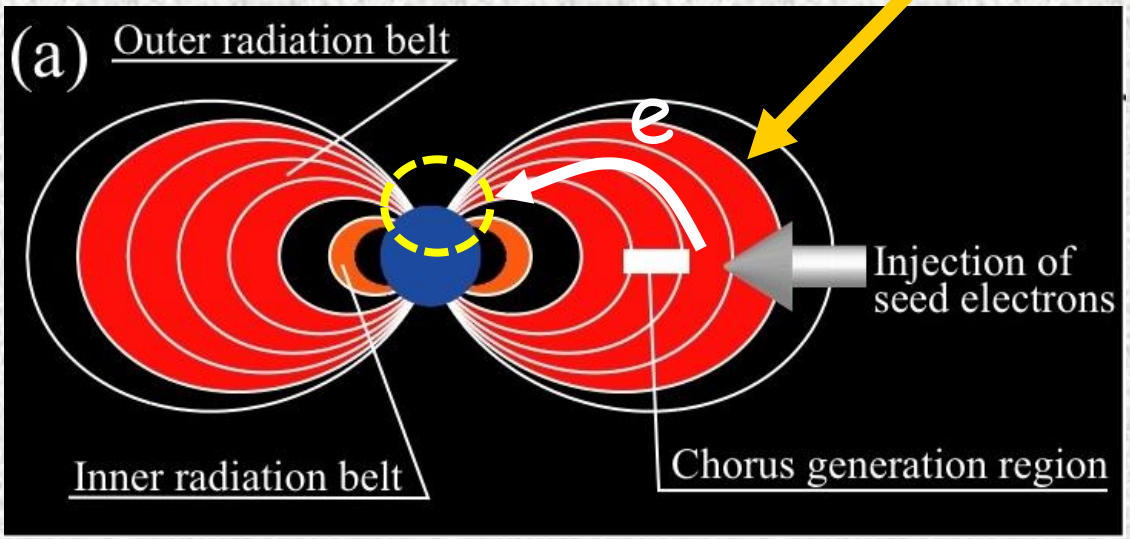
High energy electrons in magnetosphere



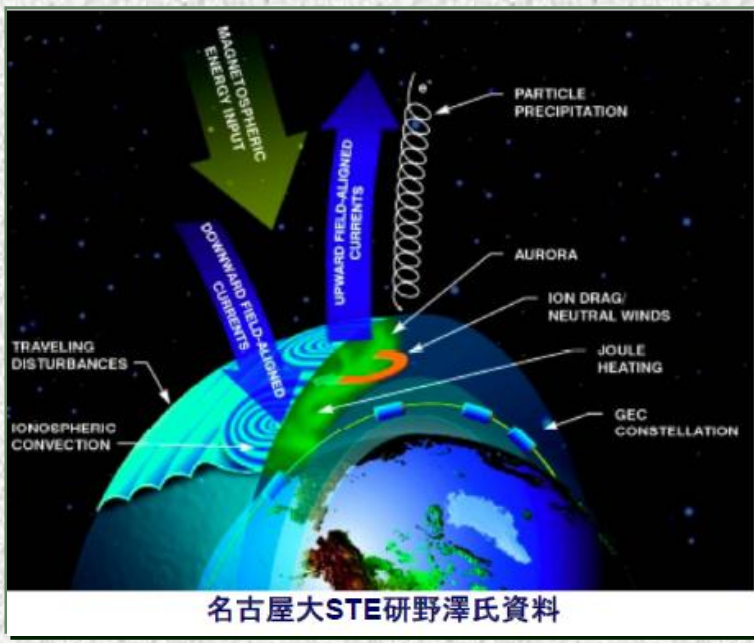
Solar Wind



MeV electron & ion in Radiation belt



Modified from Prof. Ohmura (Kyoto)



名古屋大STE研野澤氏資料

極域ガンマ線バースト と相対論的電子降下現象 (Relativistic Electron Precipitation: REP)

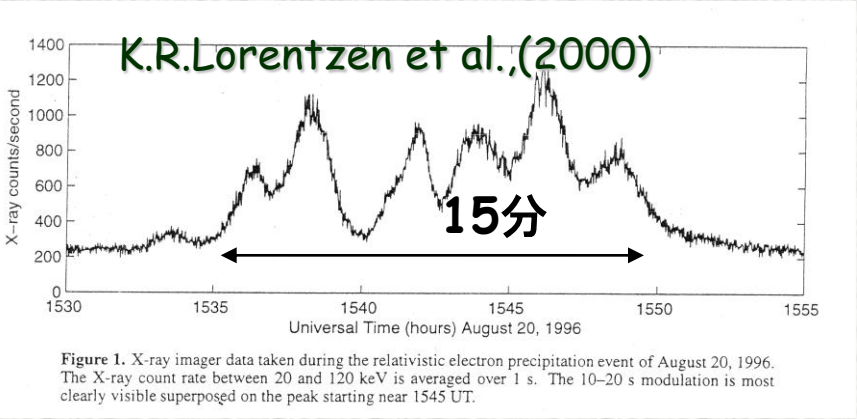
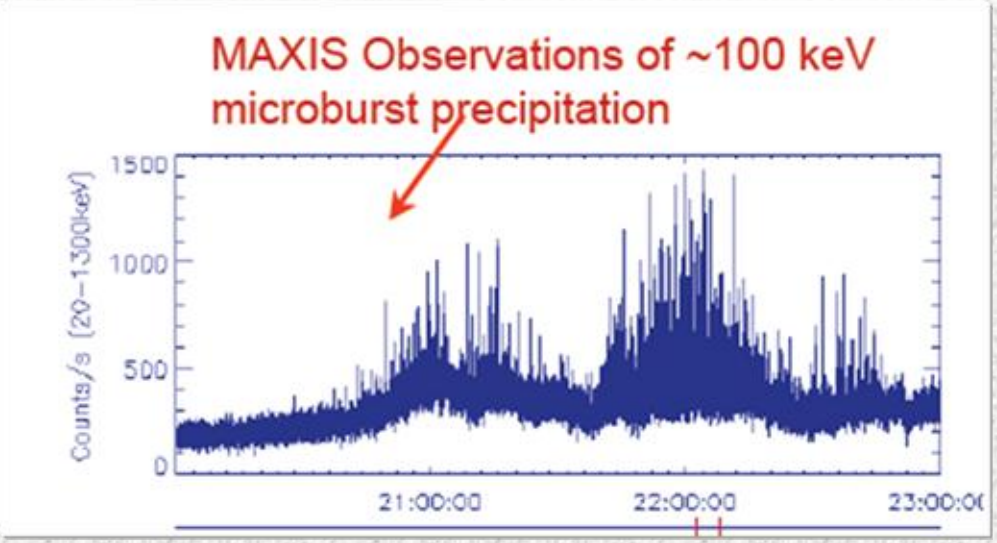
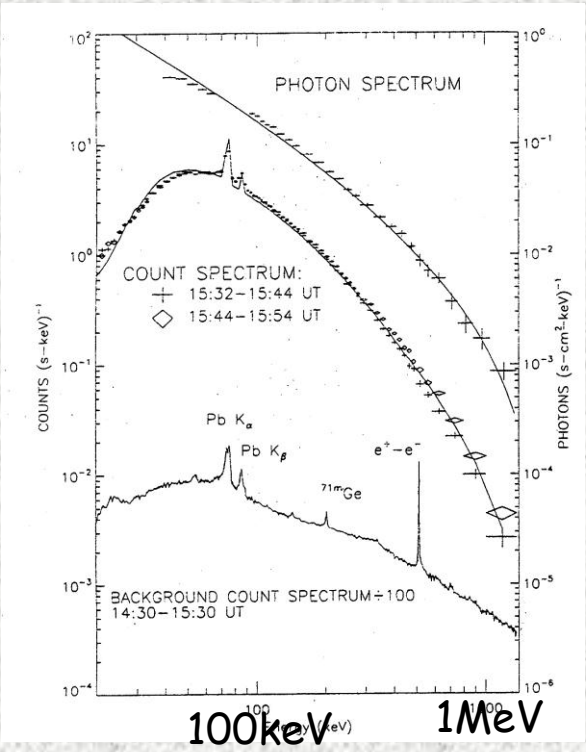
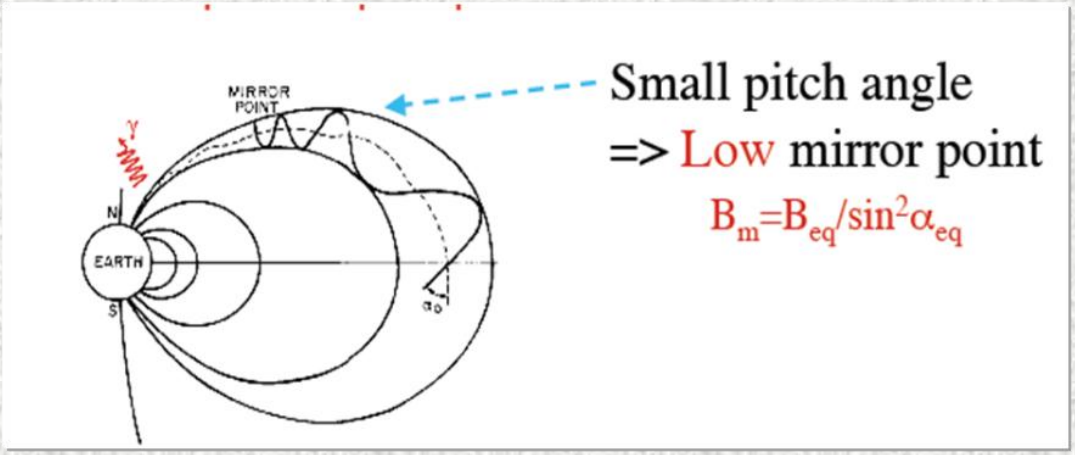


Figure 1. X-ray imager data taken during the relativistic electron precipitation event of August 20, 1996. The X-ray count rate between 20 and 120 keV is averaged over 1 s. The 10–20 s modulation is most clearly visible superposed on the peak starting near 1545 UT.



Micro Burst(1秒程度の激しい変動)



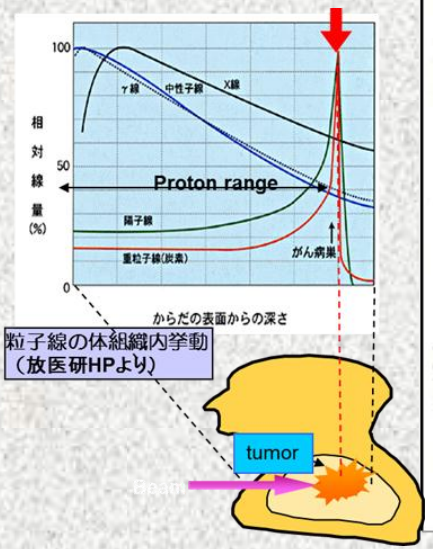


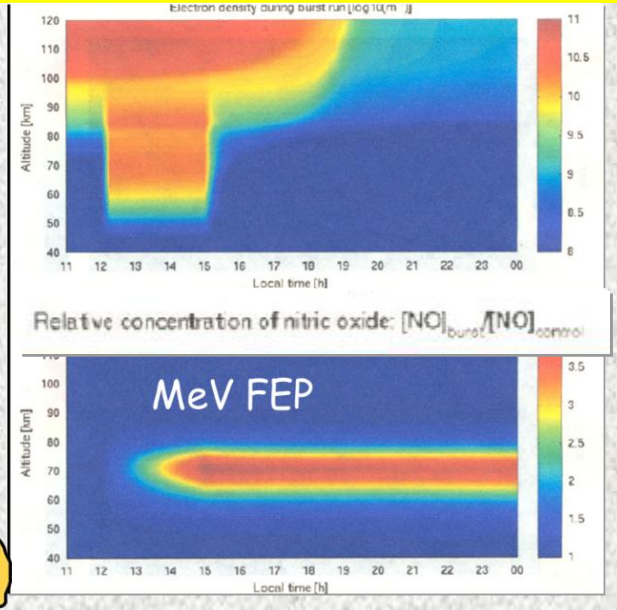
高エネルギー粒子降下現象と成層圏大気化学

- MeV電子、数10MeV陽子降下
- 成層圏でエネルギーの大半を放出 →Bragg Peak

$No_x \rightarrow O_3$ （オゾン生成）

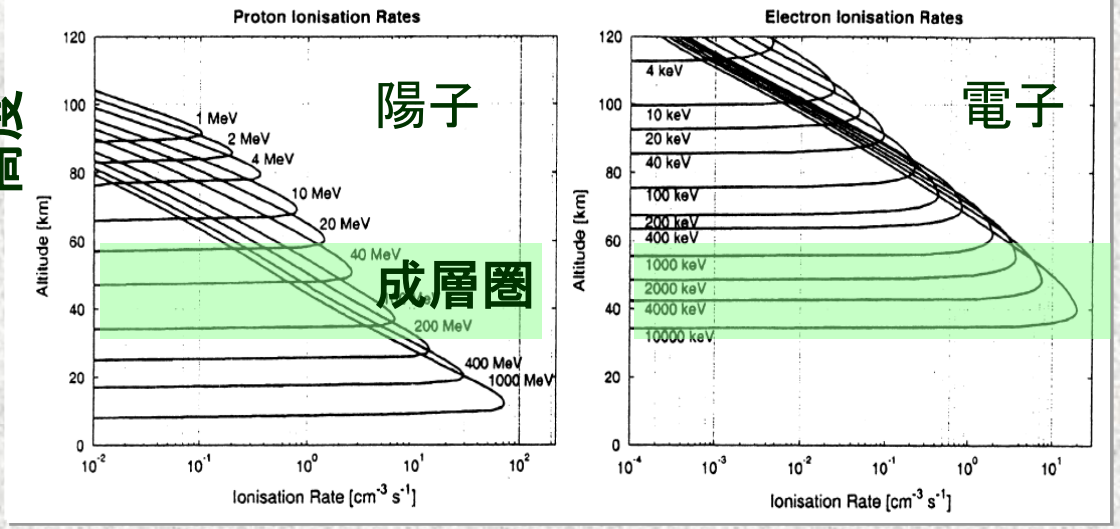
生成されたNOx, O3 大気循環

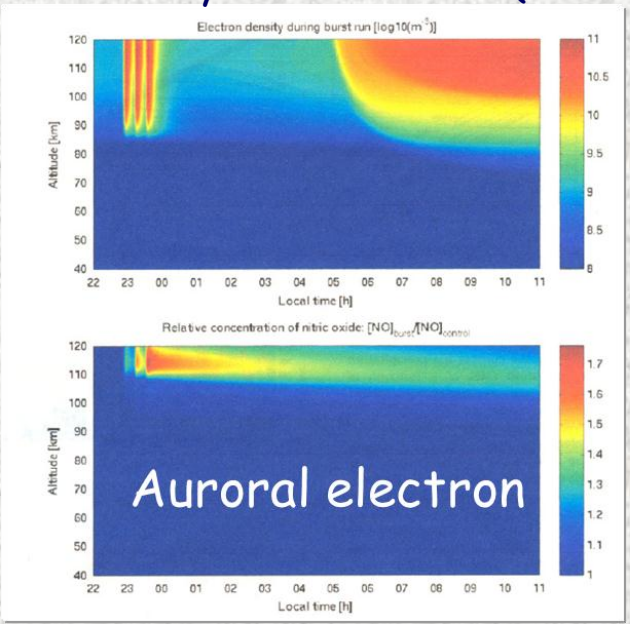




Simulation by Turunen et al (2009)

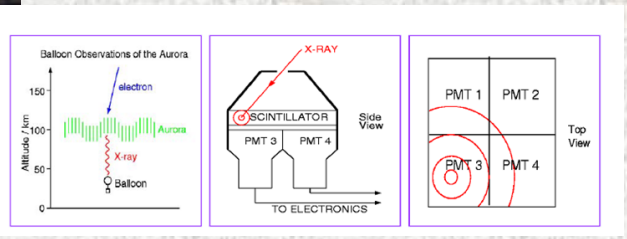
E. Turunen et al. / Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 71 (2009) 1176–1189

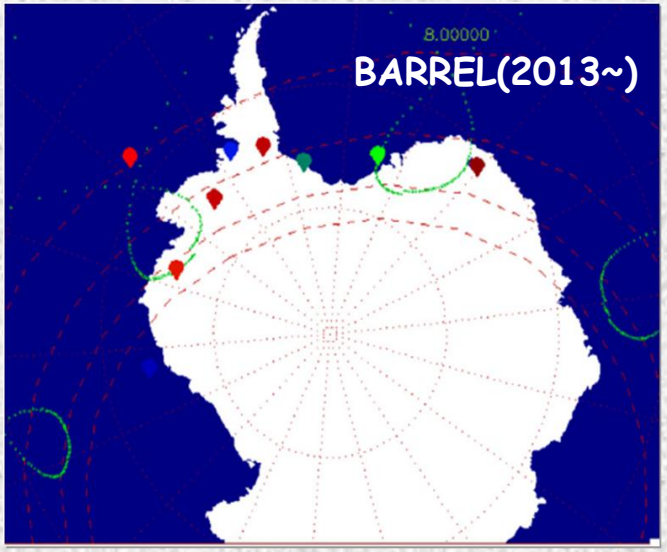




MAXIS(2000) -> BARREL(Antarctic balloon exp.)







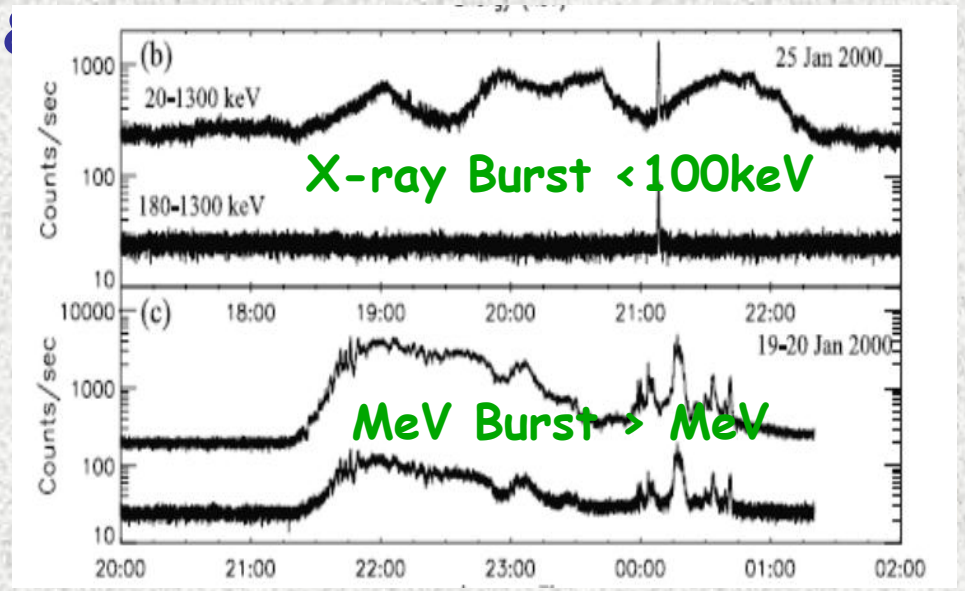
9 hard-events +16 soft-events/18days

- Ge γ 線スペクトル検出器(6cm²)
- X線オウンホール画像検出器 &

視野 ~1str

(雑音除去能力無し)

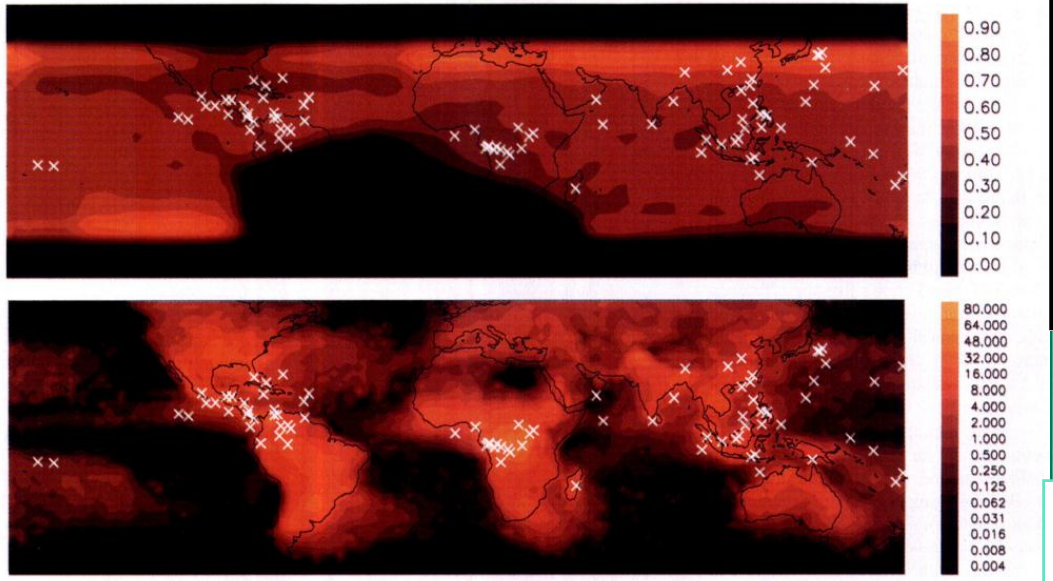
No Imaging results

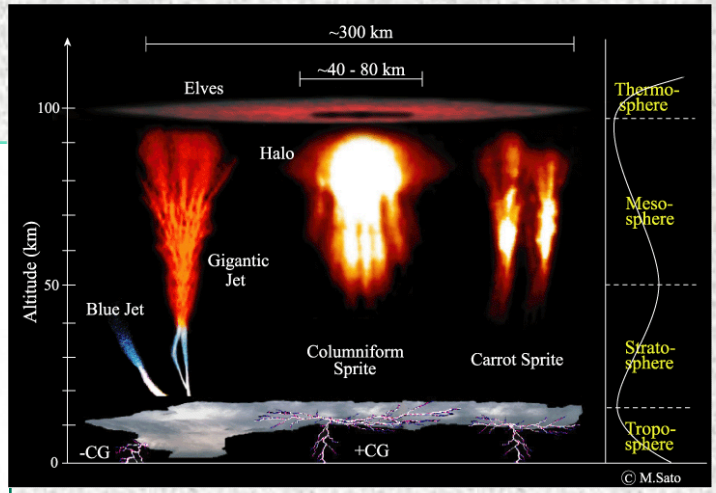


雷

RHESSI satellite

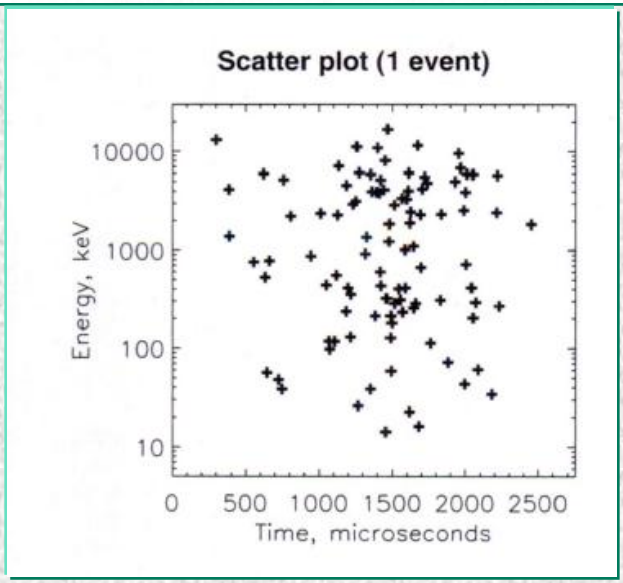
D.M.Smith et al. Science; 2005; 307, 5712 RHESSI

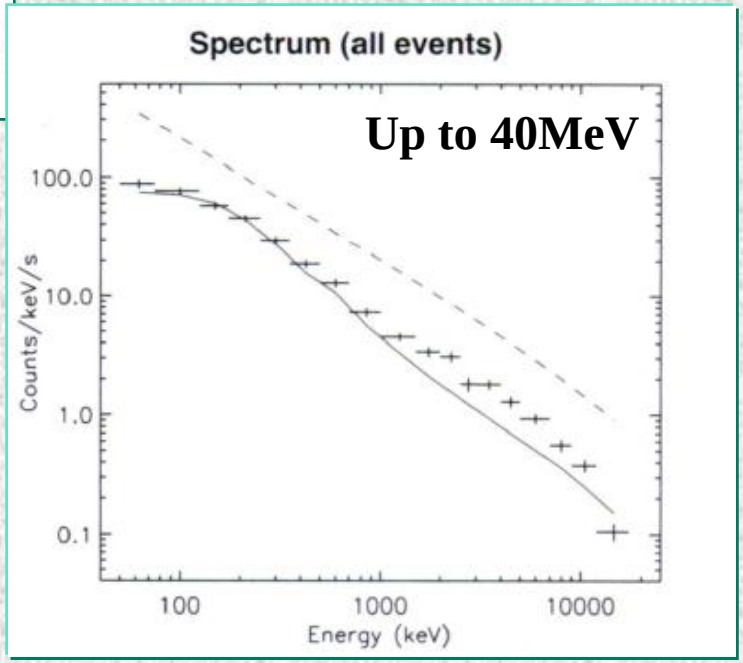




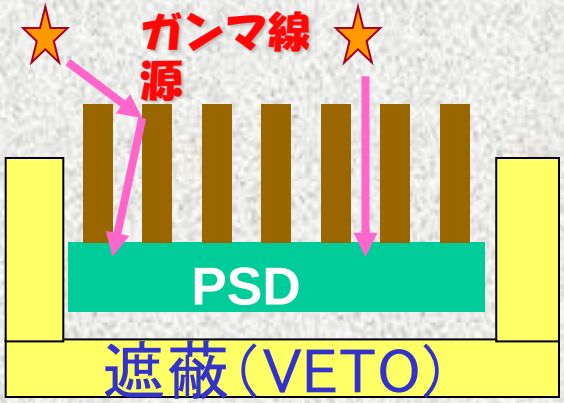
86events/6months

Very short duration of msec





ガンマ線イメージング



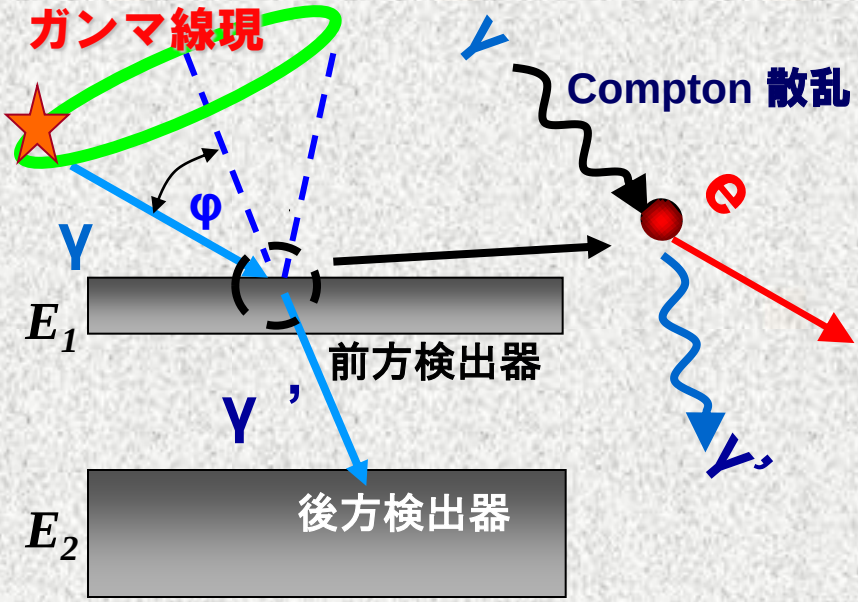
1：コリメーター＋位置検出器（SPECT）

狭い視野　数度　　重い遮蔽（VETO）が必要

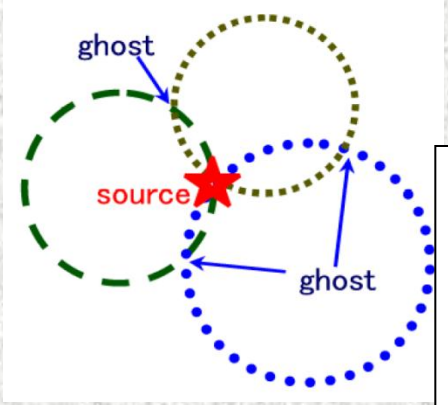
低エネルギーのみ有効く ～300keV

2：Compton-Camera（CC）

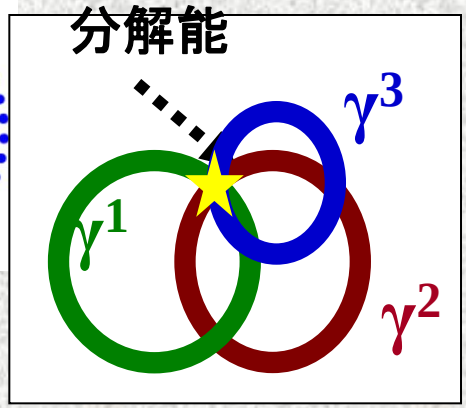
ガンマ線毎に到来方向を求める



高エネルギー分解能



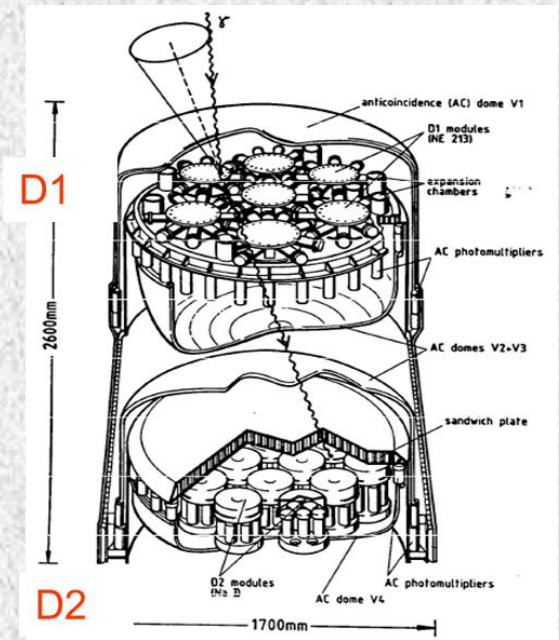
低エネルギー分解能



$$\cos\phi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

$\Delta\phi \square \Delta E/E \quad (E=E_1+E_2)$

なぜMeVガンマ線天文学は困難か



検出面積 =13cm^2@1MeV

放射雑音ガンマ線が圧倒的に多い！

雑音なければ有効面積数10cm^{2}で～千天体観可能

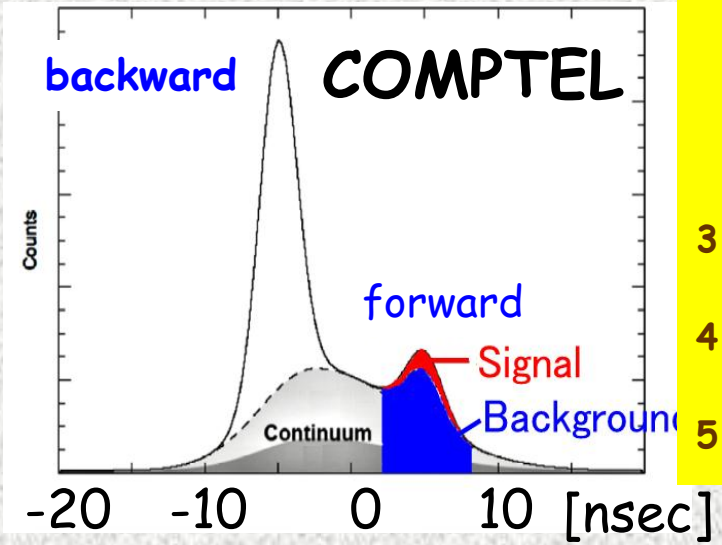
1. アルベド放射線が強い
2. 宇宙線による衛星･装置の放射化（RI製造）

V.Schönfelder(2004)の提言

低雑音化が最重要

1. 高角度分解能→高エネルギー分解能
2. 雑音除去のための冗長性(TOF，Kinematics，エネルギー損失率dE/dx など）

   COMPTELではTOFが有効、雑音を10分の1に低減
3. ガンマ線到来方向決定（仰角　＋方位角） 最重要！
4. 低物質量（放射化量の低減）
5. 前方、後方検出器の同時計測幅を小さくする

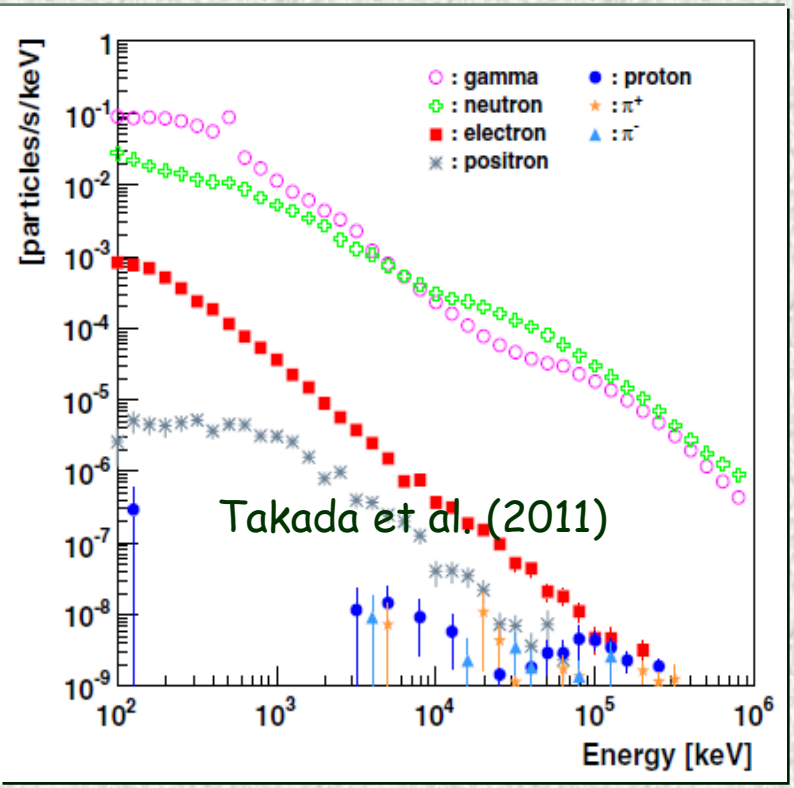


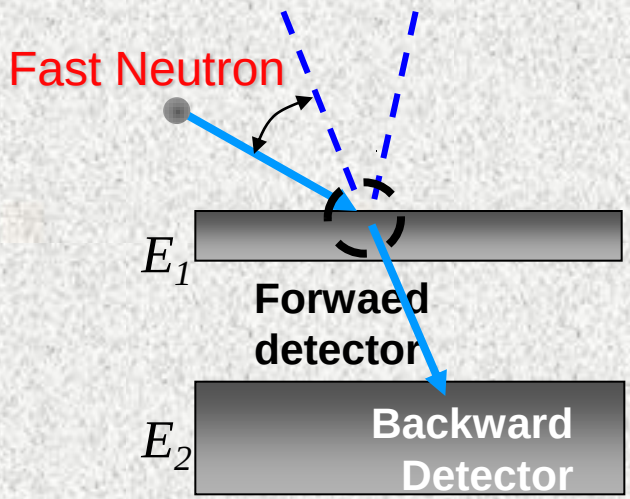
G.Weidenspointner, et.al. (2001)

更なる雑音源（大気2次中性子）

COMPTEL：TOFにより中性子は除去可能で議論されていないが、Compactな次期コンプトンカメラではTOFは困難。

高層で検出器内に入る粒子





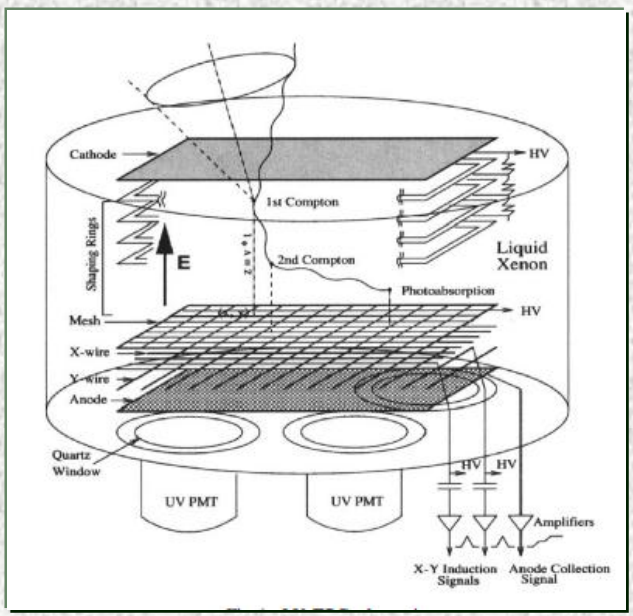
中性費2回弾性散乱
Compton散乱と同じ

中性子flux ~ γ線flux,
断面積　中性子＞＞γ線

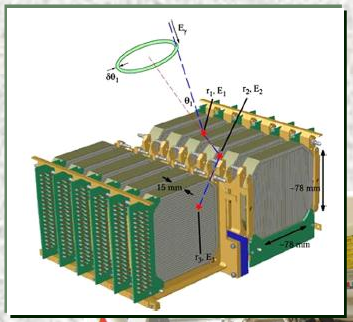
除去法　TOFまたは
反跳粒子のエネルギー損失dE/dx、
電子の数十倍（最有力）

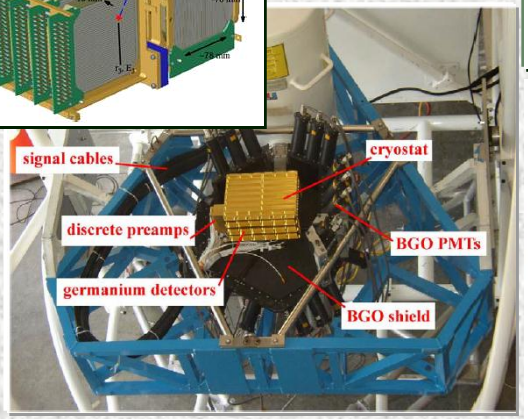
最先端Compton Camera

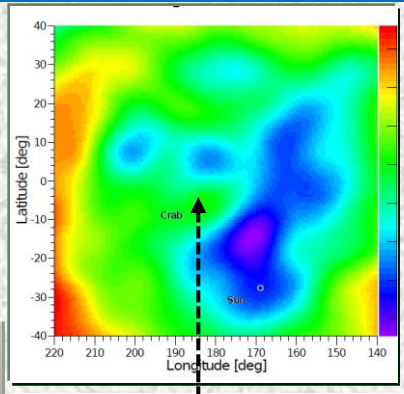
. Aprile et al(2004)

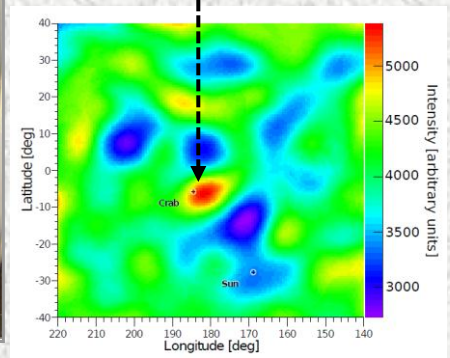


M. S. Bandstra et al. ApJ 2011









Le Xe TPC　気球実験　8hr　2000

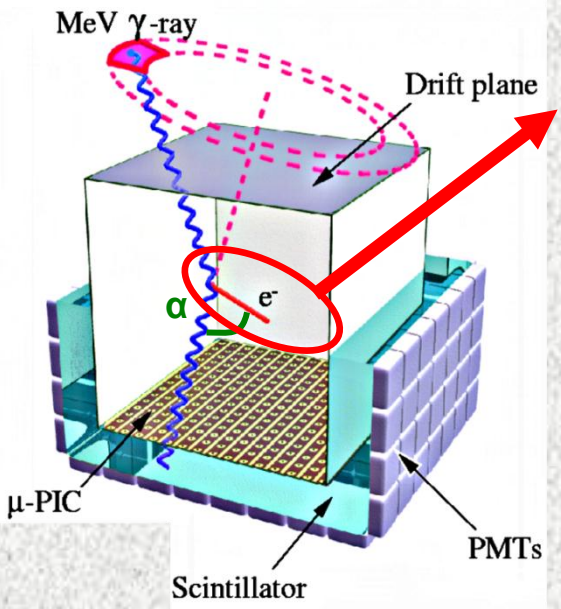
- VETO 無し
- 0.1-10MeV 予定有効面積　～20cm^2
- 実際は1－10MeV　予想Crab　ガンマ線 ~50ガンマ線.　　但し、不検出
- 実際の推定有効面積　～2cm2

主眼、有効面積の増大、
雑音への提言項目　4？

- Crab 4σ (8hrs) with NLEM 法
- Ge 検出器 with BGO 遮蔽
- 視野3str （BGO　8str)
- 0.3-1.5MeV 有効面積　6cm^2
- Simulation　3800 γ →667　γ
- Crab方向の雑音~29000 (S/N~0.02)

主眼、高エネルギー分解能
雑音への提言項目　1.

電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron Tracking CC: ETCC)

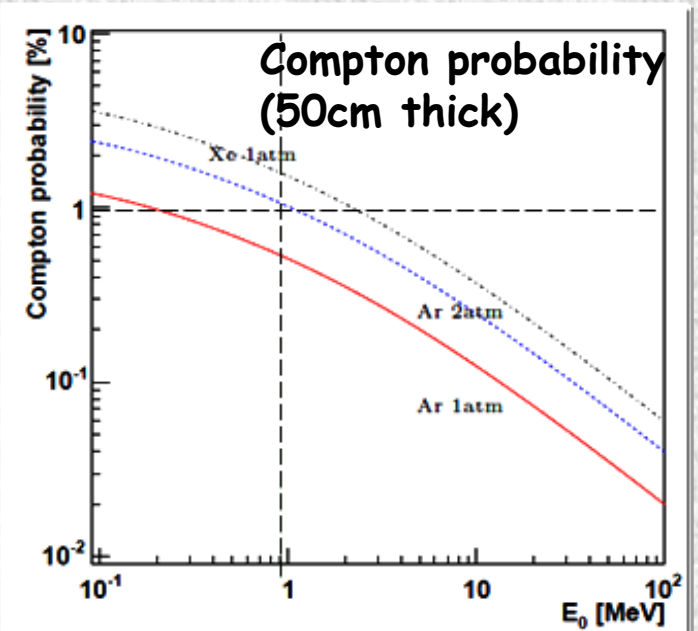


1. Determination of each gamma direction
2. 運動学(a)+エネルギー損失率による雑音除去
3. 広視野. ~3str
4. 遮蔽　VETO　共に無し（軽量）

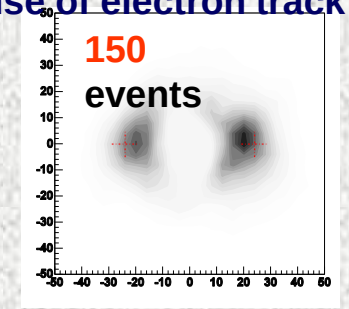
Goal: COMPTELの50倍の感度の衛星

主眼　高雑音除去、項目2,3,4+　Neutron カット

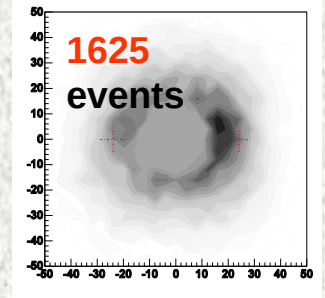
鮮明な飛跡　ー＞多重ヒット問題無し

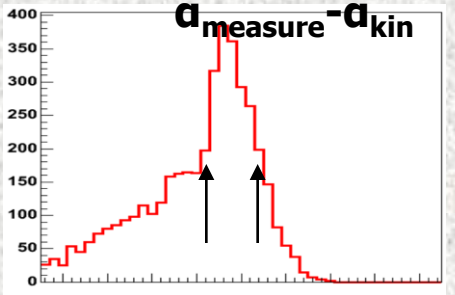


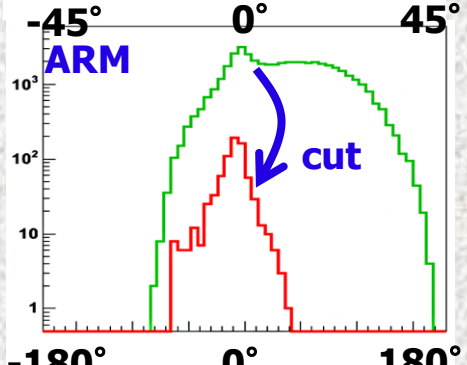
In use of electron track



no use of electron track

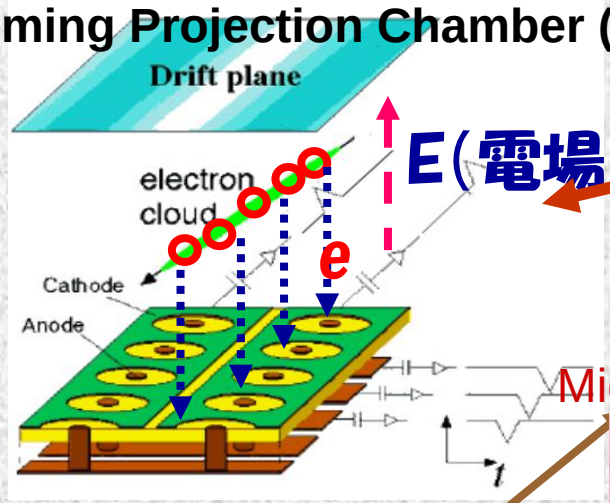


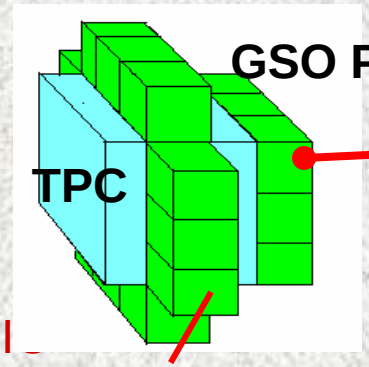




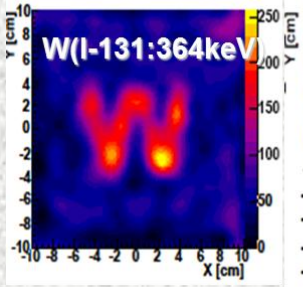
10cm-cube ETCC

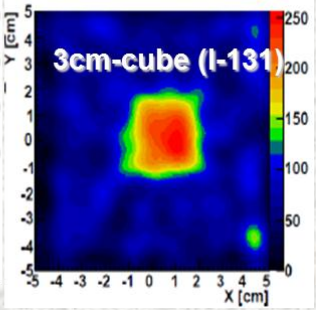
Timing Projection Chamber (TPC)



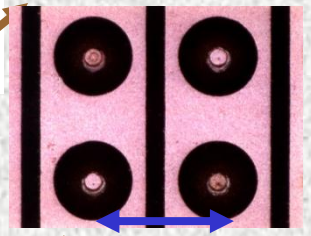


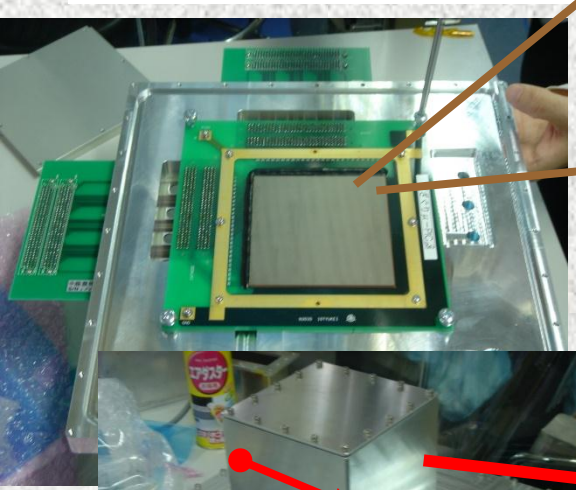




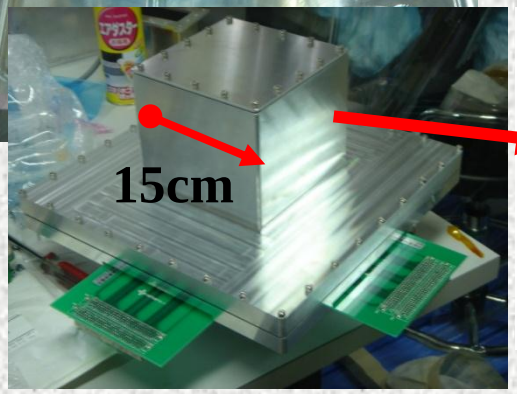


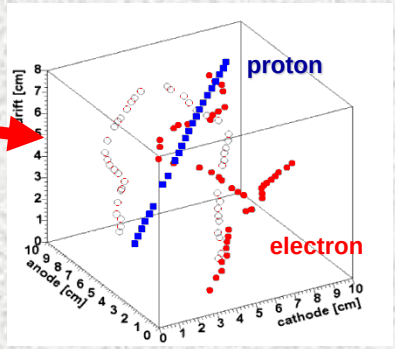
μ-PI
Micro Pixel Chamber

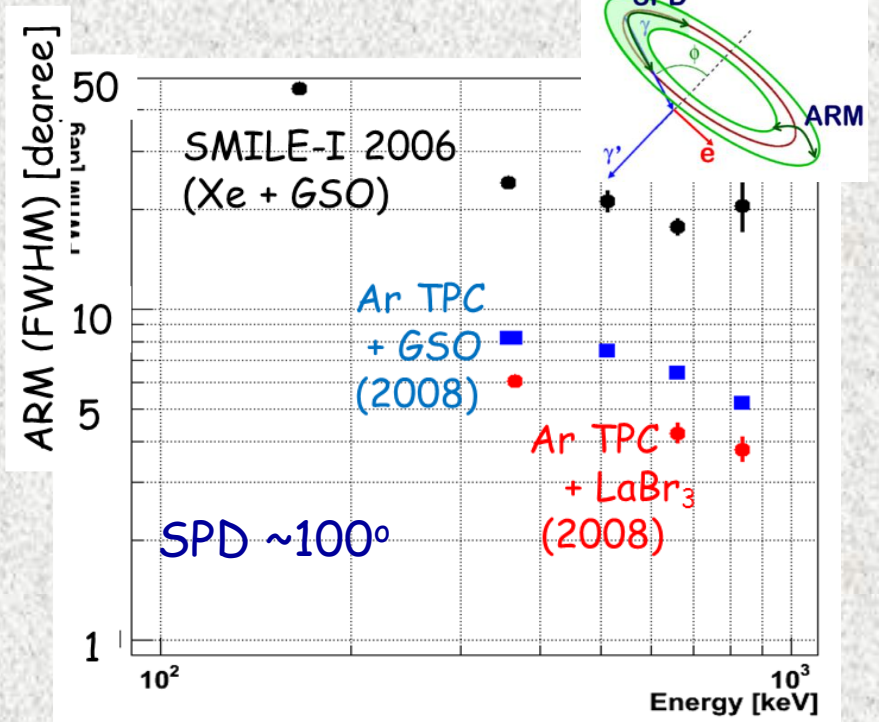




Imaging of 3D tracks







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



10cm cube camera @ Japan (Sep. 1st 2006)

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

30cm cube camera with Domestic balloon @Kiruna

- Observation of Crab/Crg X-1 + **REP-γ**

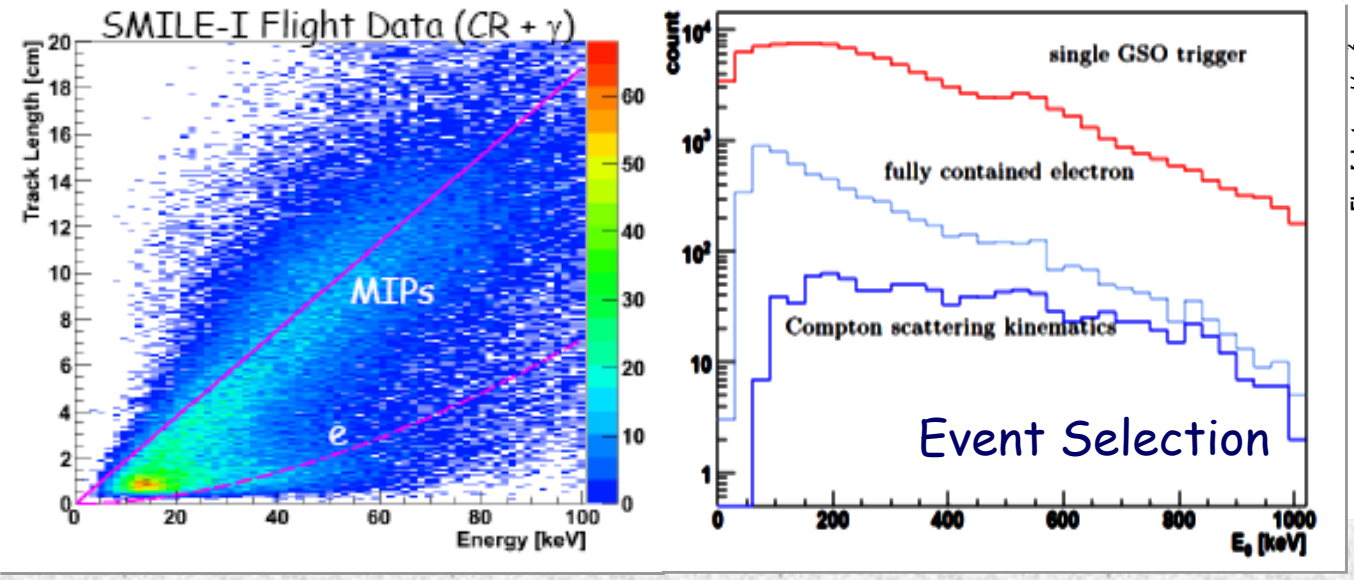
40cm cube camra with long duration observation

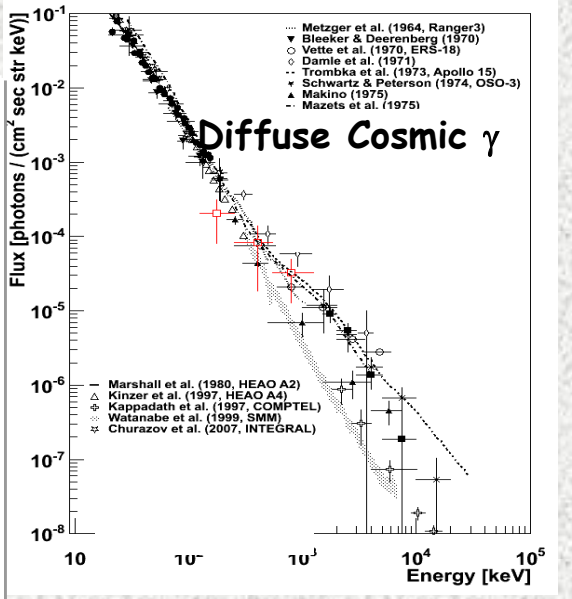
- Galactic survy & Gamma-Ray Burst Detection

50cm or 1m cube camera with satellite

- All sky survey, detection of highest-z GRB

All Trigger # 2.3x10^5 (3hours)
Signal ⇒ ~420(down going) +500(up)
Simulation ⇒ ~400 (diffuse cosmic)



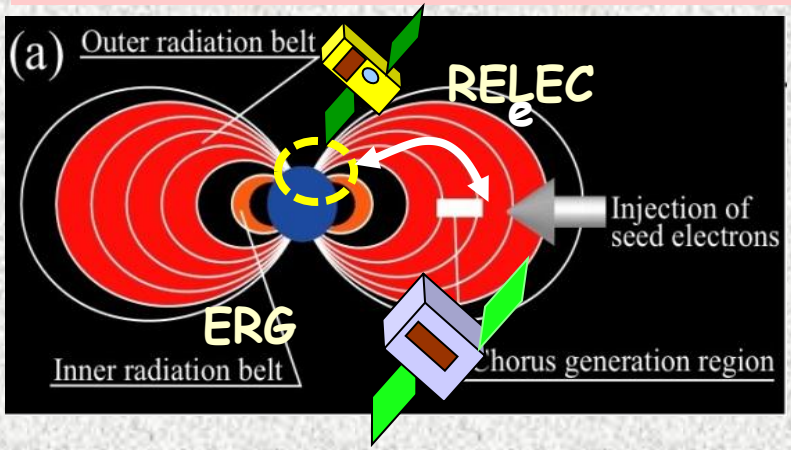


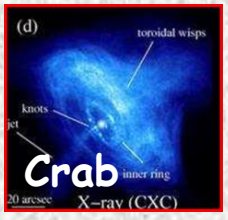
Takda et al.ApJ (2011)

SMILE-II in the North Pole (2014~2019？)



Collaboration:
Kyoto、NiPR, Nagoya STE-lab, JAXA, Hokkaido, Kanazawa, IRF, Lu lea Tech. Univ., EISCAT, BARREL(UC Santa Cruz, Dartmouth)

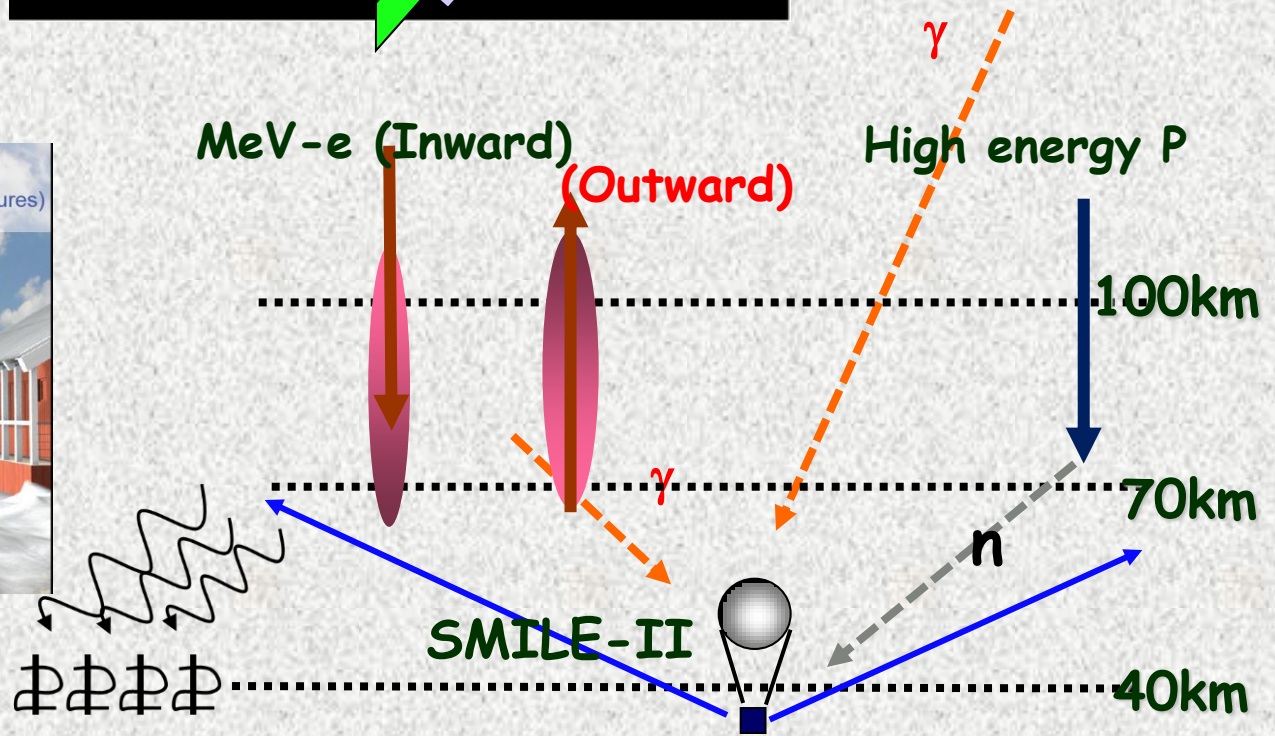




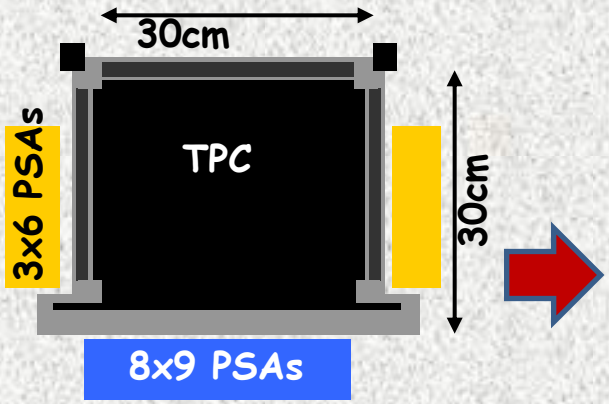




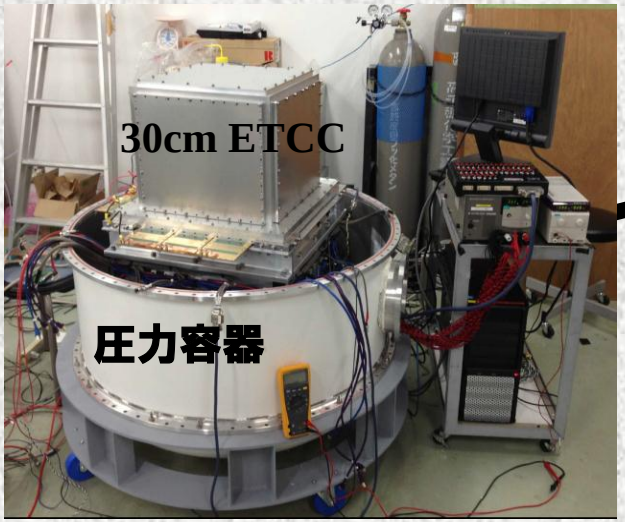
EISCAT_3D



SMILE-II (2009~)



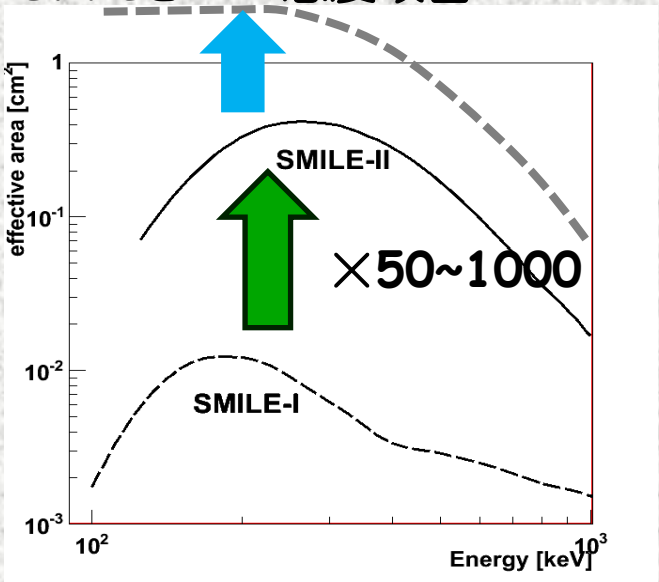
SMILE-II F.M.調整中
今月　真空試験@ISAS





SMILE-II最終形
現行F.M.は最終予定のシンチレーター半分

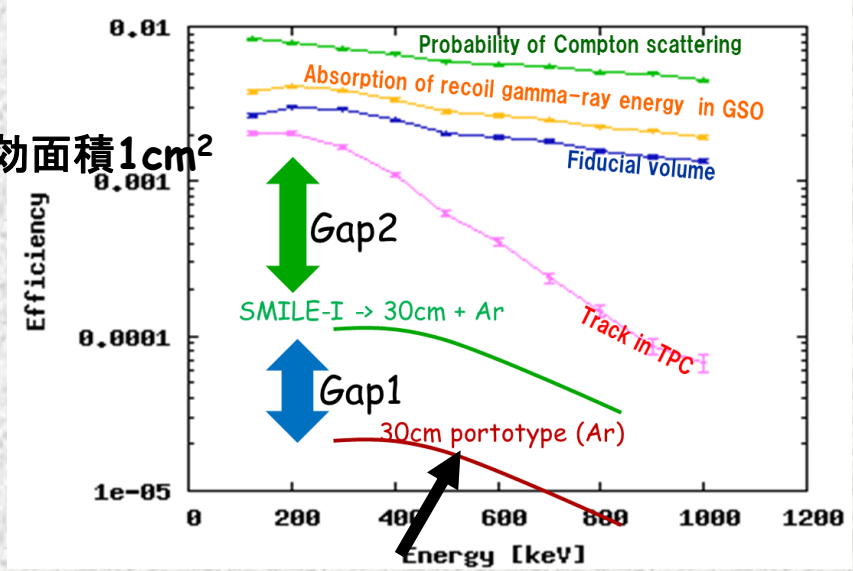
SMILE-II 感度改善



Sensitivity for the Crab Observation (Japan)
2009年当初の想定
0.5cm² @300keV (35km height,)
- Crab観測　大樹町で
Significance ~5σ /6時間

SMILE-II 検出効率の大改善

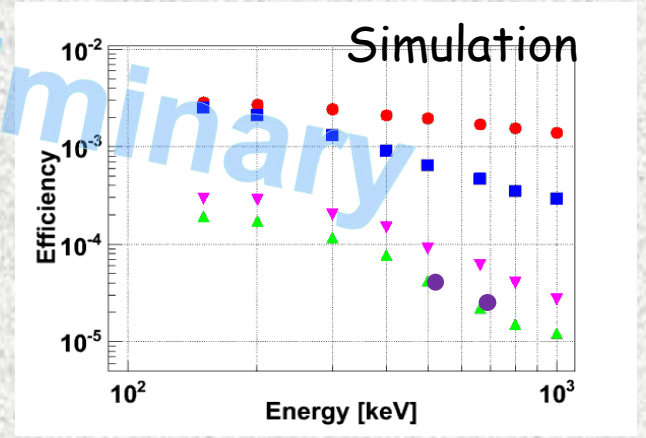
ETCC(10x10x15cm)Ar 1atm
2×10^{-6}@662keV

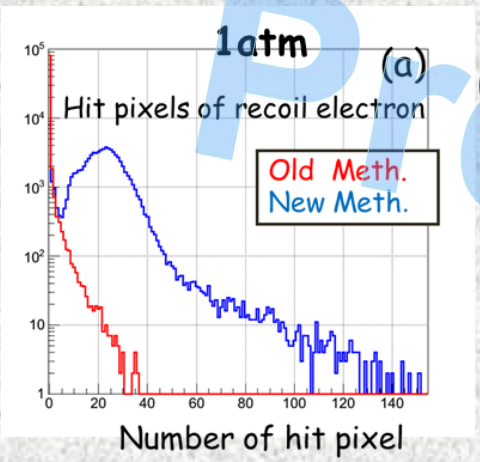


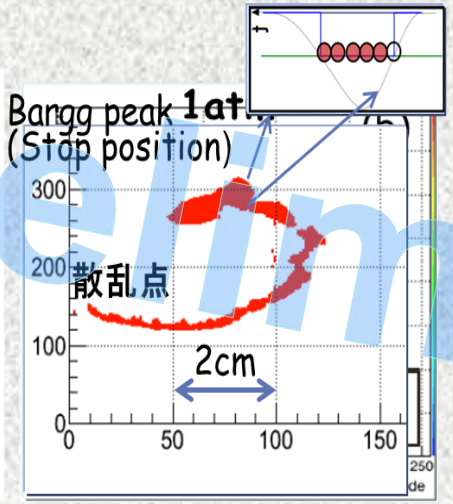
効面積1cm²

10cm角ETCC Ar
測定値
2×10^{-5}@6662keV
4×10^{-5}@511keV

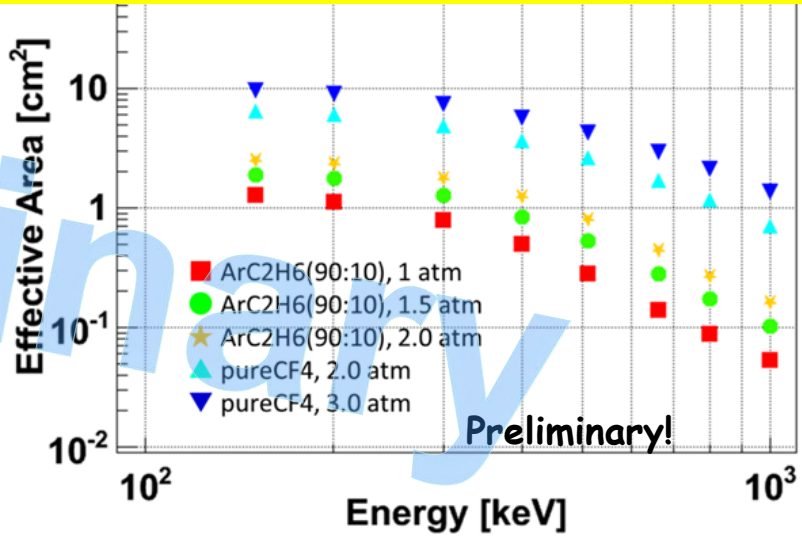
10倍改善







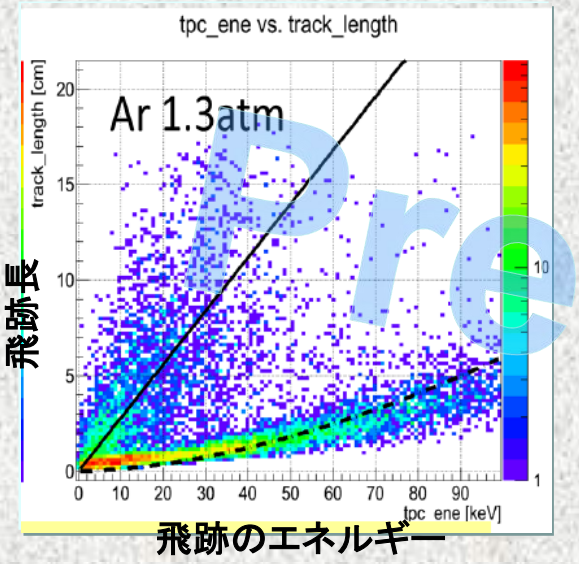
30cmETCC F.M. Effective Area (Sim.)

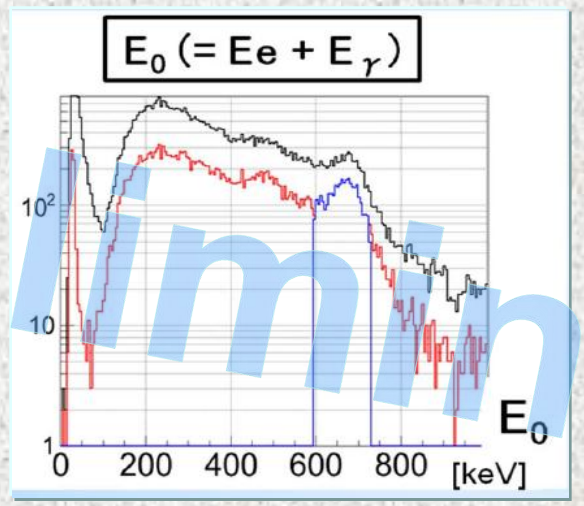


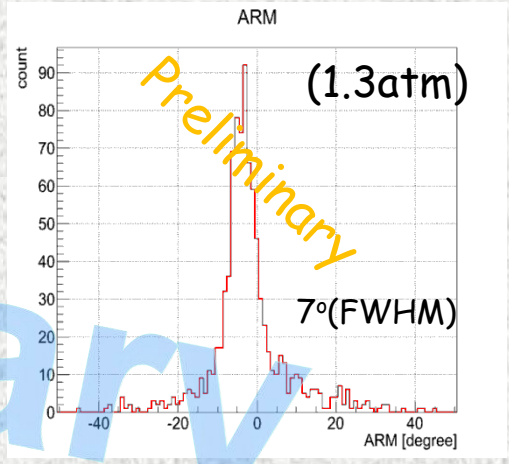
現行、1cm²@300keV Ar 1atm 、2cm²(1.5気圧)
ガスCF4 3気圧で10cm² シンチレーター2倍で20cm²

Preliminary

改善型 ETCC の画像(662keV)

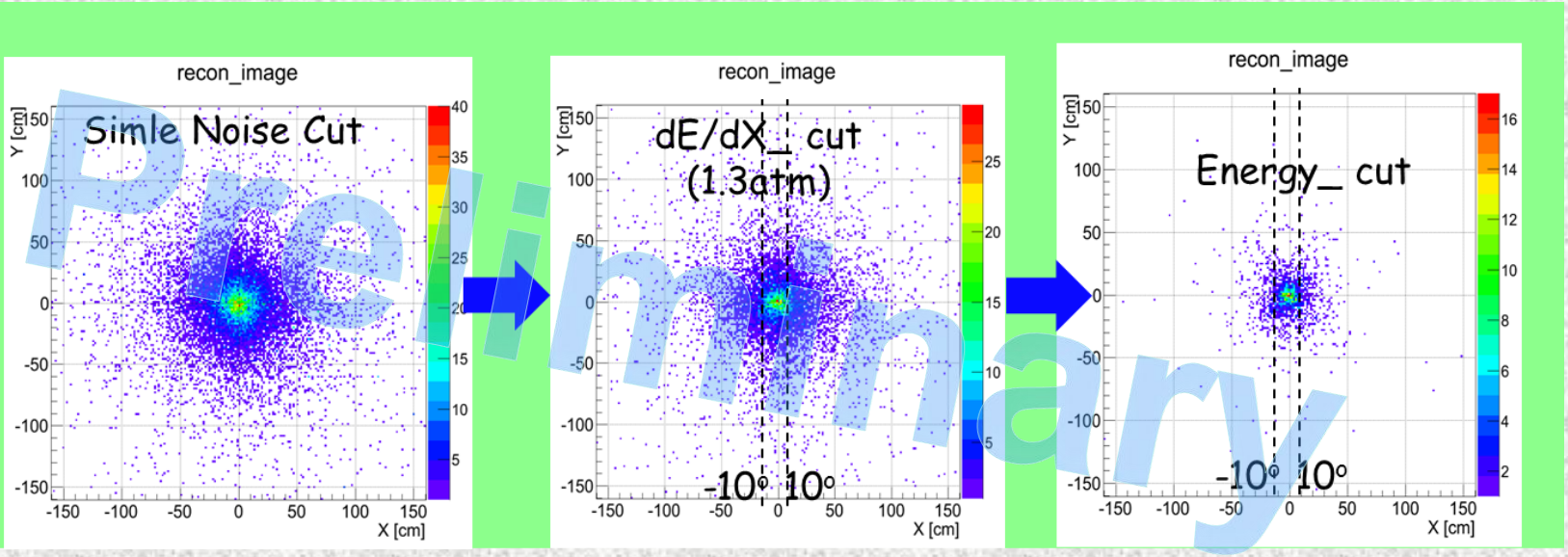






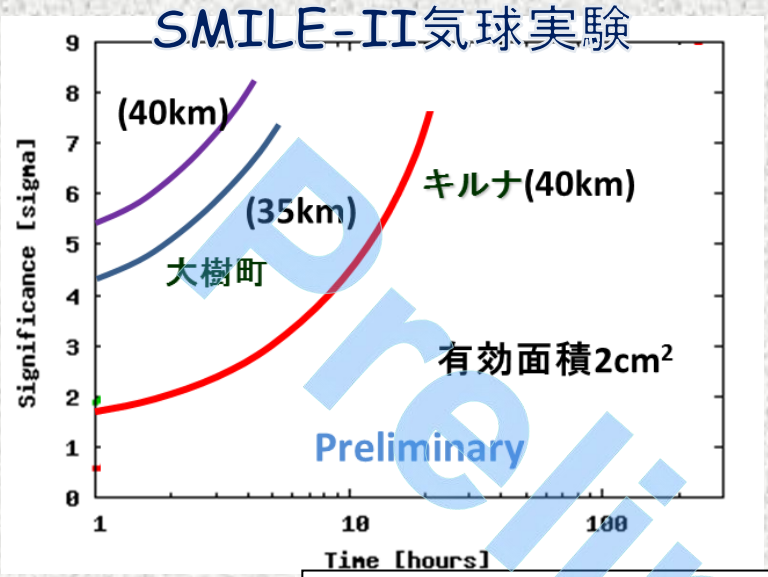
簡単な解析でOK

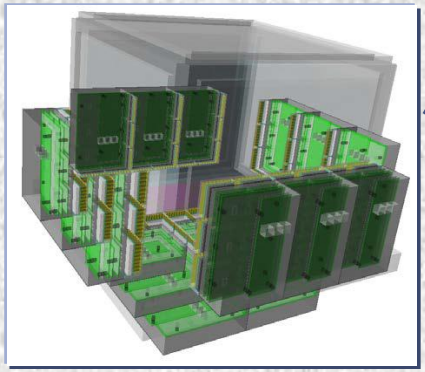
エネルギー損失率dE/dx cut + total Energy cut + (α-Cut)

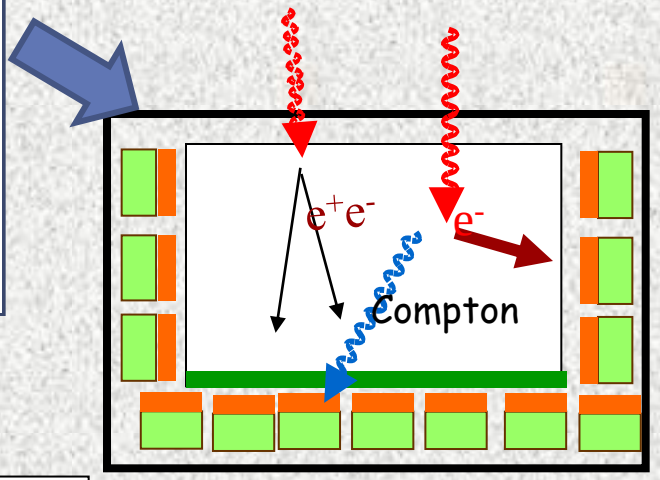


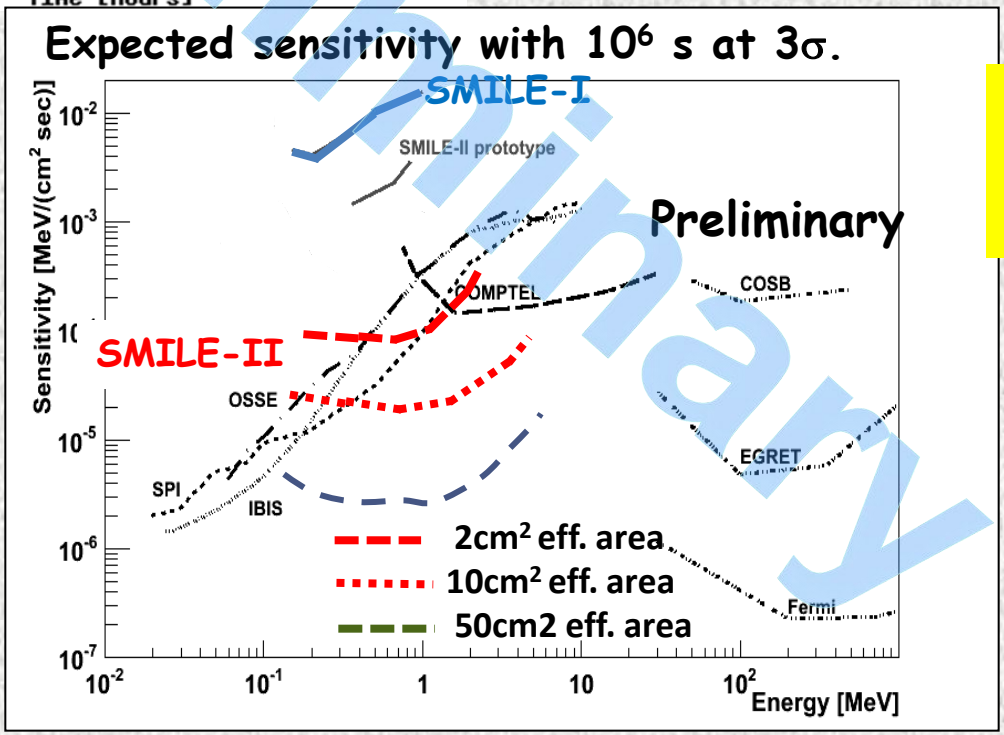
SMILE-II からの発展

30c角SMILE-II（シンチレーター　圧力容器外、一部穴あり）最大~15cm^2





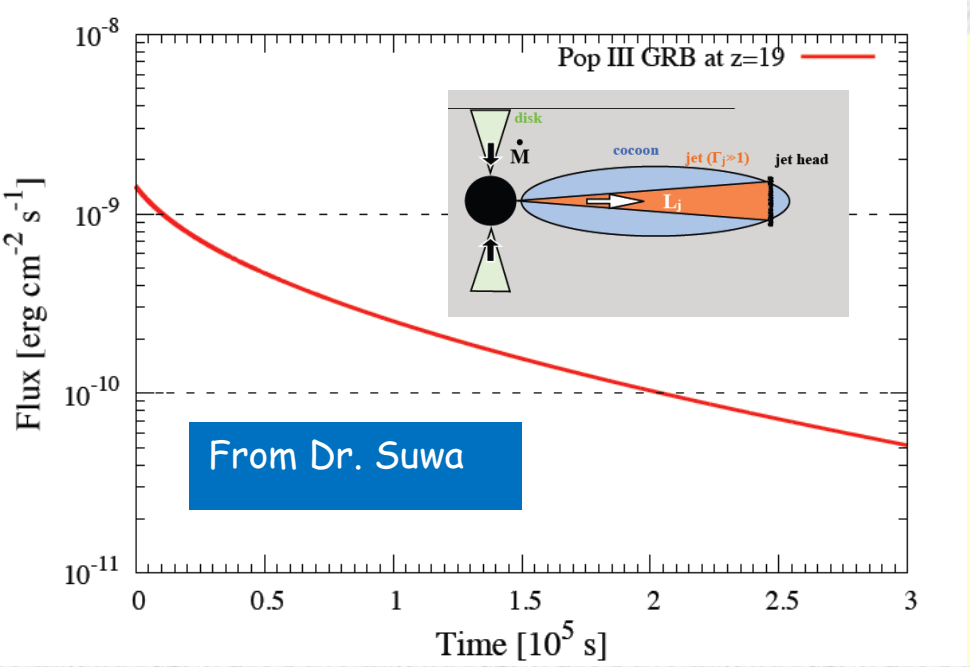




小型衛星40cm角ETCC
40～50cm^2@300keV
約千天体の発見が可能

Preliminary

宇宙の始まり　POP-III GRB 検出

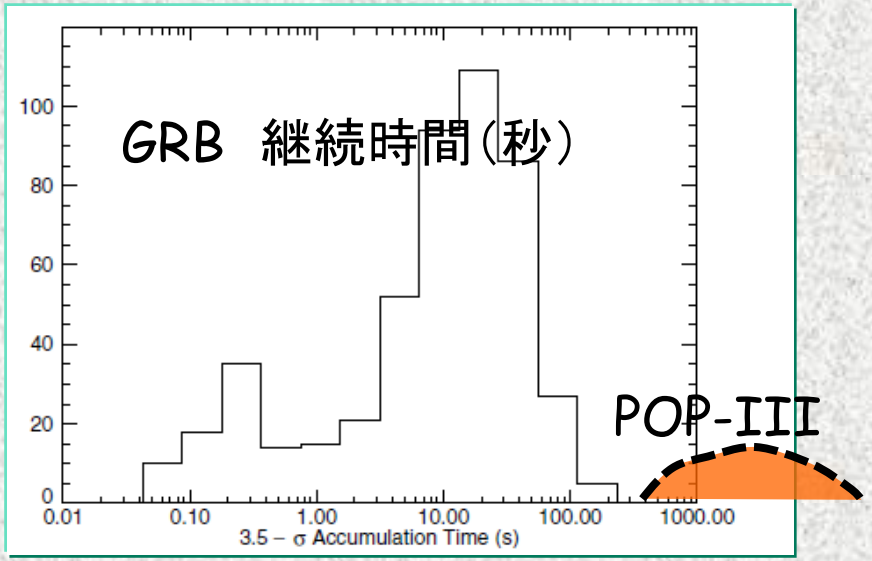


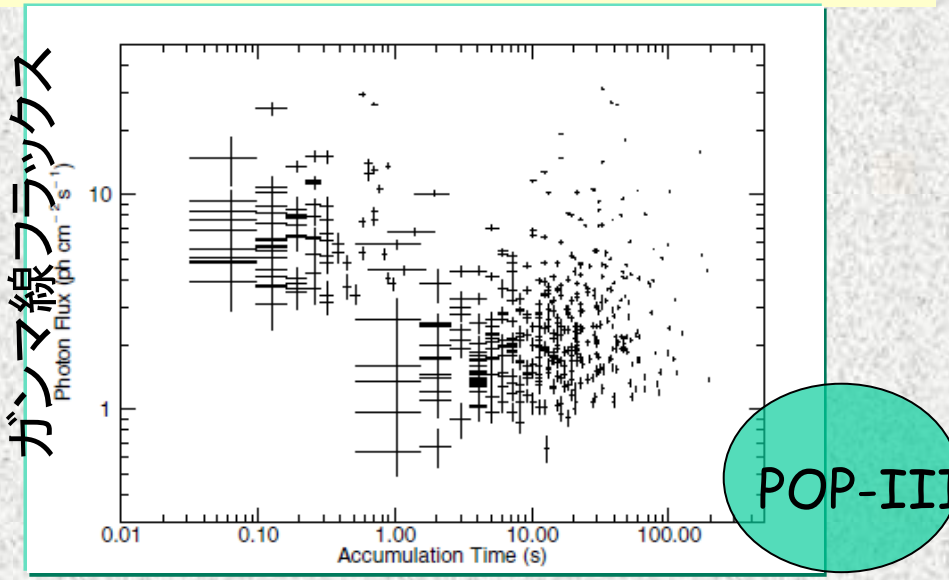
40cm角ETCCで検出可能性

GRB of 10^{-9}erg/cm^{2}s　($900M_{solar}$)

Eff.Area 50cm^2

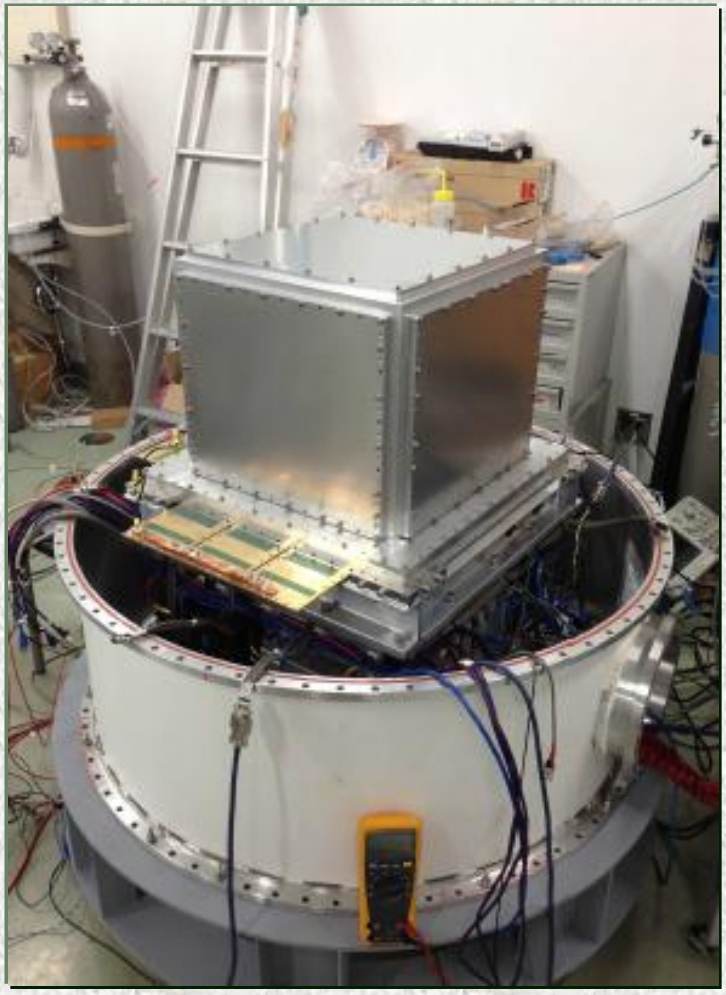
- 10^3s 500γ　S/N ~20σ
- 10^5s 5×10^4γ　S/N =680σ
- 100Msolar 以下でもSuper long burst 可能





W.S. Paciesas et al. Ap J.S, 199:18 (2012)

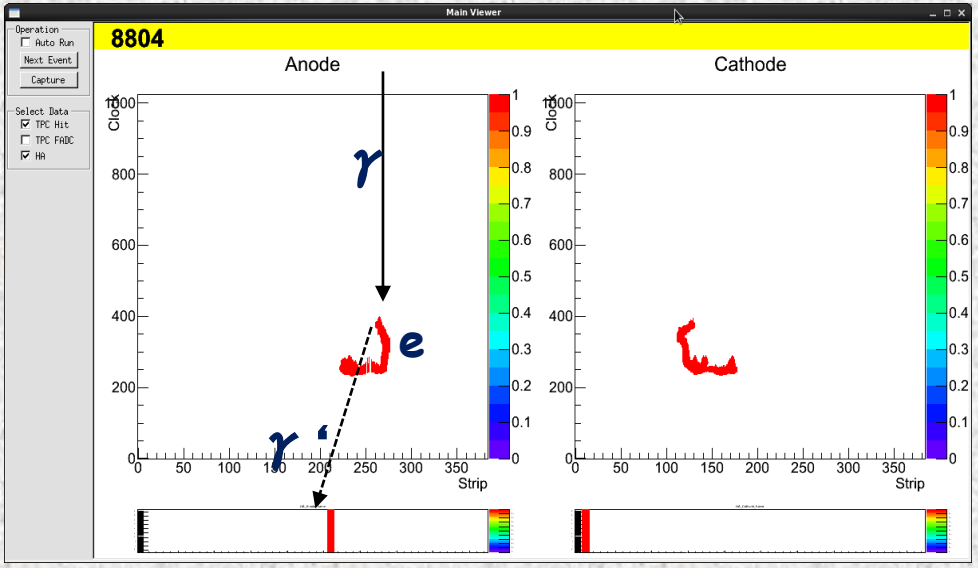
SMILE-II現状



2月　熱真空試験@ISAS

7月　加速器環境試験@RCNP

秋　再度熱真空試験、準備OK



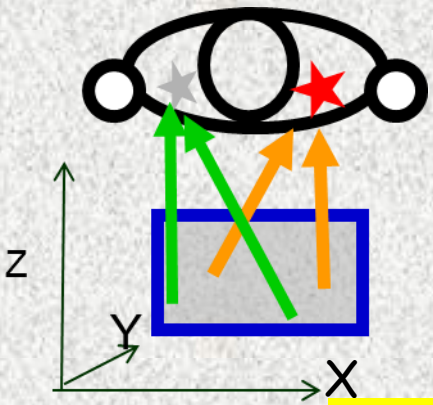
まとめ

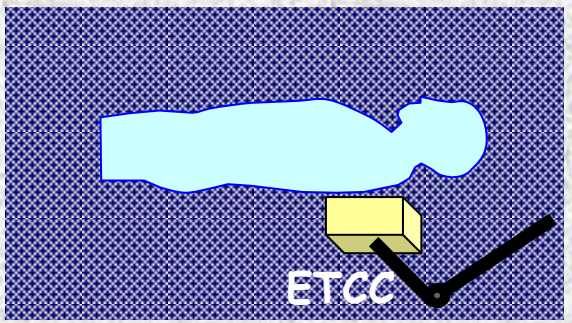
- MeVガンマ線は宇宙最初の星から、太陽風、地球の高層気象現象など、新しい地球と宇宙をつなぐ窓と期待される。
- ETCCが低雑音技術を実現、高感度観測の手段が見えた。
- SMILE-II北極周回気球観測　2014年観測希望、
- ERG、EISCATとの国際共同観測でオゾン層の謎へアプローチ
- GRBの新しい観測で宇宙最初の星発見の可能性を探る。
- 小型衛星（40cm角ETCC）で約千のガンマ線天体発見が可能、地球ガンマ線の常時観測も可能
- さらに30x30cm箱衛星で、高性能X線偏光衛星（年100個観測）

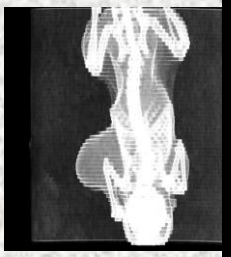
- 現在、JST微弱放射線画像装置実用化（堀場製作所）、京大キヤノン医工連携事業（医療画像装置応用）が進行中。

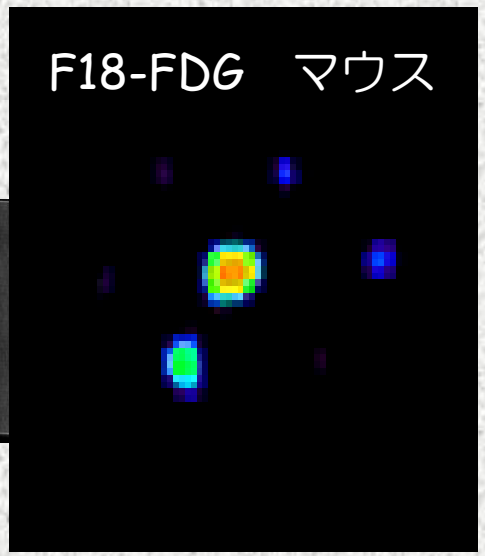
一方向撮影による3D可視化

ETCCの特徴（SPD)を利用した3D画像



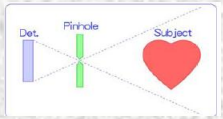


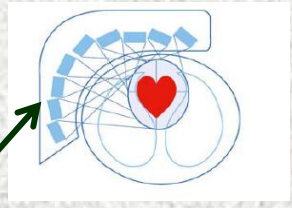


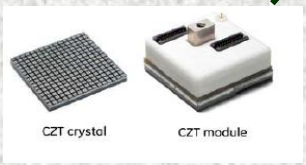


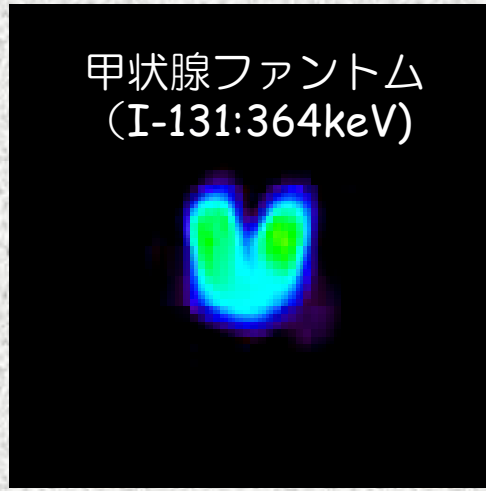
手術時のその場での3D-RI診断を可能に



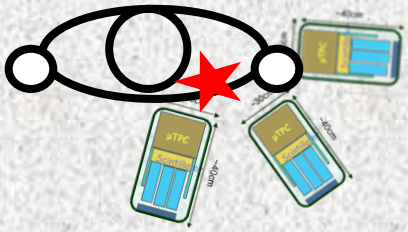




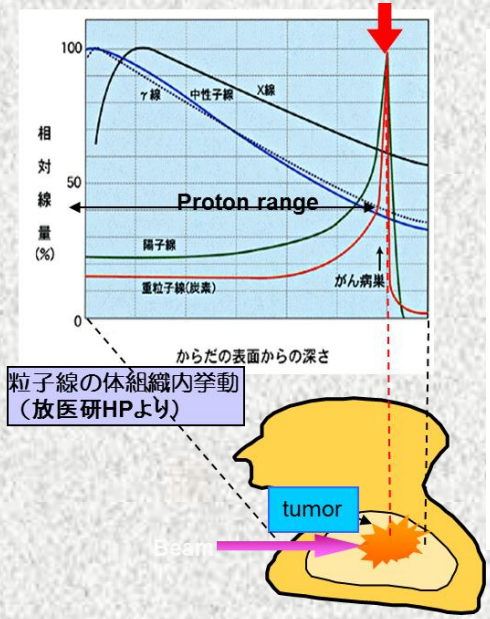


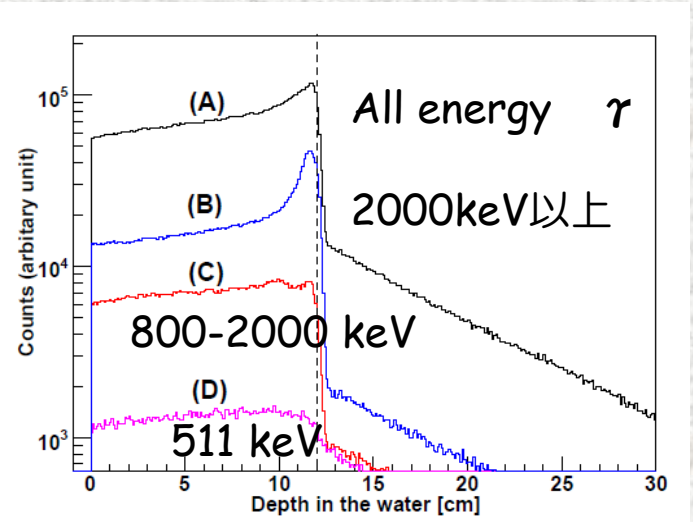


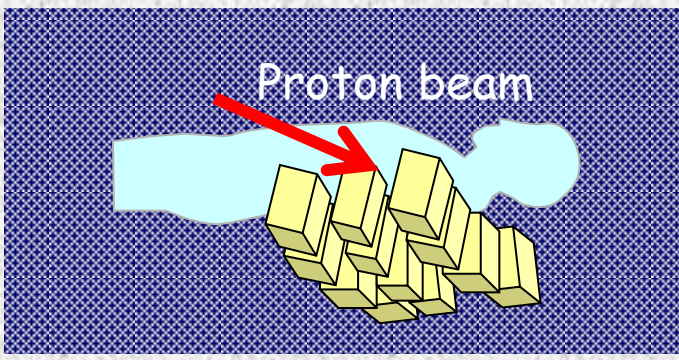
^{99m}Tc +^{18}F　新しいモダリティー



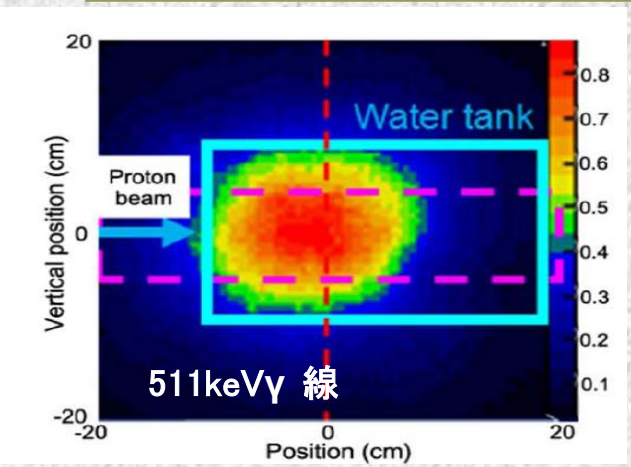
粒子線治療オンタイム・イメージング試験 @RCNP

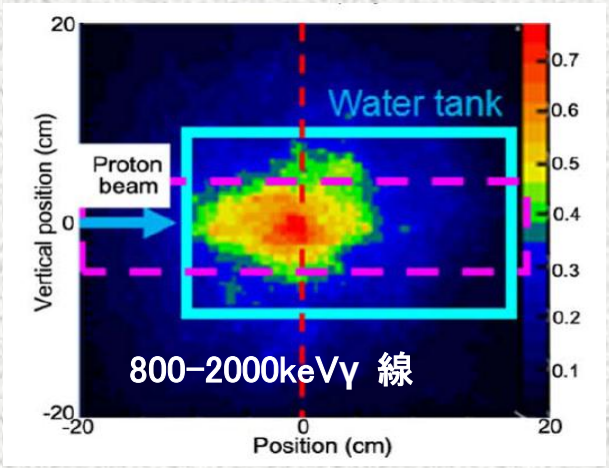






世界最初の連続γ 線イメージング！





Braggピーク

