

次世代天文学

ガンマ線天文学の将来計画

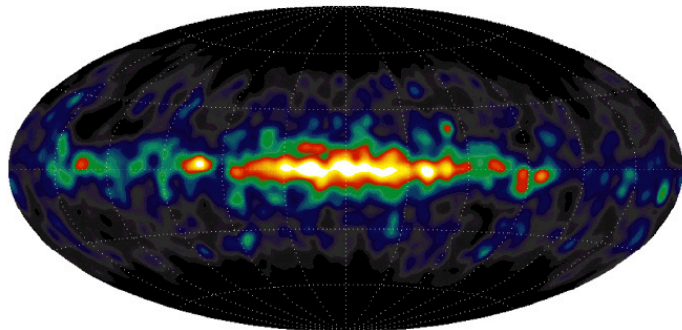
中澤知洋

宇宙航空研究開発機構(JAXA)

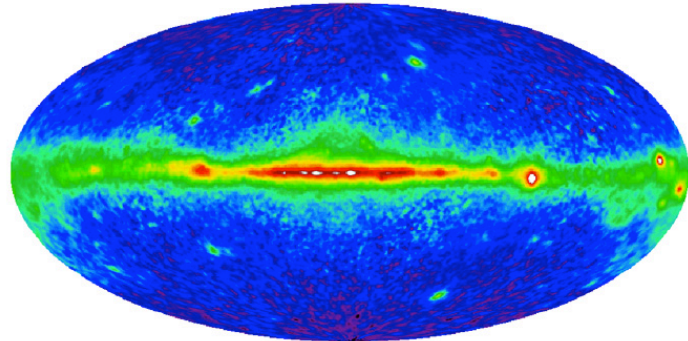
宇宙科学研究本部(ISAS)

ガンマ線で拓く宇宙物理

COMPTEL 1-30 MeV



EGRET >100 MeV



銀河系からの広がった放射は何か？
非熱的エネルギーの大半を担う、
MeV/GeV陽子からの信号は？

粒子加速のメカニズムと、 E_{total} 、 E_{max}

核ガンマ線、重元素合成、宇宙線励起 etc...

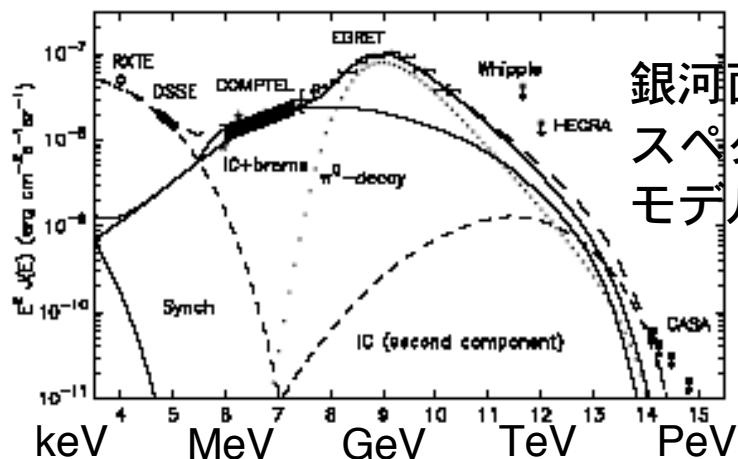
未知の素粒子の崩壊ガンマ線？

ガンマ線バースト、量子重力、
 $\gamma\gamma$ 吸収による宇宙初期の光子分布 etc ...

様々な高エネルギー物理現象
電子／物質／磁場／陽子／2次粒子...



sub-MeV, MeV, GeV, TeVガンマ線観測が
(他波長とともに) 明らかにする
高エネルギーの宇宙／未知の世界



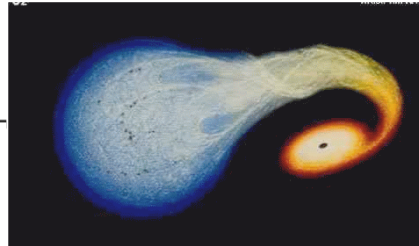
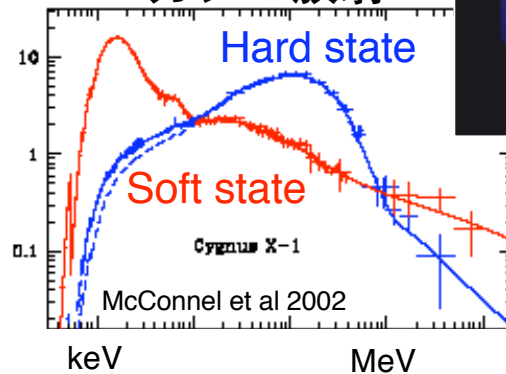
銀河面放射
スペクトルと
モデル

ガンマ線で拓く宇宙物理

○ブラックホール

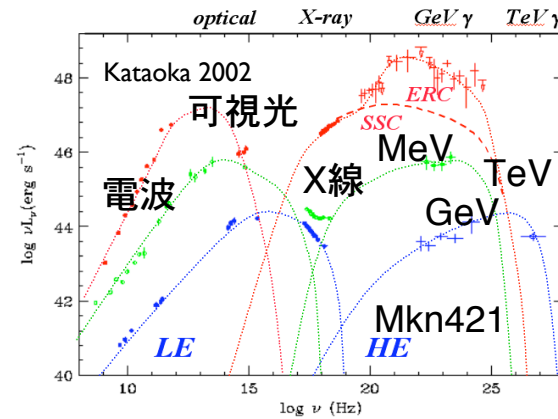
CygX-1の

X/ガンマ放射



放射メカニズム
→物理現象の理解
極限の物理

○ブレーザーのジェット

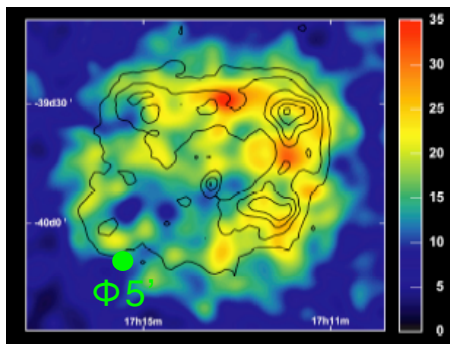


各成分の分離
多波長
+時間変動

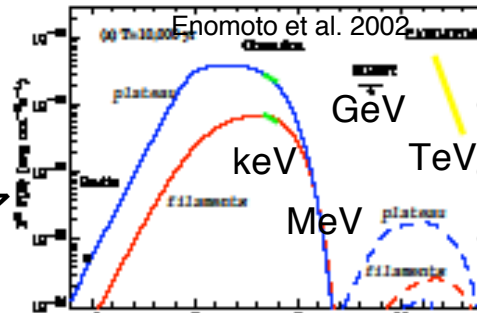
AGN巨大ジェットの「正体」

○SNRにおける 粒子加速

TeVイメージ+Xコントラスト



F. Aharonian et al. Nature 2004



Uchiyama et al. 2004

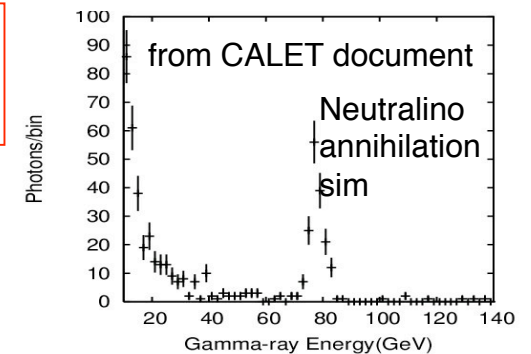
- e-sync + e-IC放射 + π^0 ?
- 分子雲相互作用
→加速のメカニズム
／総エネルギー

○全く新しい知見の提供

- 未知の素粒子の崩壊輝線?
- ブラックホールの直接証拠?
- 宇宙初期の光子密度(γ - γ 吸収)

新しい
天体物理学

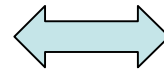
などなど



私見：ガンマ線天文学の面白いところ

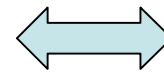
- ・ いままで見えなかったものをみる
- ・ いままで知らなかった原理を知る

宇宙の高エネルギー現象の
素過程/メカニズム/光子伝搬



地球に届く光子の
スペクトル、時間変動、偏光

宇宙の未知の放射



新しい物理

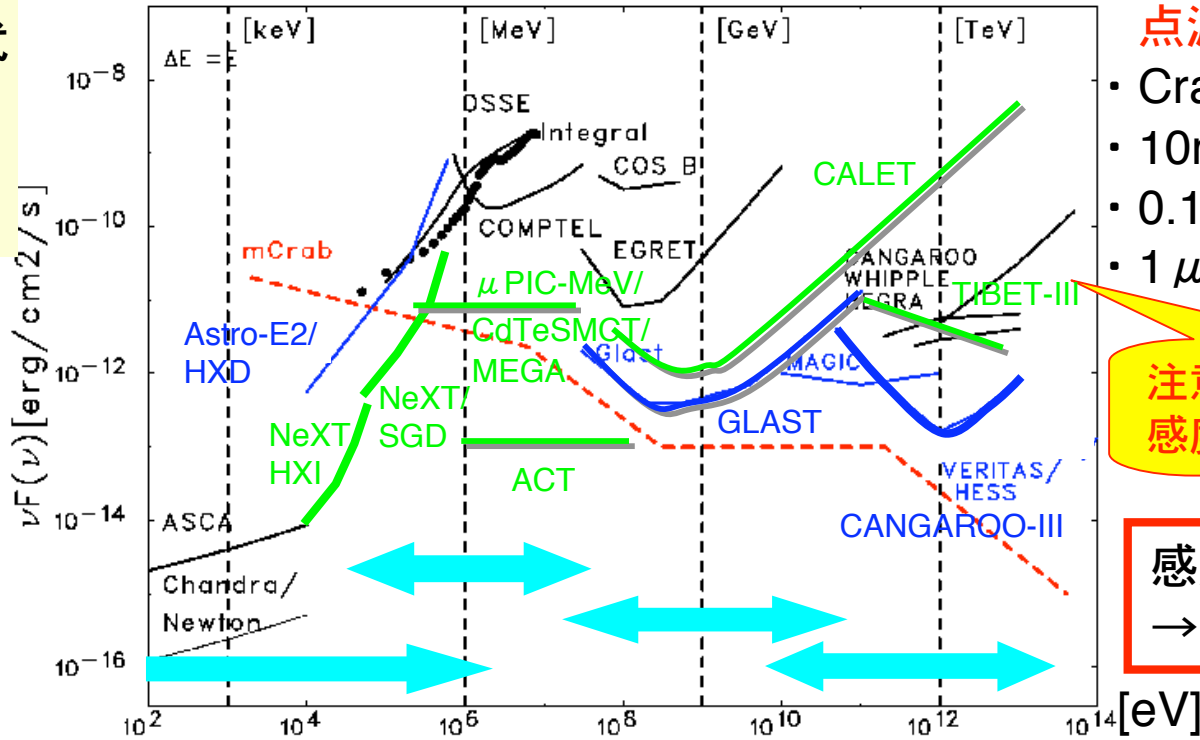
RF/IR/Opt/Xによる「宇宙の果てまで知る天文学」を原理から支え
宇宙創世記を探る新たなプローブとなり
未知の物理現象を追求する「新しい天文学」を創成する

宇宙ガンマ線の観測技術

100keV~100TeVのガンマ線観測：様々な物理原理を応用

過去／現代
数年以内
5~15年

広視野
Pointing



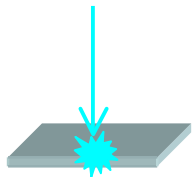
点源感度の指標

- Crab：始まり
- 10mCrab：系内+系外
- 0.1 mCrab：系外
- 1 μCrab：宇宙の果て

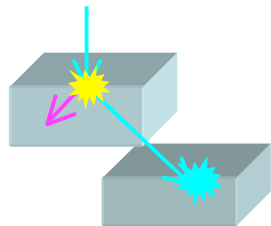
注意：Diffuse放射への感度は広視野型が有利

感度向上の時代へ
→これからの天文学

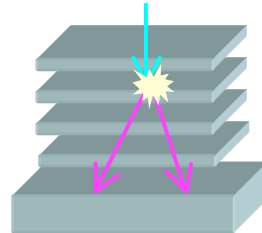
1MeV以下
光電吸収



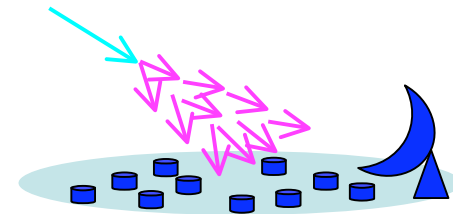
100keV~100MeV
コンプトン散乱



100MeV~100GeV
電子対生成



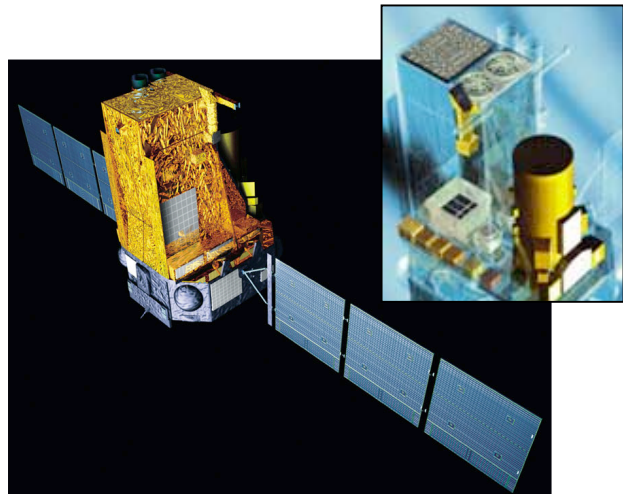
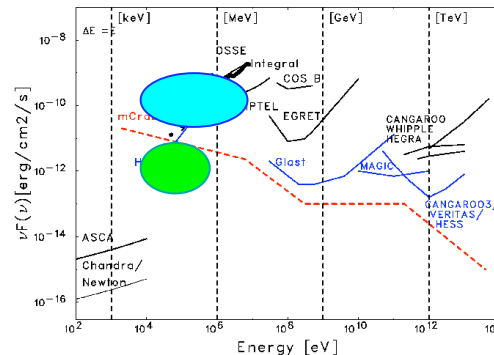
10GeV~100TeV
空気シャワー/チェレンコフ



Sub-MeV帯域 (pointing)

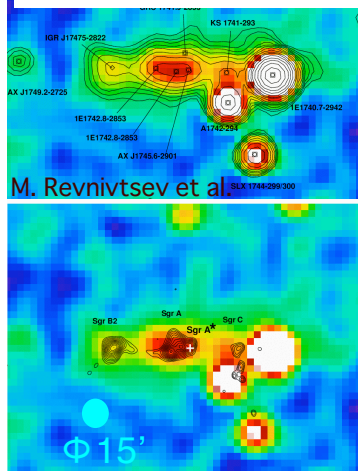
○INTEGRAL衛星(2002-) ESAのCorner Stone Mission

光電吸収型

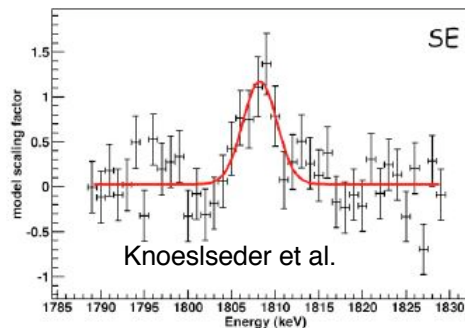


10keV-1MeVで最高感度
(1-100mCrab)、16'の撮像

銀河中心の硬X線イメージ



M. Revnivtsev et al.

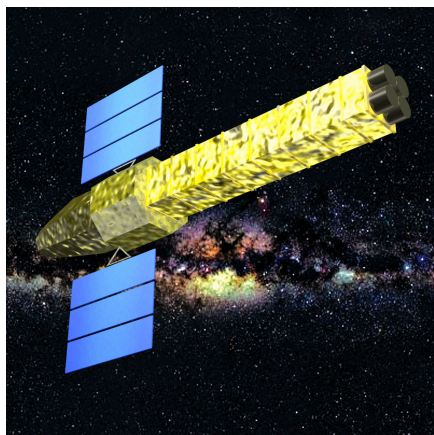


26Alからの
核ガンマ線
(1.8MeV)

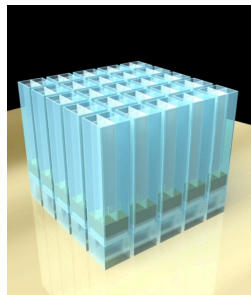
光電吸収型 + Coded Mask
の巨大ミッション

○次世代X線天文衛星「NeXT」(2011-目標:Jpn)

鶴さん講演で既出



軟ガンマ線検出器SGD

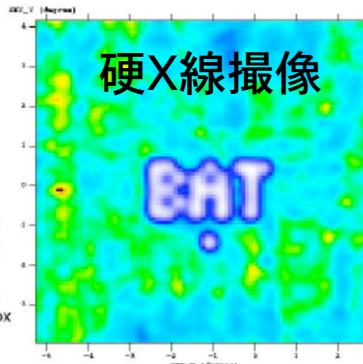
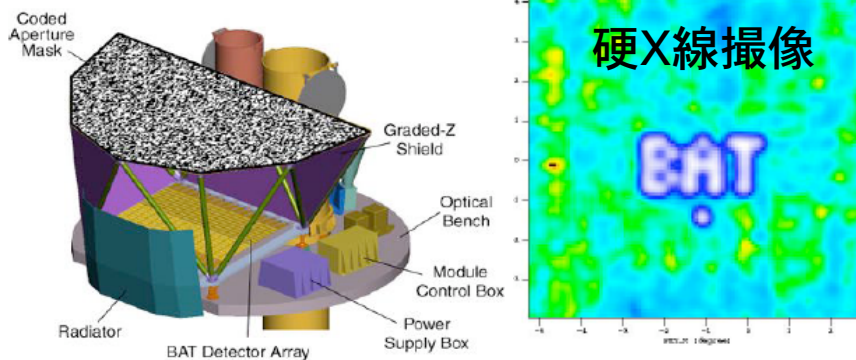
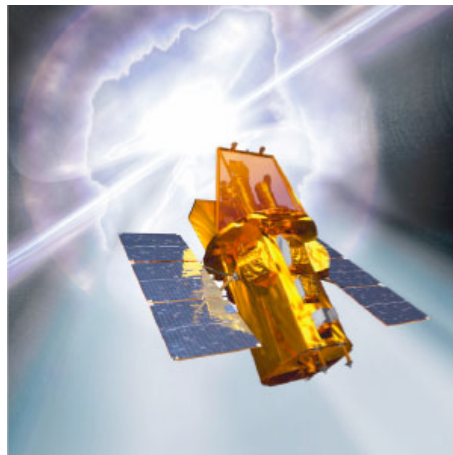


狭視野の半導体コンプトンカメラ

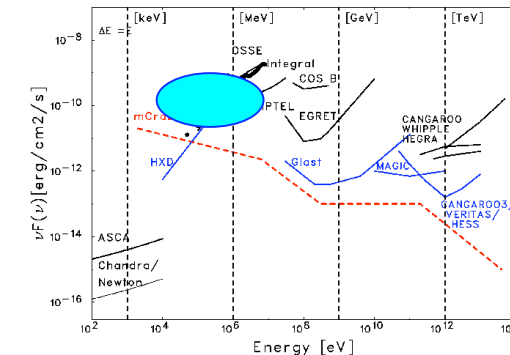
100keV-1MeVで1-2桁の感度向上
~ 0.1 mCrab @100keV

Sub-MeV帯域 (広視野) ~ガンマ線バースト探査+サーベイ~

- Swift衛星(2004-) MIDEX(~200億円)。米 with 英/伊 etc + 日本



光電吸収型

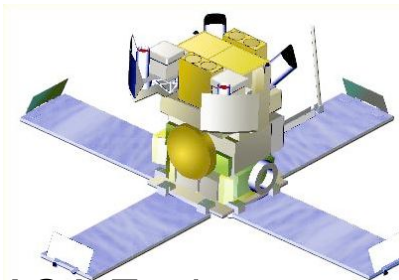


大面積 / 広視野の
光電吸収型+mask

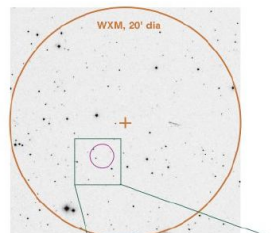
11/20 打上げ。立上げ中。
すでに、GRB 5こを検知
4分角で場所特定を実証

GRB~100 個/yr 位置だし (BATSEの数倍の感度)
X、可視で即時自動追尾

- HETE2衛星(2000-) 日米仏。Swiftに先行。位置だし。



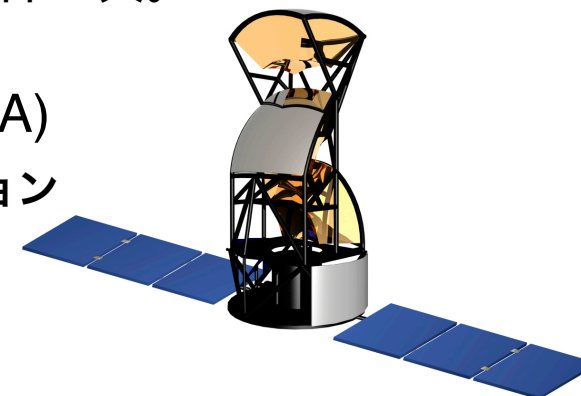
数十億円



NASA Explorer
“mission of opportunity”

- 小型GRB衛星 e.g. 「風鈴」(東工大) post-Swift、安価/工夫。

- EXIST (NASA) 検討中の大ミッション “Einstein Probe” 8m²のCZT検出器

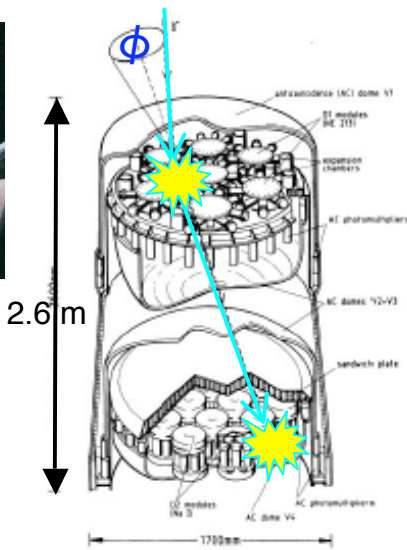


MeV帯域 粒子由来BGDとの戦い

○ COMPTTEL検出器 (1991-2000)



NASAの
CGRO衛星
に搭載



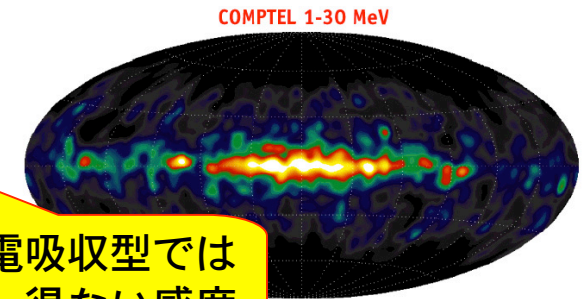
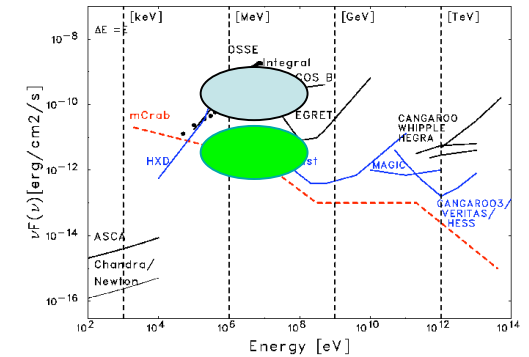
光子のコンプトン散乱を追跡

10⁻¹⁰ erg/s/cm² レベルの
感度をMeV帯域で達成

100mCrab、30cm²、
a few deg(FWHM)@処理後

コンプトン散乱

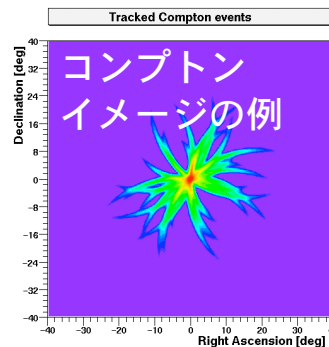
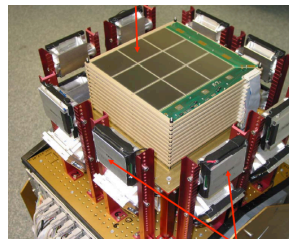
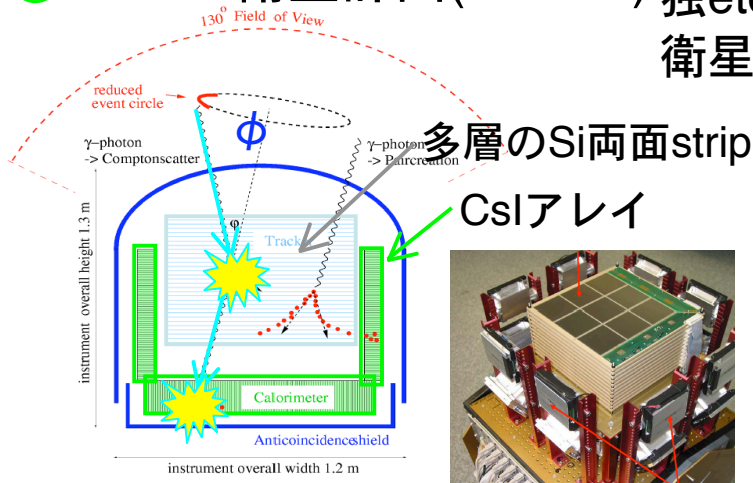
$$\cos \varphi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right)$$



光電吸収型では
なし得ない感度

MeV宇宙観測への先駆け

○ MEGA衛星計画(2010-?) 独etc 数百億円 衛星+気球



次世代コンプトン望遠鏡の技術の1つ

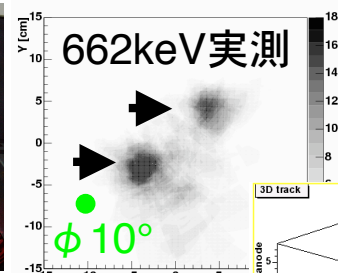
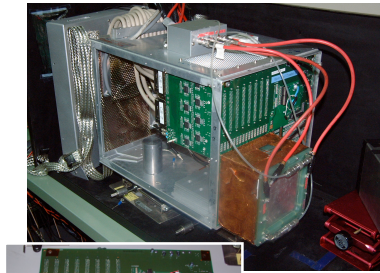
Si半導体→ΔE向上→Δθ向上
↳コンパクト→面積向上

COMPTELより1桁高い感度

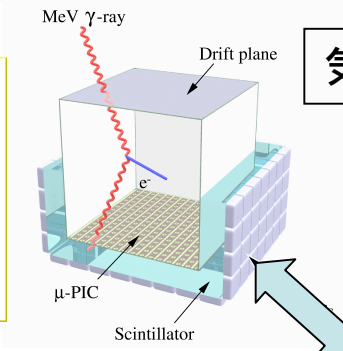
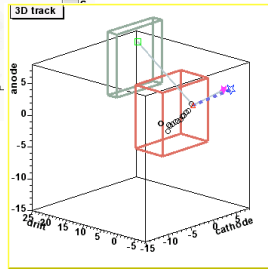
他：TIGRE気球、LXeGRIT気球

MeV帯域 ~日本のアプローチ~

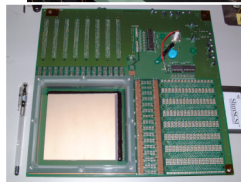
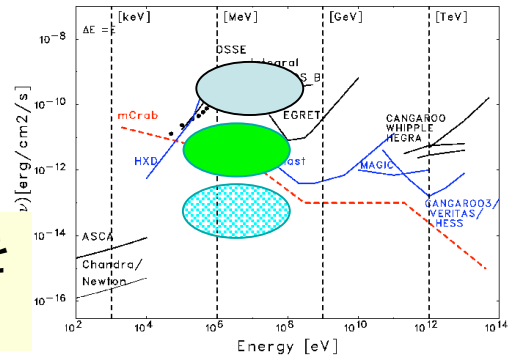
○ μ PICを用いたMeV γ カメラ (2015-?: Jpn)



3dimガス検出器で反跳電子を
トラックし撮像を改善

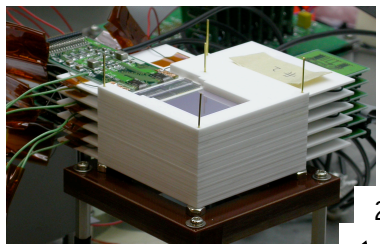


気球→ISS/衛星



プロトタイプ
と実測結果

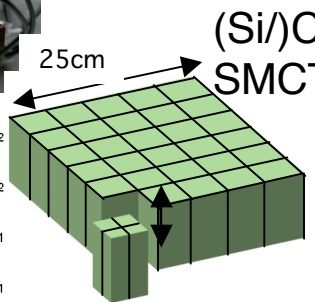
○ CdTe 半導体コンプトンカメラ(2015-?:Jpn)



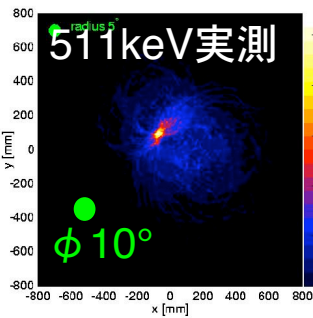
多層のSi/CdTe半導体
 ΔE 、 $\Delta \theta$ 、効率優れる

気球→衛星

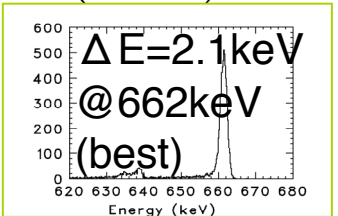
10^{-13} erg/s/cm² の感度
10~100 μ Crab



(Si)/CdTe
SMCT
NeXT/SGD
同じ技術

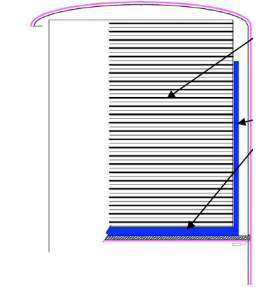
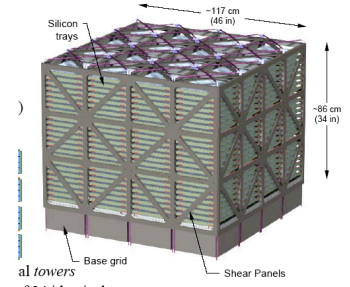


新しい重元素
半導体CdTe



1m³の半導体の
固まり?

12m³のXeガス
カウンター?

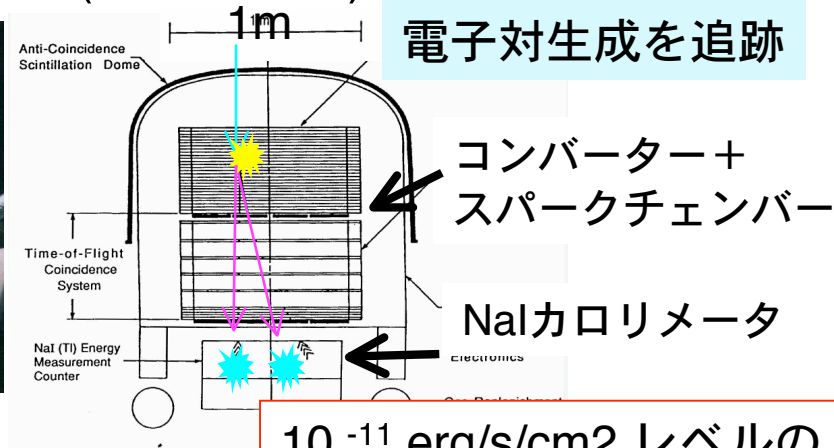


GeV帯域

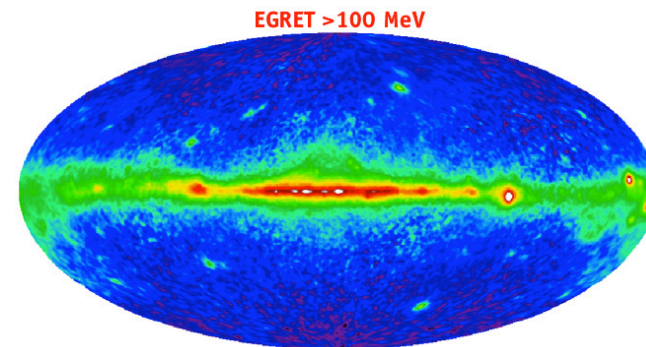
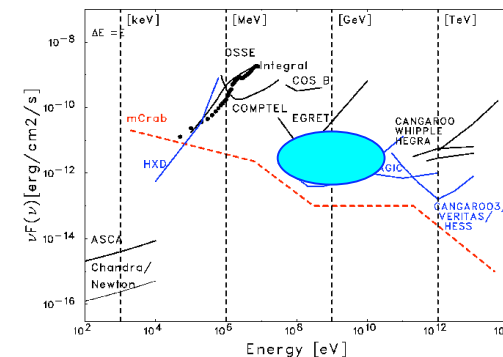
○EGRET検出器 (1991-2000)



NASAのCGRO衛星に搭載



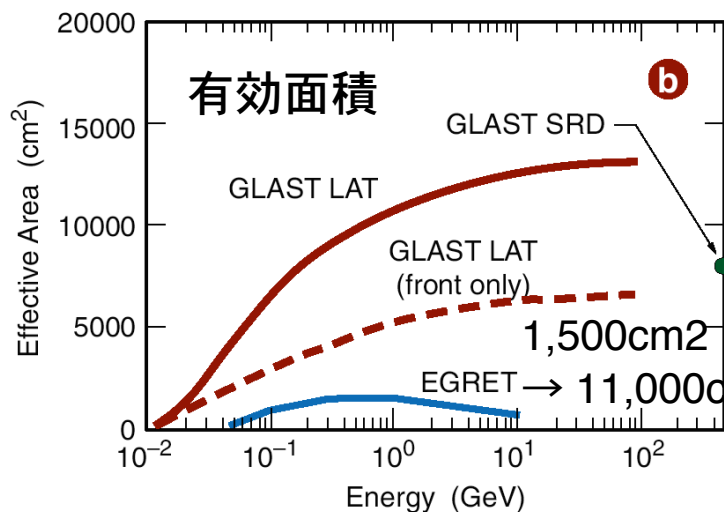
10⁻¹¹ erg/s/cm² レベルの感度をGeV帯域で達成



○GLAST衛星 (2007-) 米日伊スウェーデン ~200億円



Si stripトラックー+モジュール型カロリメータ



EGRETの50倍の感度 (天体数~1万)

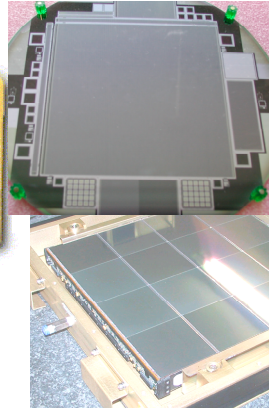
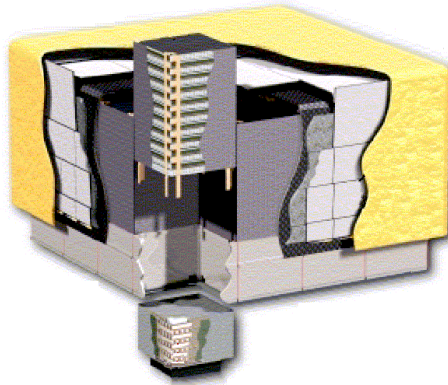
$\Delta \theta = 30' \rightarrow 6' @ 1\text{GeV}$

- 10mCrabで系外まで探査
- 未知の素粒子
- 宇宙初期の光密度

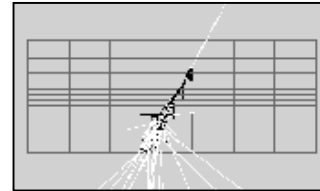


GeV帯域 ~日本の貢献~

- GLASTの主検出器LAT

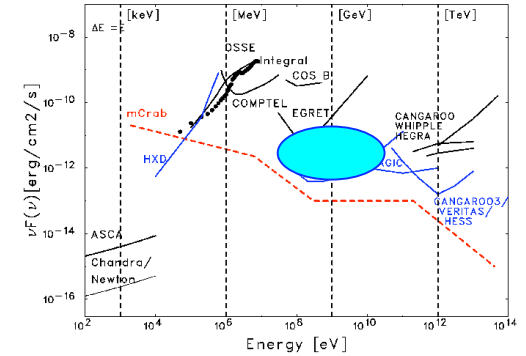


日本製/担当のSi strip
トラッキング能力の向上
ソフト、キアル他

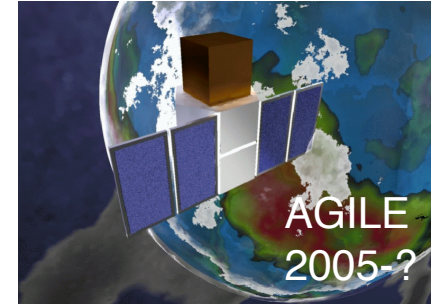


1GeV
光子
sim

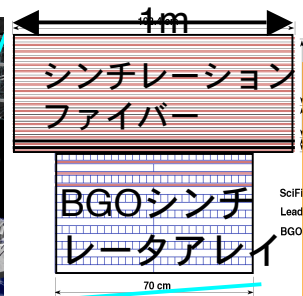
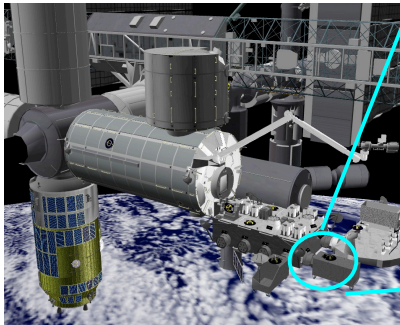
気球実験
も実施



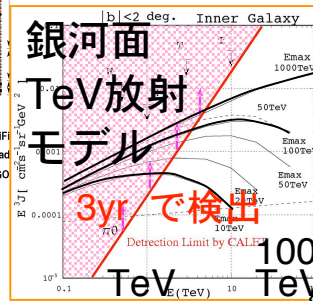
○伊の「小GLAST」



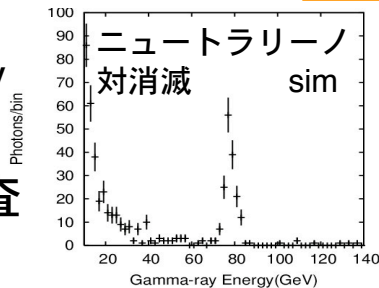
○ CALET (2010-? Jpn)



気球実験@南極実施中→ISSへ

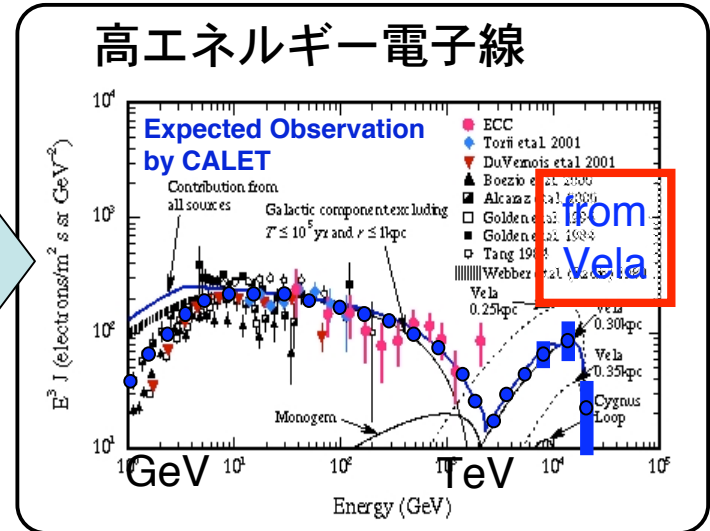


- GLAST後期~
- $\Delta E < 2\%$ @100GeV
→未知の素粒子
- TeVのDiffuse探査
→銀河面etc



2つの
任務を
果たせる

高エネルギー電子線



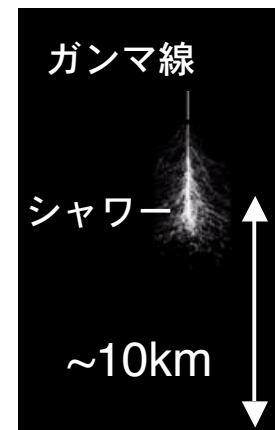
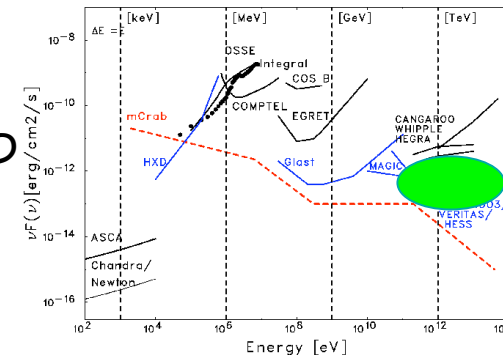
TeV帯域

TeVチェレンコフ望遠鏡：近年最も発達したフロンティアの1つ

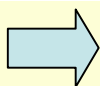
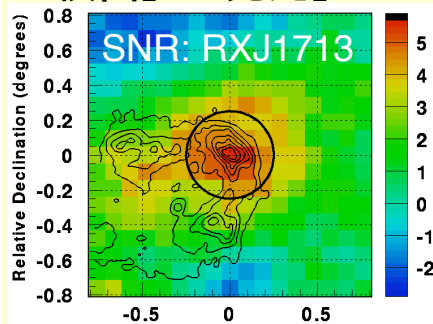
ステレオ撮像型チェレンコフ望遠鏡

○ CANGAROO-III (日豪)

10~15億円



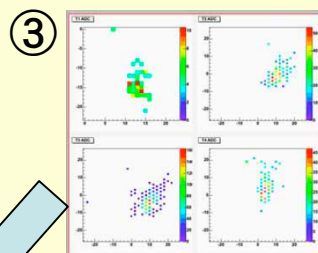
① 単一鏡による「検出」「発見」



② 大型化 感度/帯域の向上



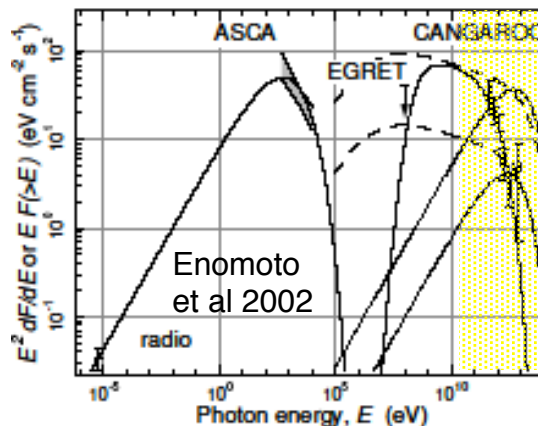
4つの望遠鏡によるステレオ観測



4分角の撮像 → 新時代へ

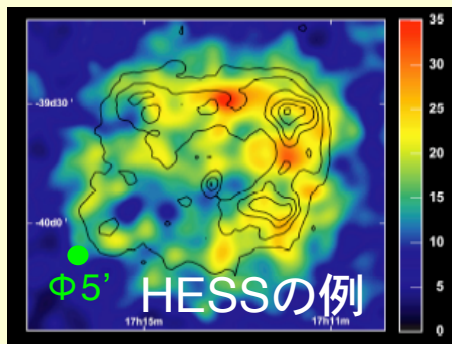
100GeVで 3×10^{-13} erg/s/cm² (~3mCrab) に迫る感度

1990年代のX線衛星に匹敵する角度分解能



TeVのもたらすサイエンス

- e-ICとπ0の区別
- 加速の最高エネルギー
- 新たな活動銀河中心 etc...



TeV帯域

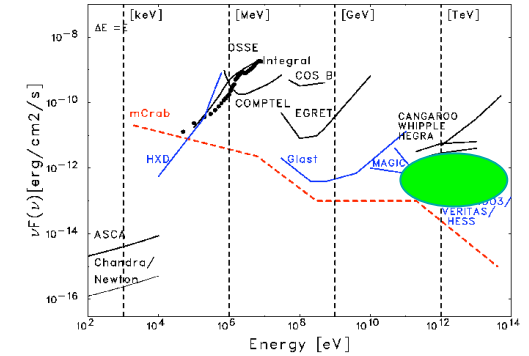
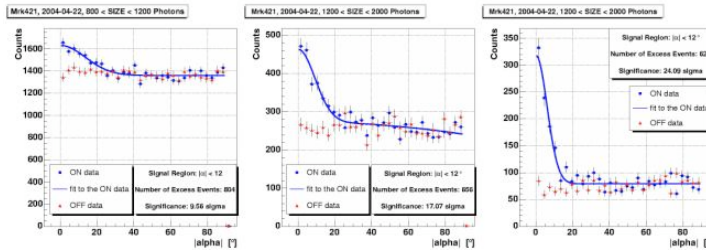
○MAGICチェレンコフ望遠鏡 (独西伊日)



カナリア諸島

大面積単一鏡(17m)による
30 GeVまでの検出

800 - 1200 photons (75 GeV) 1200 - 2000 photons (102 GeV) 2000 - 4000 photons (160 GeV)



○ARGO-YBJ(伊中)

伊中共同の
AirShower
実験。TIB
ET-ASの
隣にある。



立ち上げ中

○TIBET-III将来計画 (日中:3-5億円)

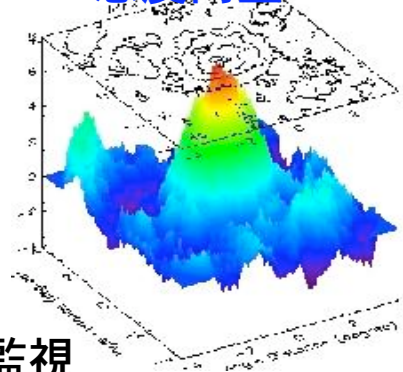
AirShowerによる宇宙線+TeVガンマ線 広視野観測



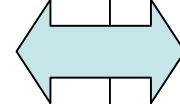
~10⁻¹¹ erg/s/cm² (100m Crab)程度@TeVで 2 strを監視

Mkn421のTeV信号

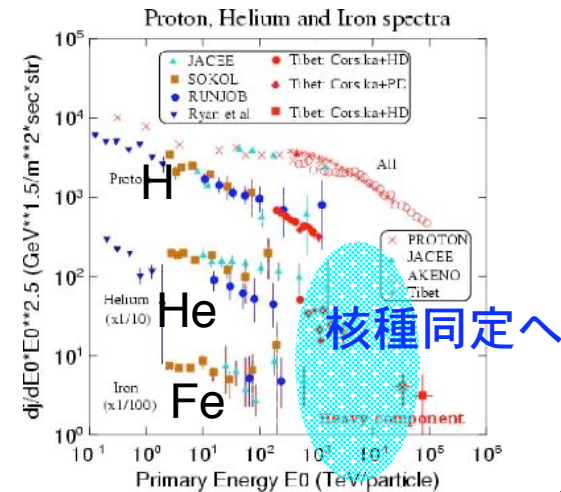
→感度向上へ



2つの
任務を
果たせる



“knee”領域の宇宙線スペクトル



核種同定へ

まとめ

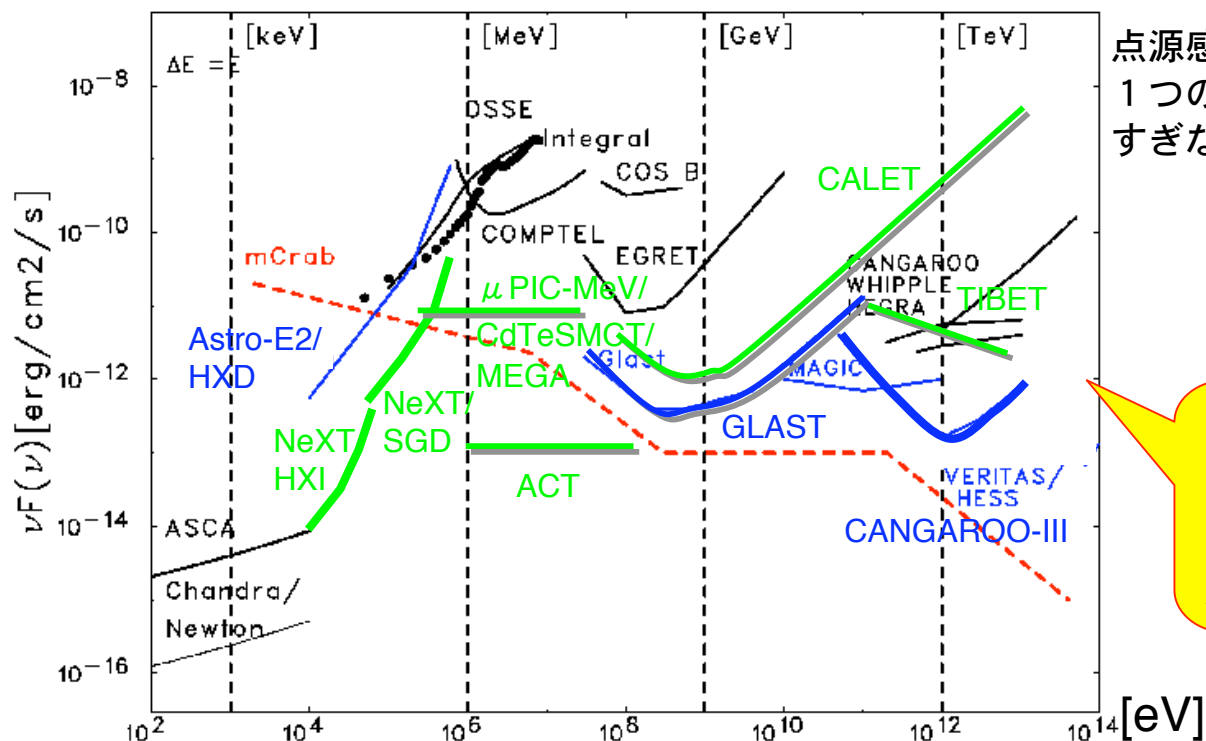
過去／現代

数年以内

5~15年

広視野

Pointing



点源感度：
1つの指標に
すぎない

注意：
Diffuse放射
への感度は
広視野が有利

- ・ フロントティアとしてのガンマ線。「新しい発見」
- ・ 宇宙の高エネルギー現象の「放射と物理メカニズムをつなぐ」ために
→ 広帯域でmCrab以上の感度が目標
- ・ 10桁を超える帯域→様々な検出原理、様々な工夫
- ・ 分野全体における日本の貢献大

未知の、宇宙の高エネルギー現象の解明+新しい世界

予備

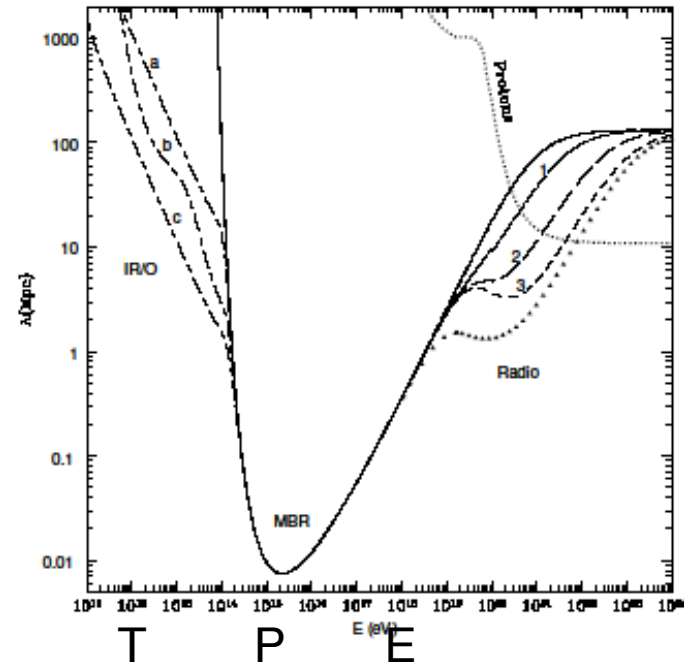
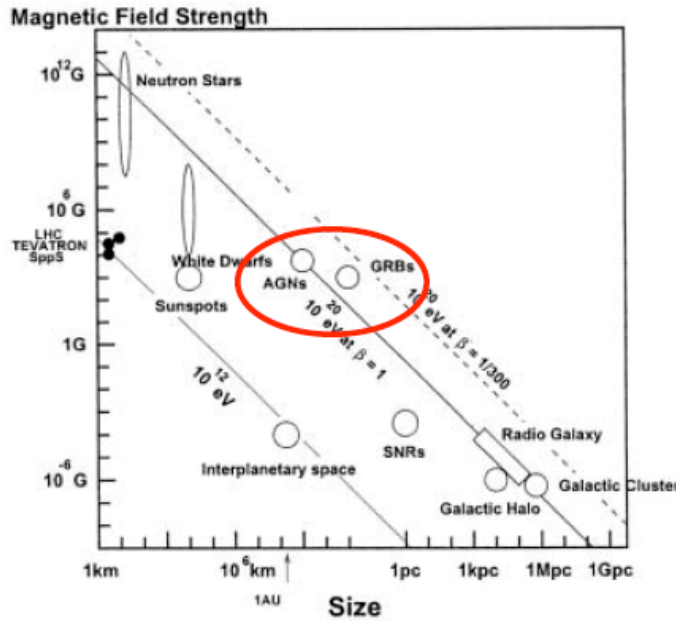


Fig. 1.4 Mean free paths of gamma-rays in the intergalactic medium at redshifts $z \ll 1$. Below 10^{14} eV γ -rays interact with infrared and optical photons, above 10^{19} eV - with low frequency radio emission. Large uncertainties in predicted mean free paths are result of poorly known fluxes of the extragalactic diffuse background radiation at these wavelengths. Between 10^{14} eV and 10^{19} eV, γ -rays interact with 2.7 K CMBR, therefore the mean free paths can be predicted with very high accuracy (from Coppi and Aharonian, 1997).