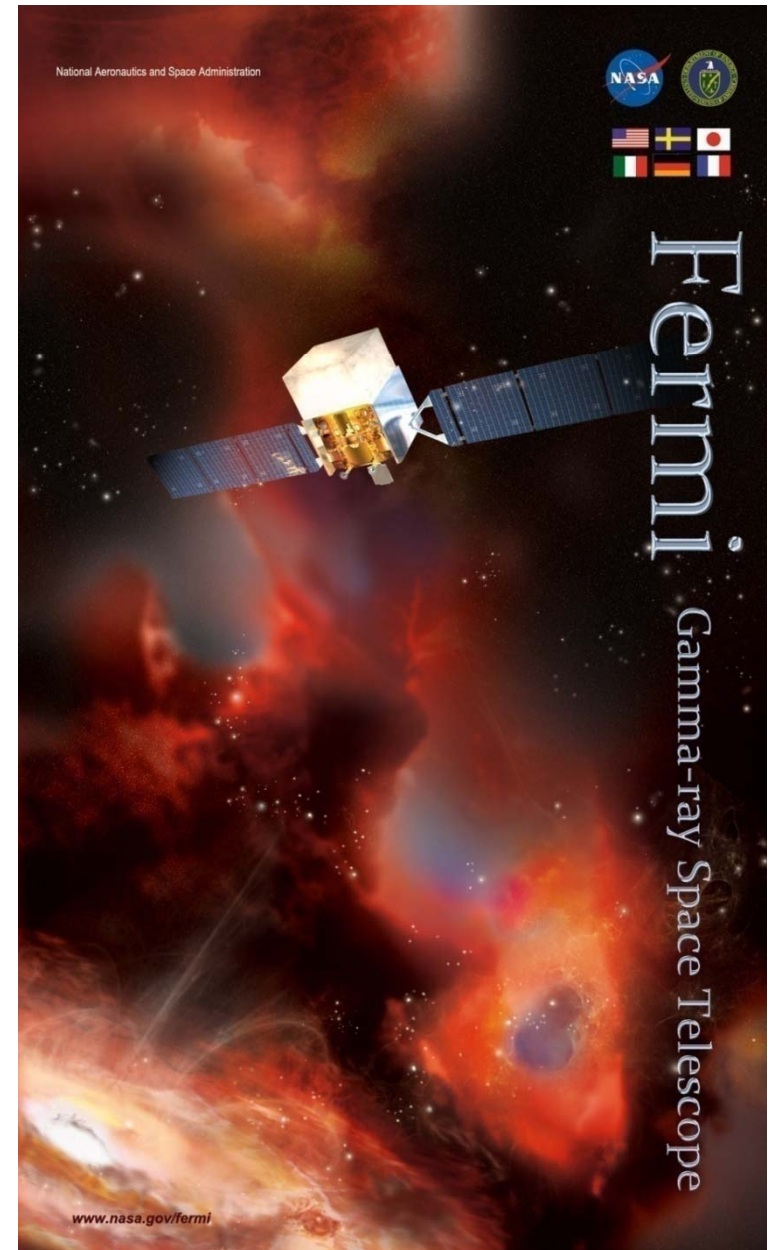


Fermiガンマ線宇宙望遠鏡で見えてきた 宇宙高エネルギー現象

深沢泰司
(広島大学大学院理学研究科)



目次

1. ガンマ線観測とフェルミ衛星について
2. 宇宙線関係の成果の概要
3. ガンマ線パルサー、パルサー星雲
4. ガンマ線連星
5. ガンマ線バースト(多分、スキップ)
6. 活動銀河核
(ブレイザー、新種ガンマ線天体、遠方天体)

フェルミ衛星の結果に関するレファレンスは、多くを占める
Abdo et al.かAckermann et al. については、省略しています。

1. ガンマ線観測とフェルミ衛星

○ガンマ線観測でわかること

ガンマ線を放射するもの

電子、陽子

非熱的粒子

熱的粒子

非平衡状態

天体の形成進化に伴う現象

重い素粒子の崩壊

核ガンマ線

宇宙の高エネルギー現象

粒子加速

超新星残骸、ジェット加速、パルサー、
ガンマ線バースト、銀河団...

地上では実現できないほど、効率の良い加速機構とは？

宇宙線の起源、伝播

星、銀河形成との関連

核ガンマ線

星や宇宙線による重元素生成

残存粒子の探査

ダークマターなど

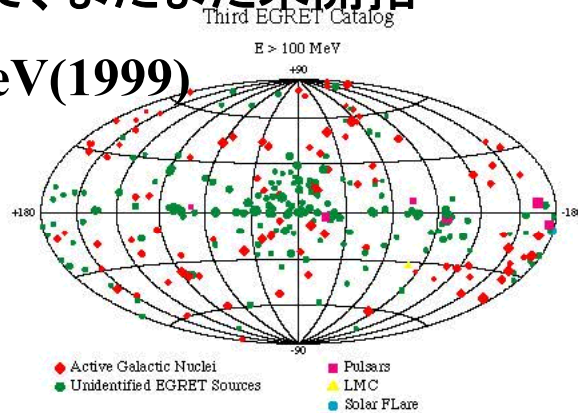
遠方宇宙のプローブ

ガンマ線の吸収を利用

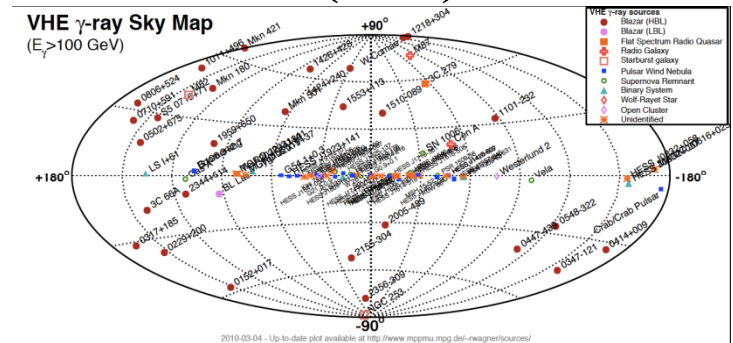
ガンマ線天体の現状

X線領域に比べて、まだまだ未開拓

EGRET/GeV(1999)
270個



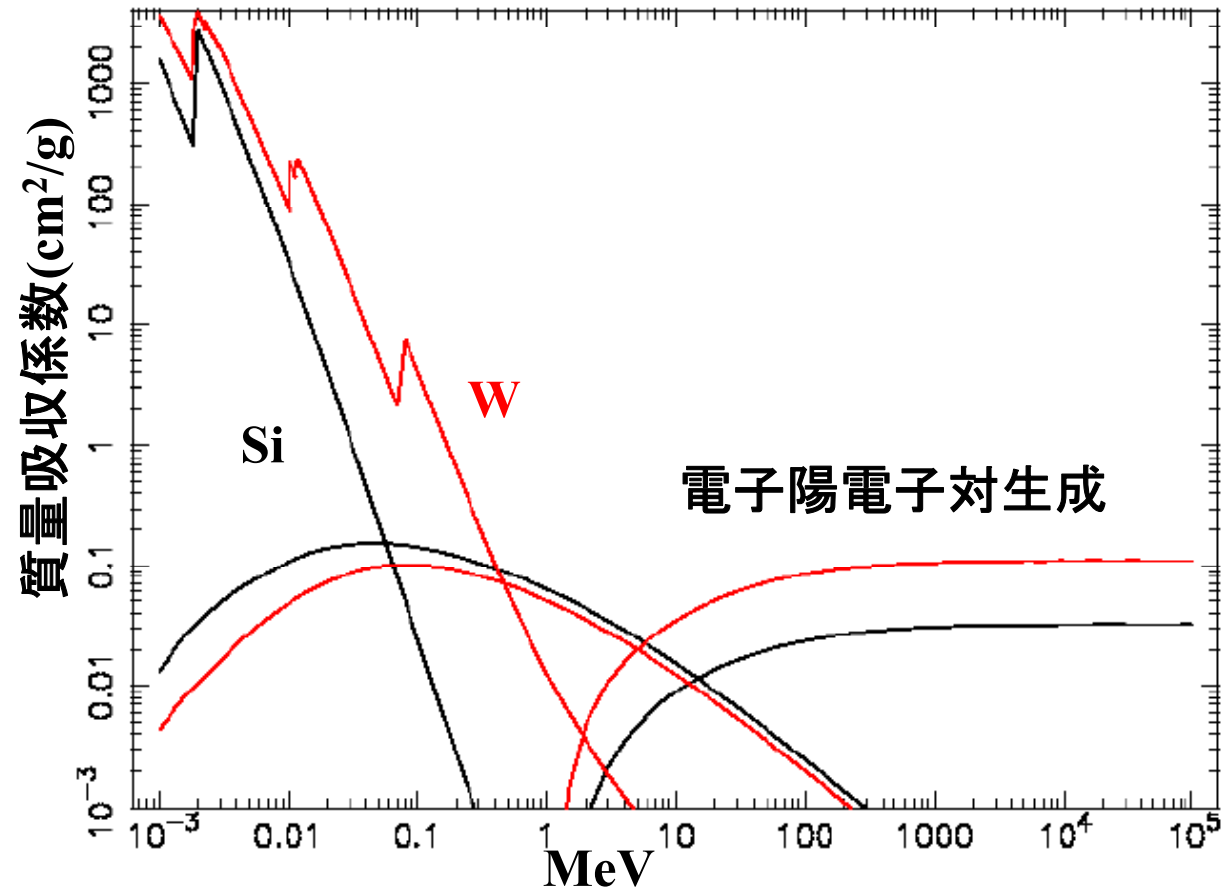
TeV(2011) 120個



検出天体の数

| | 100—1MeV | 1—30MeV | 30MeV—100GeV (EGRET) | 100GeV—100TeV (2006) |
|------|-------------------|---------|-------------------------|-------------------------|
| パルサー | 7 | 3 | 7 | 18 |
| SNR | 1-2 | 6 | 1? | 7 |
| X線連星 | 15 | 5 | 0? | 4 |
| AGN | 8 | 10 | 77 | 19 |
| 未同定 | ? | 5 | 186 | 21 |
| | { ここ10年以上、進展なし | | ↑ Fermiにより 急増中 | ↑ 現在、急増中 HESS |

ガンマ線の検出原理

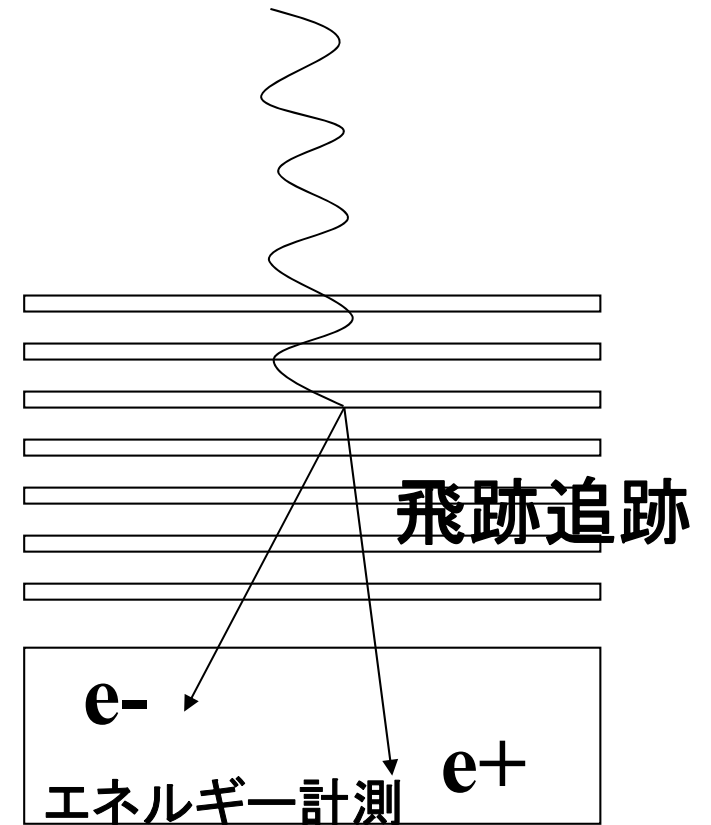
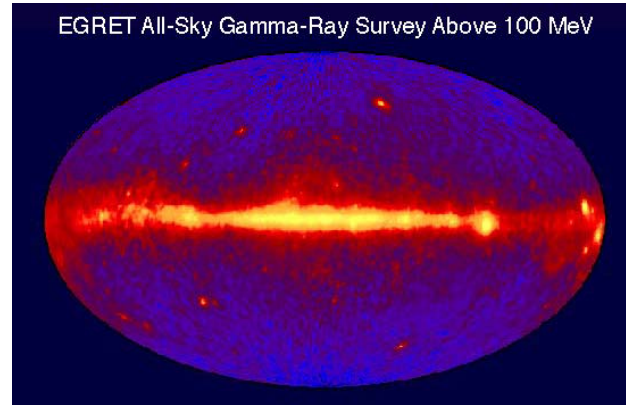


GeVガンマ線 ... コンバーター(Pb, W) + 飛跡検出器(スパークチェンバー、SSD)
+ カロリメータ(シンチレーター)

TeVガンマ線 ... 大気(コンバーター) + チェレンコフ光検出器(望遠鏡、PMT)
粒子検出器(シンチレーター)

数10MeV～数100GeV

ガンマ線の中で最も早く感度が良くなった



電子陽電子飛跡検出器

視野大きい

コンバーター(Pb, W)

電子陽電子検出器(三次元)

スパークチェンバー、シリコンストリップセンサー

カロリメータ

NaI, CsI

3つのガンマ線観測装置の比較

| | Gamma Ray Energy | Field of View (sr) | Point Spread Function | Sensitivity (erg/cm ² /sec) |
|----------------|------------------|--------------------|-----------------------|--|
| Fermi | 0.02-300 GeV | 4 | 0.04° | 1 · 10 ⁻¹² |
| Veritas / HESS | 0.2-100 TeV | 0.002 | 0.05° | 0.2 · 10 ⁻¹² |
| Milagro | 20-300 TeV | 2 | 0.7° | 2 · 10 ⁻¹² |

GeV, TeVシャワー検出
TeVチェレンコフ検出

視野大きい
視野狭い

空間分解能悪い
空間分解能良い

Fermi



HESS



Milagro



フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 (フェルミ衛星)

- Launch from Cape Canaveral Air Station 11 June 2008 at 12:05PM EDT
- Circular orbit, 565 km altitude (96 min period), 25.6 deg inclination.

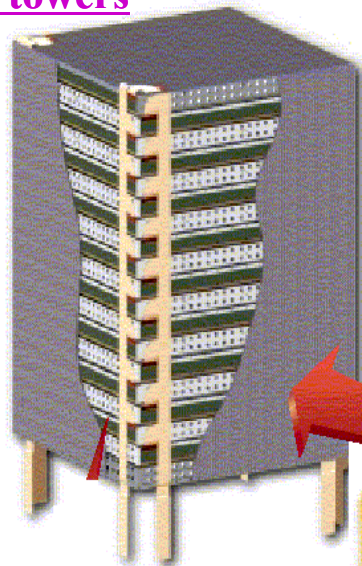


Prior to Fairing Installation



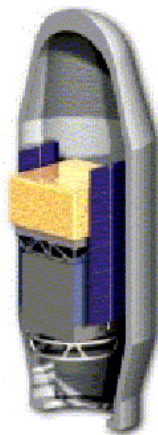
フェルミ衛星LATの構成

4x4 array of identical towers



Si (HPK) Tracker
(TKR)

ガンマ線の到来方向
を決定
低エネルギーガンマ線
のエネルギー計測



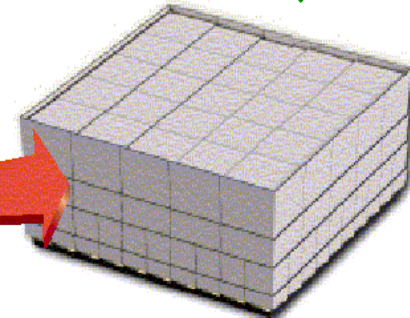
Delta II
7920 H

Large Area Telescope (LAT)

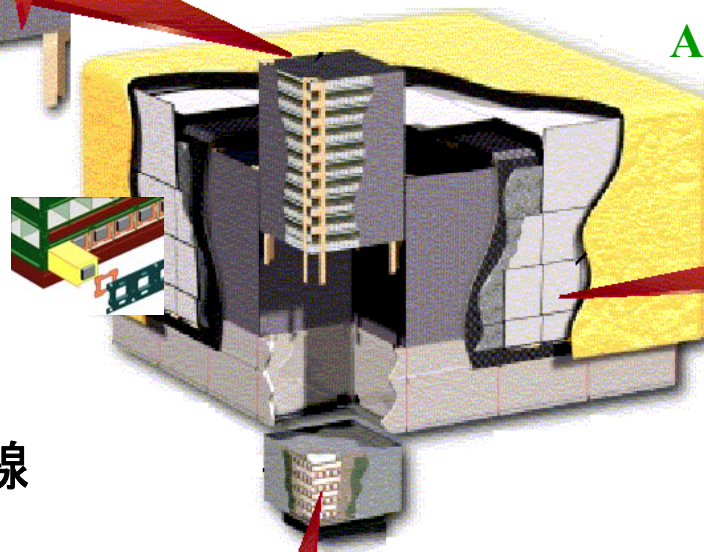
2560 kg, 600 W, $1.73^2 \times 1.06$ m

粒子バックグラウンド除去

Anti-Coincidence Detector (ACD)



Plastic-Scinti
+ PMT(HPK)



CsI-Array Calorimeter (CAL)

ガンマ線のエネルギー計測



CsIシンチレータをフォトダイオード(HPK)で
両側から読んで1次元情報取得

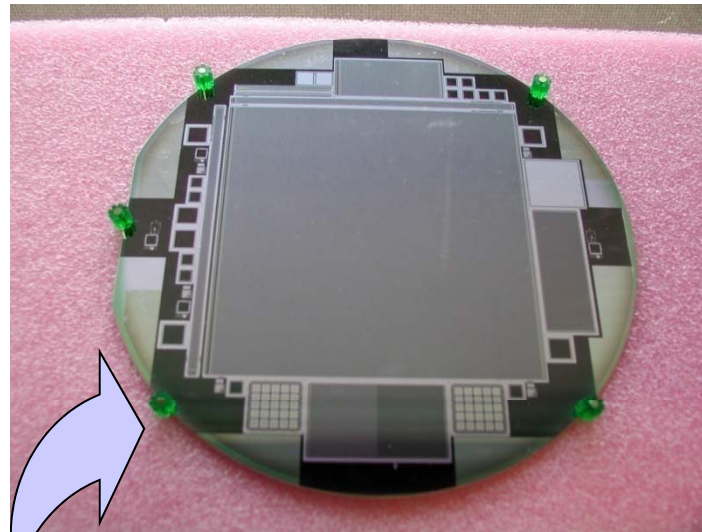
Tracker

広島大学と浜松ホトニクス
が開発

16 identical towers



36 layers



4×4 array of Si-
strip sensors
(X)

Bias Circuit

C-fiber face shee

Hex cell core

Al closeout

C-fiber face sheet

Converter

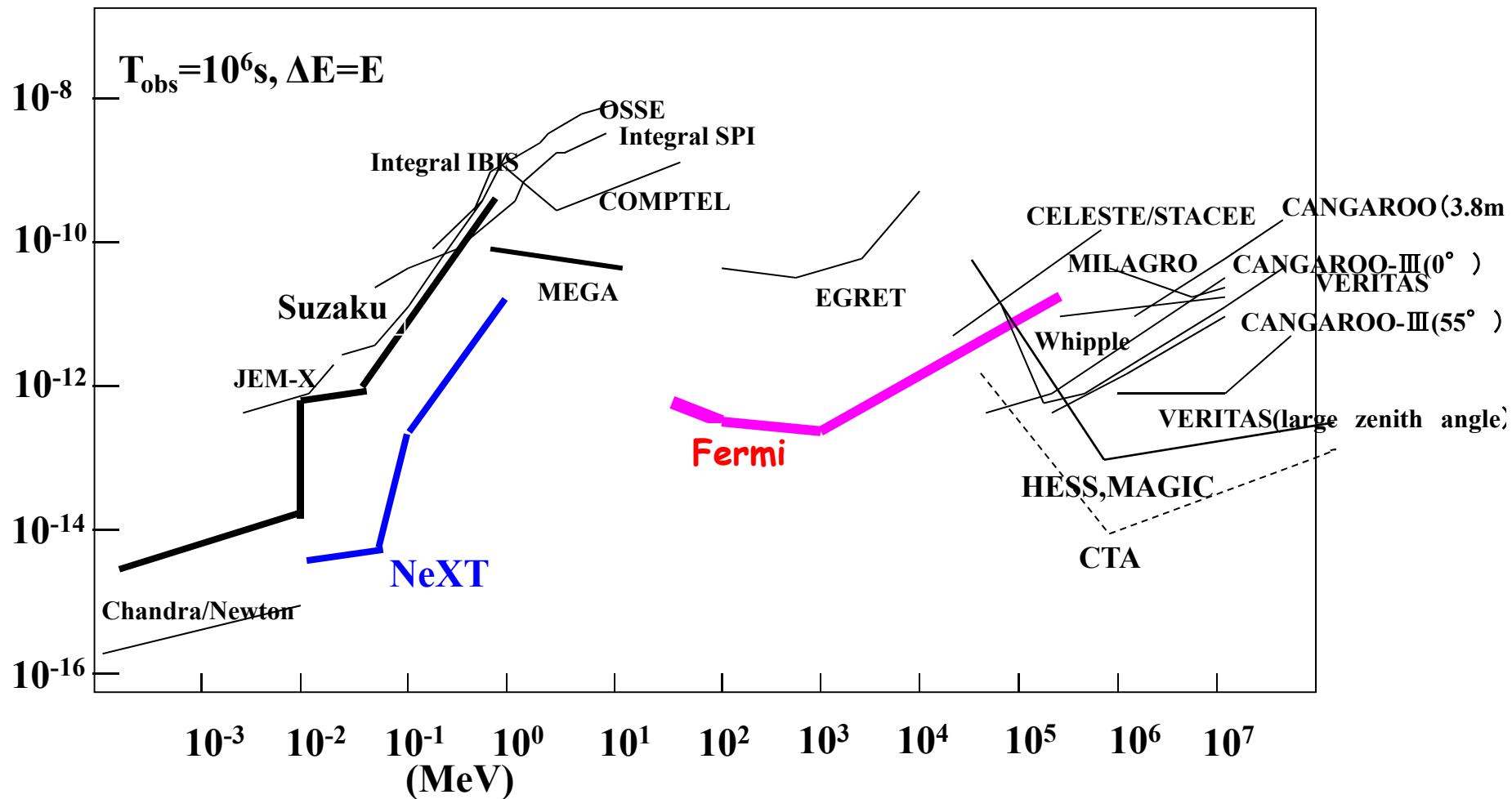
4×4 array of Si-
strip sensors
(Y)

Readout
Circuit

15cm

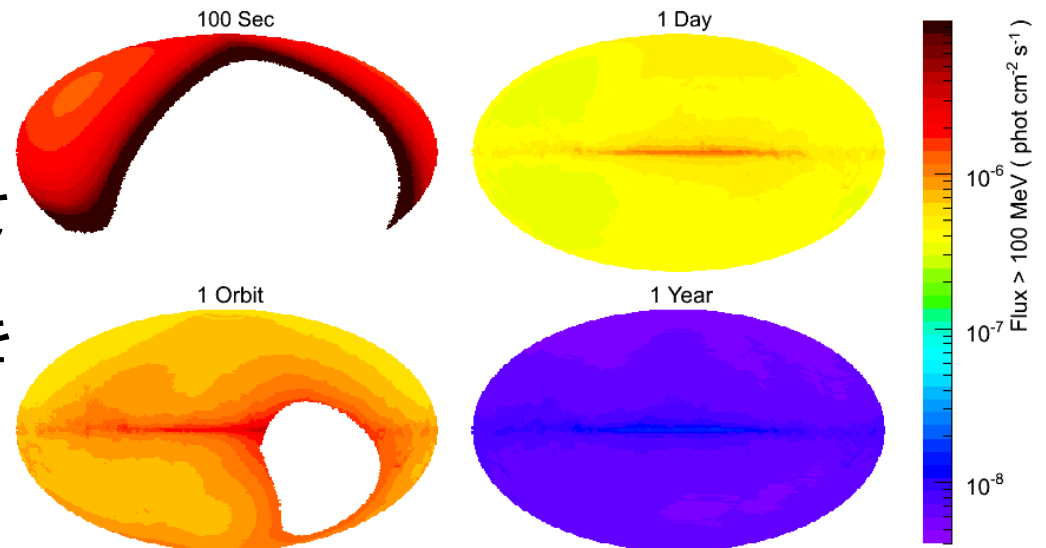
感度 (SED上)

(erg/s/cm^2)



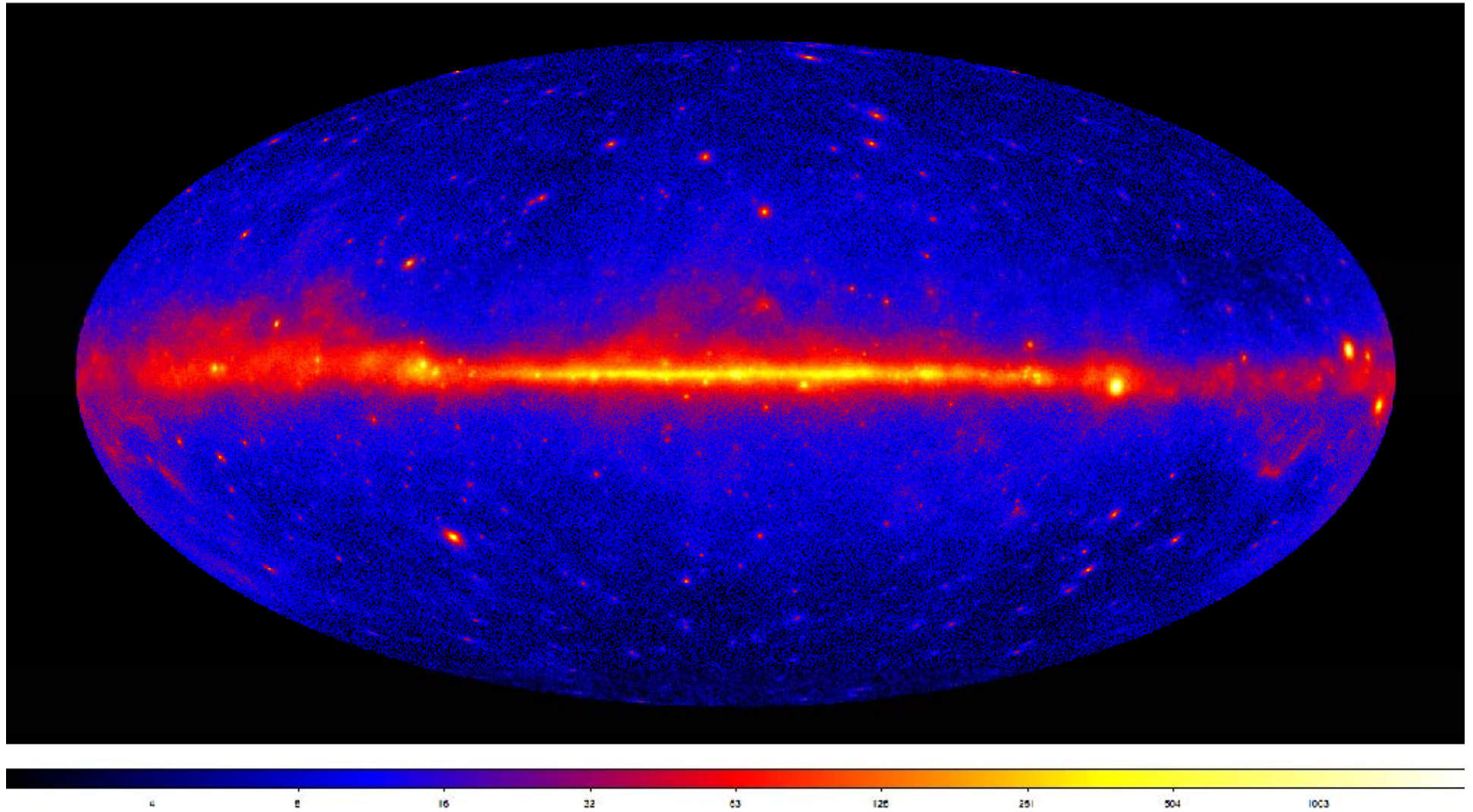
観測オペレーション

- 基本的に全天サーベイモード
 - 2 orbits (3 hours)ごとに全天を掃く。全天の各天体は2 orbitごとに30分ずつ視野に入る
 - 数時間で中継衛星などを通してデータが地上へ
 - 数日で前衛星EGRETの感度を達成

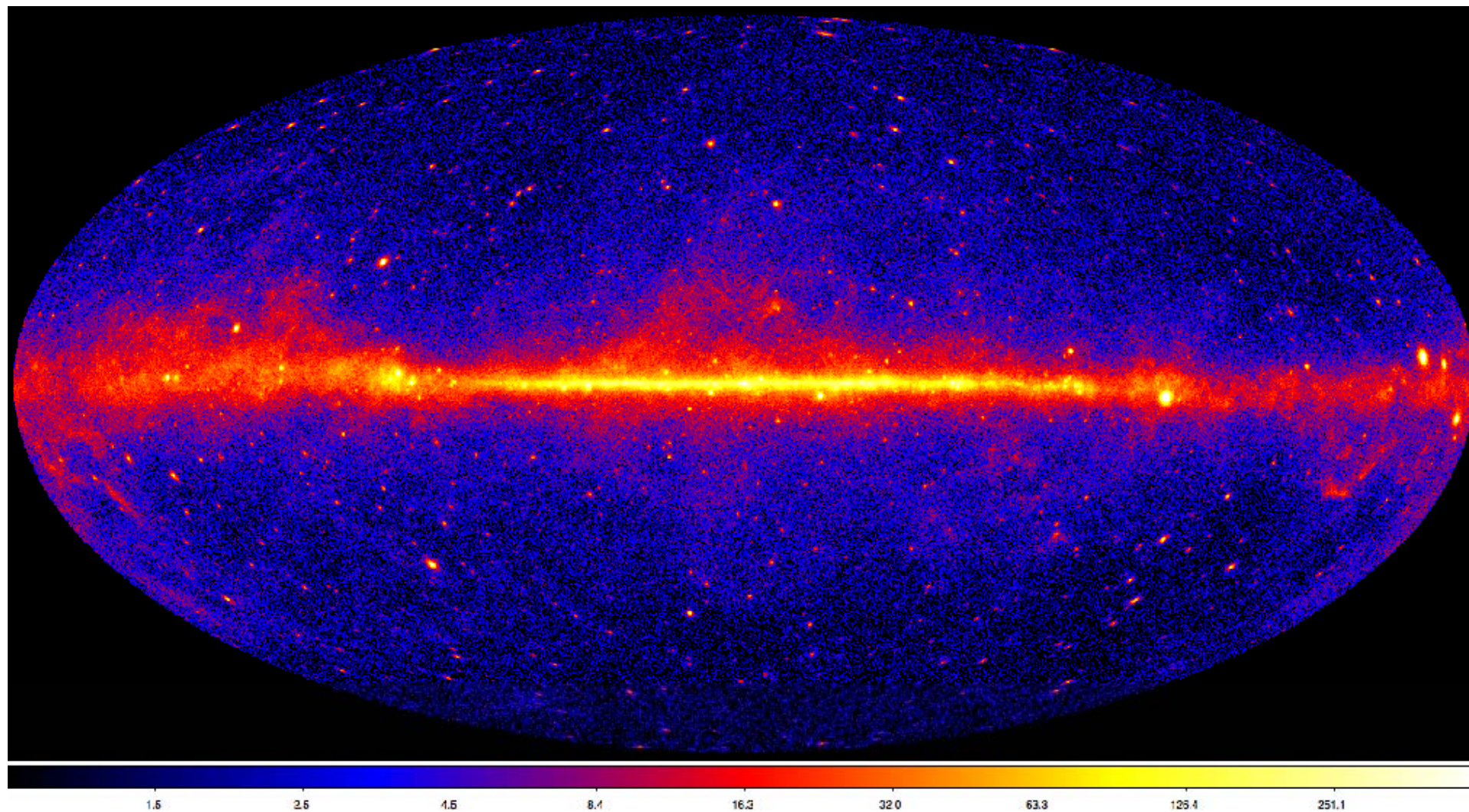


- 何か重要な天体現象が起きた時は、その天体を視野中心に向けて固定して観測
(これまで1回 blazar 3C454.3フレア)
- 明るいガンマ線バーストが起きたときは、自動的に視野を向ける
(これまで数回)

2year map >100MeV Front only



2year map >1GeV Front+Bak



Fermi Large Area Telescope 2FGL catalog

○ AGN ⊗ AGN-Blazar

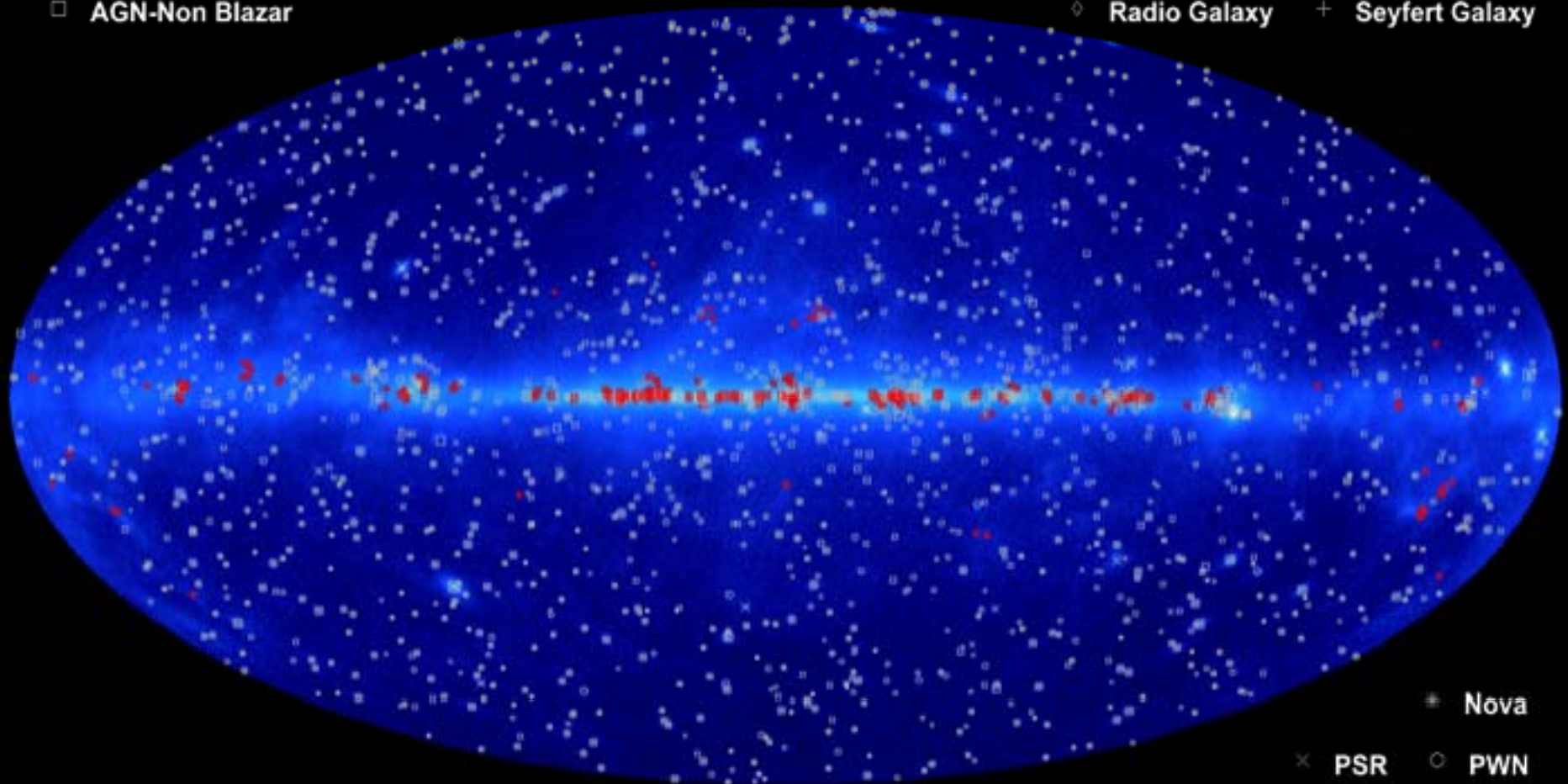
□ AGN-Non Blazar

× Galaxy

* Starburst Galaxy

◇ Radio Galaxy

+ Seyfert Galaxy



○ Unassociated

□ Possible Association with SNR and PWN

⊗ Possible confusion with Galactic diffuse emission

* Nova

× PSR

○ PWN

⊗ PSR w/PWN

□ SNR

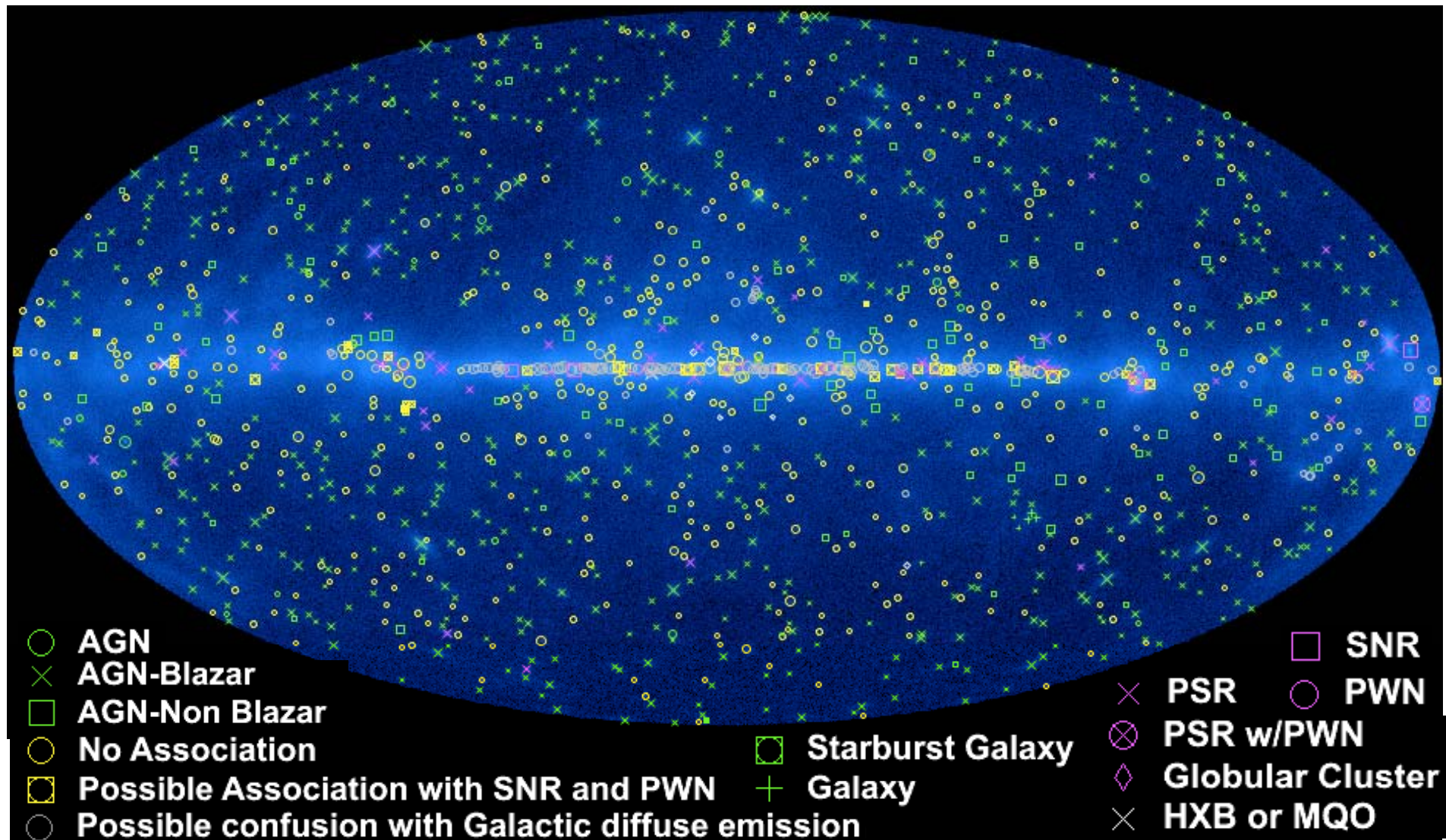
◇ Globular Cluster

+ HMB

Credit: Fermi Large Area Telescope Collaboration

The Fermi LAT 2FGL Source Catalog

フェルミ衛星2年間のサーベイで検出された天体



1873sources (4.1σ significance threshold); symbol size encodes >1 GeV flux



Classifications



| CLASS | Identified | Associated |
|--|------------|-------------|
| Pulsar, identified by pulsations | 83 | - |
| Pulsar, no pulsations seen in LAT yet | - | 25 |
| Pulsar wind nebula | 3 | 0 |
| Supernova remnant | 6 | 4 |
| Supernova remnant / Pulsar wind nebula | - | 58 |
| Globular cluster | 0 | 11 |
| High-mass binary | 4 | 0 |
| Nova | 1 | 0 |
| BL Lac type of blazar | 7 | 428 |
| FSRQ type of blazar | 17 | 353 |
| Non-blazar active galaxy | 1 | 10 |
| Radio galaxy | 2 | 10 |
| Seyfert galaxy | 1 | 5 |
| Active galaxy of uncertain type | 0 | 257 |
| Normal galaxy (or part) | 2 | 4 |
| Starburst galaxy | 0 | 4 |
| Class uncertain | - | 1 |
| Unassociated | - | 576 |
| Total | 127 | 1746 |

Abdo+11

最近は、太陽フレアも検出

フェルミ衛星の全ガンマ線イベントデータは、即時公開されていますので、解析したい人は、すぐに解析できます。

日本フェルミチーム(解析ソフトも含めた各種リンクもあり)

<http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/glast/glast-j.html>

フェルミ衛星公開データ

<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/>

ガンマ線の放射メカニズムについて

基本的に、100MeV以上の高エネルギーに加速された粒子からの放射
(非熱的放射)

制動放射 (Bremsstrahlung)

主に、高エネルギー電子と(星間物質などの)陽子の電磁相互作用

逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering)

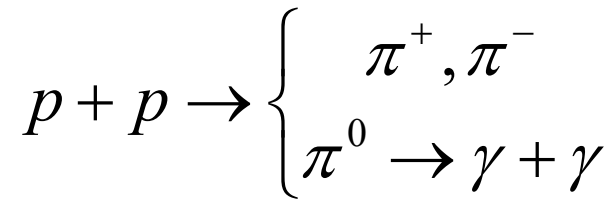
低エネルギー光子を高エネルギー電子が散乱して、光子がガンマ線になる。
(CMB, 星の可視光、ダストの赤外線、ジェット中の赤外可視など)

$$\frac{P_{\text{synch}}}{P_{\text{compt}}} = \frac{U_e}{U_{ph}}$$

シンクロトロン放射の情報とともに、電子や磁場の密度を制限できる

陽子と原子核の衝突 π^0 崩壊

高エネルギー陽子と星間物質



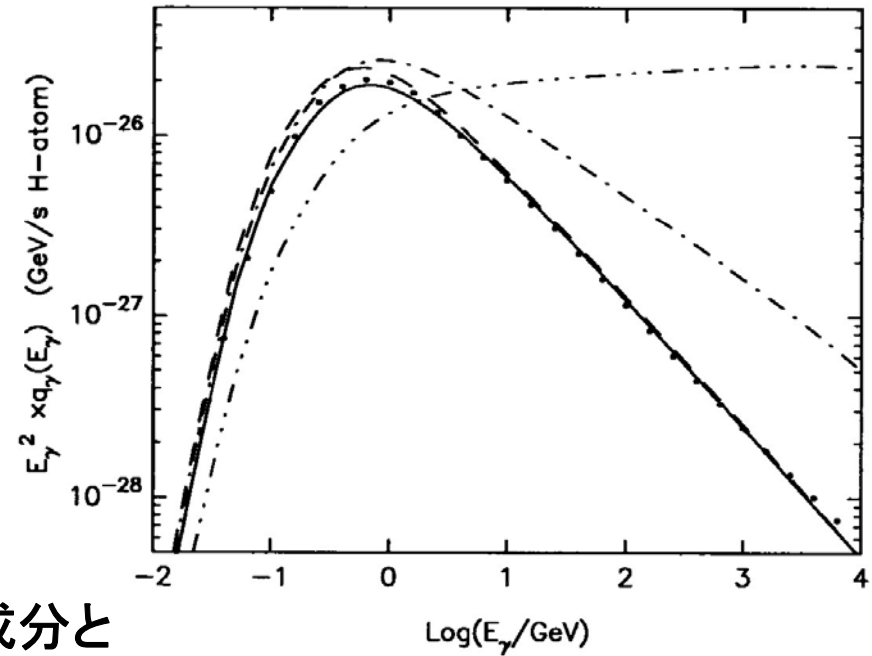
π^0 の質量=136MeV

70MeV前後に放射

宇宙線の持っていた運動

エネルギーのため、ほぼ連続成分となる

高エネルギー陽子を観測できる重要な手段

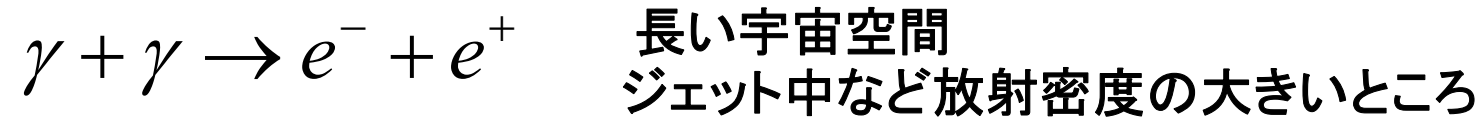


重い粒子の対消滅、重い粒子の崩壊

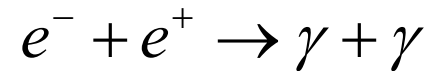
ダークマター候補の粒子、宇宙残存粒子など

ガンマ線ライン、連続成分

低エネルギー光子の衝突によるガンマ線の吸収



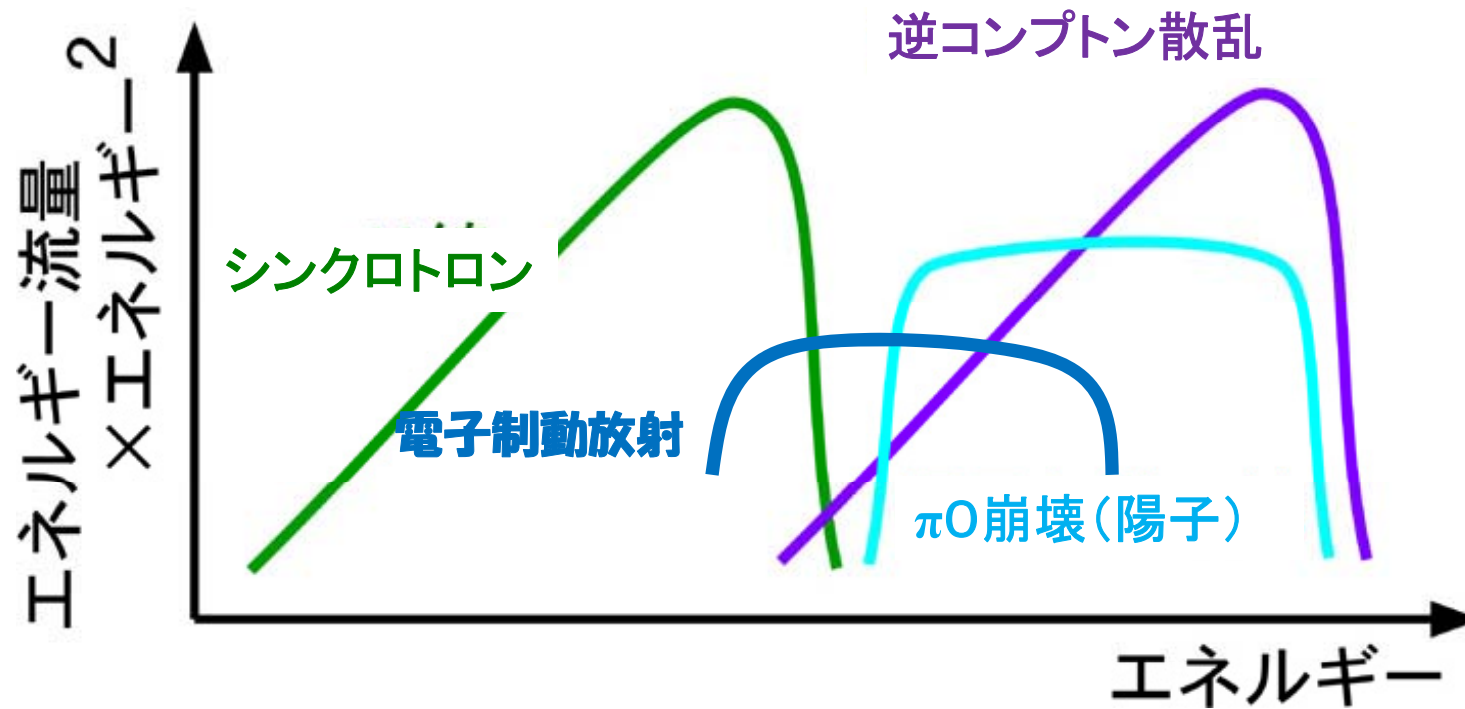
電子陽電子対消滅の逆過程



反応が起きる条件

$$E_{\gamma} h\nu(1 - \cos\theta) \sim 2(m_e c^2)^2 = 0.52(\text{MeV})^2$$

高エネルギー天体からの典型的な放射

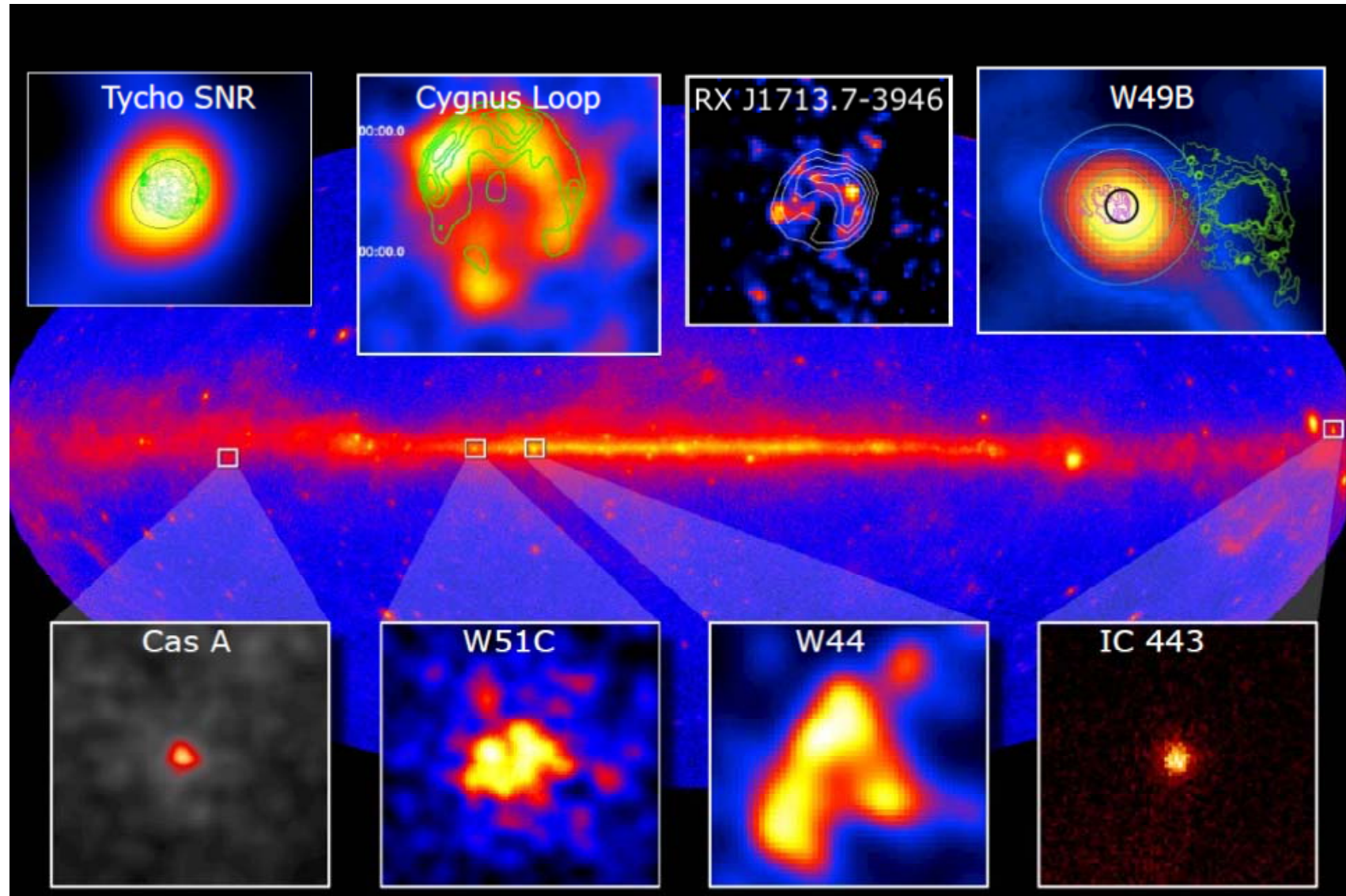


天体の状態(粒子密度、磁場密度、光子密度)によって、
各成分の強度比は変わる

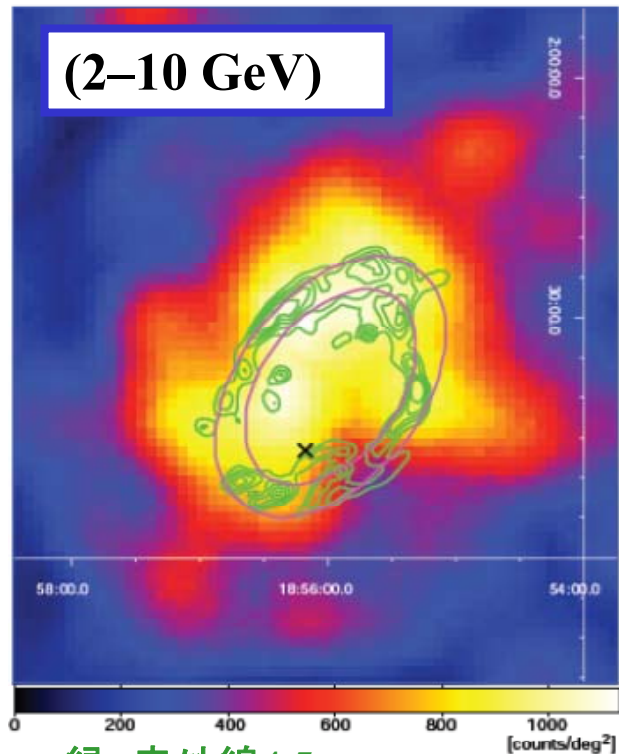
2. 宇宙線関係の成果の概要

超新星残骸、宇宙線直接観測、銀河宇宙線、スターバースト銀河
銀河団、ダークマター

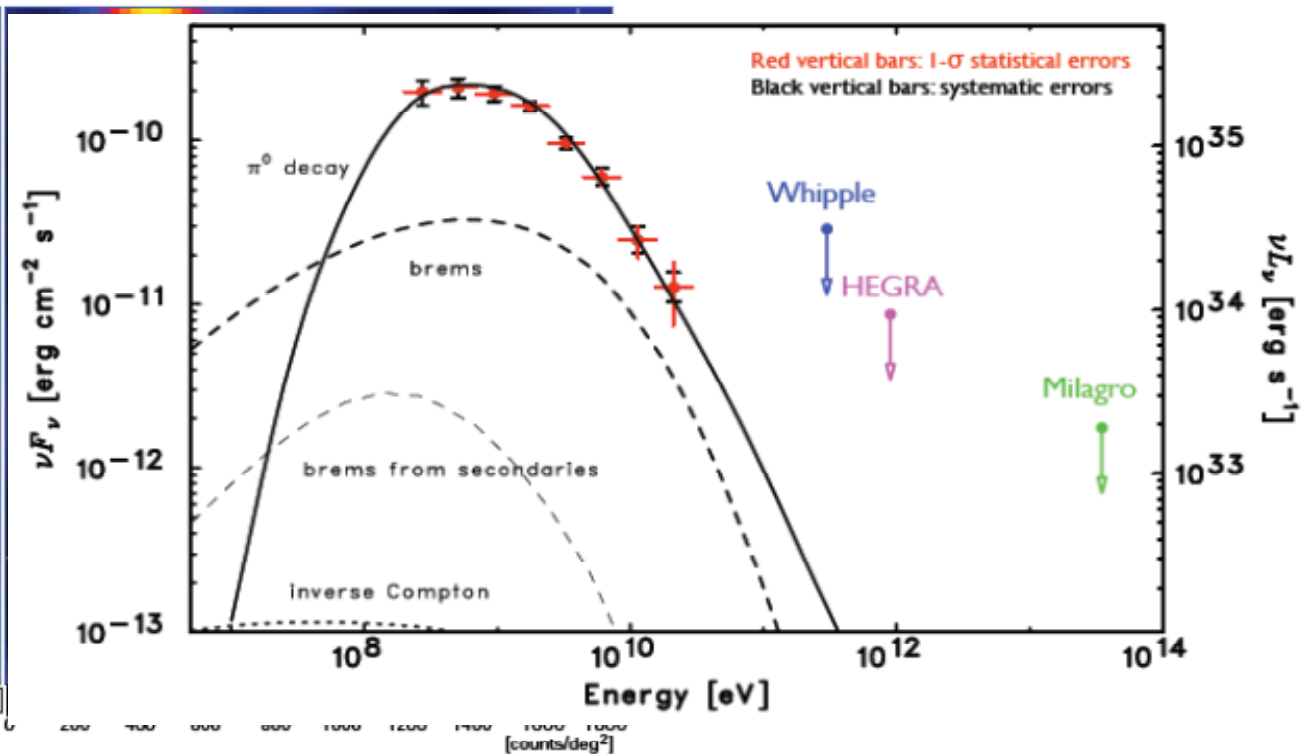
フェルミで多数の超新星残骸(SNR)が検出されてきた。



W44 (年齢 2×10^4 年): 宇宙線陽子の証拠



緑: 赤外線 $4.5 \mu\text{m}$



陽子と分子雲との相互作用による π^0 崩壊がもっともらしい

分子雲 $n=100\text{cm}^{-3}$, $W_p=6 \times 10^{49}\text{erg}$, $W_e=1 \times 10^{48}\text{erg}$ (宇宙線の陽子電子の比に近い)

電子による制動放射の場合: 電波のスペクトルを再現しにくい。

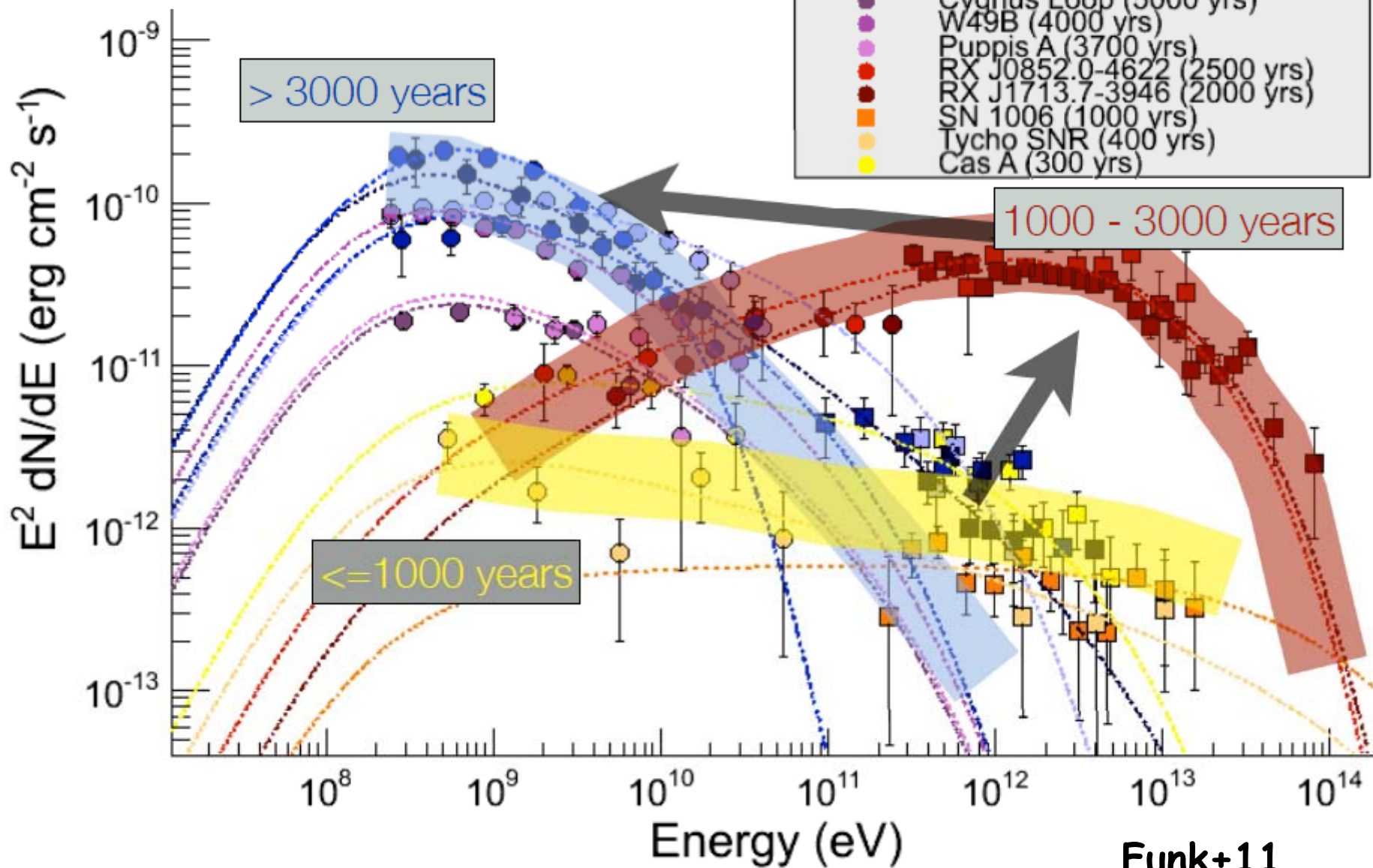
逆コンプトン散乱の場合: 電子の総エネルギーが大きすぎる ($\sim 10^{51}\text{ergs}$)

SNR爆風の全エネルギーになってしまい、陽子の運動エネルギーがなくなる
陽子の場合、カットオフエネルギーが結構低い(10GeV以上の陽子がいない)?

W51, IC443も同じ結果

SNRの年齢ごとのガンマ線スペクトル

SNRの進化とともに
衝撃波加速の変化、分子雲との相互作用



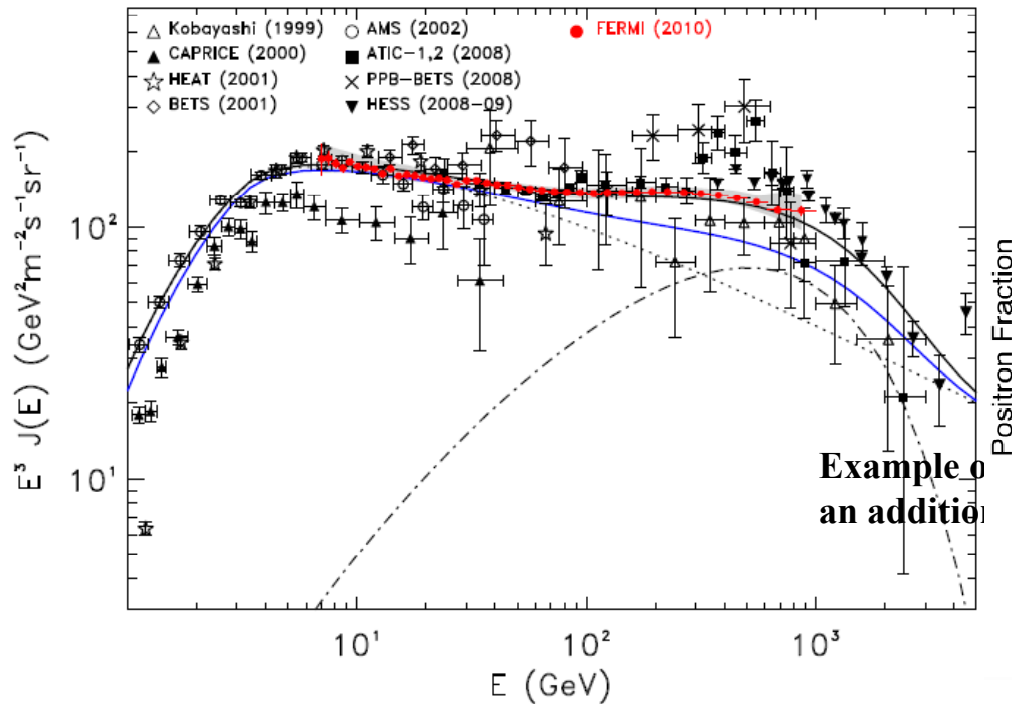
宇宙線の電子・陽電子の直接測定

宇宙線電子陽電子も測定できる(電荷は地球磁場を利用して区別)。
電子陽電子に対して非常に巨大な検出器 → 統計の良い測定ができる。

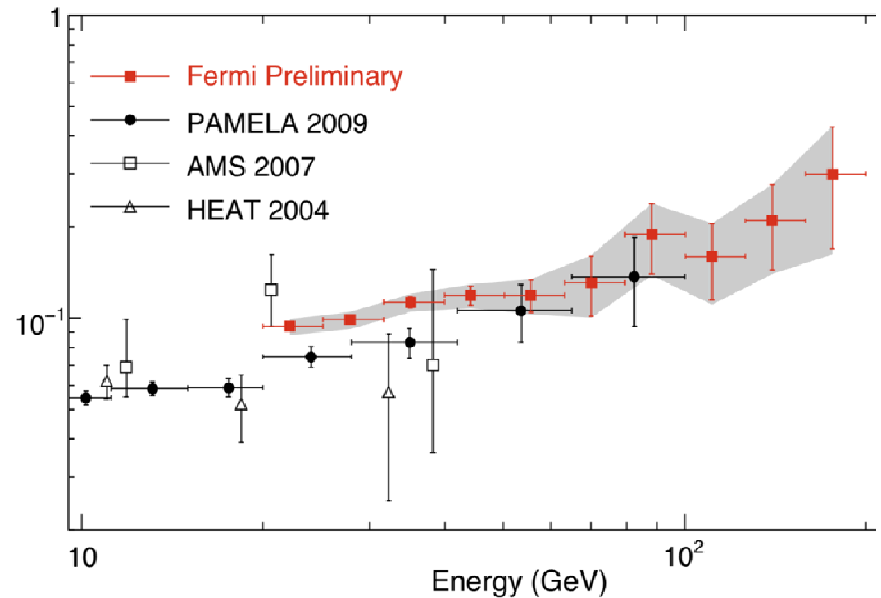
ラインのような構造を強く否定。ただし、1TeV付近でpowerlawから超過した成分がある。 → 地球近傍の加速源を示唆。

Powerlaw成分もソフト→ソフトなinjection?

電子陽電子のスペクトル

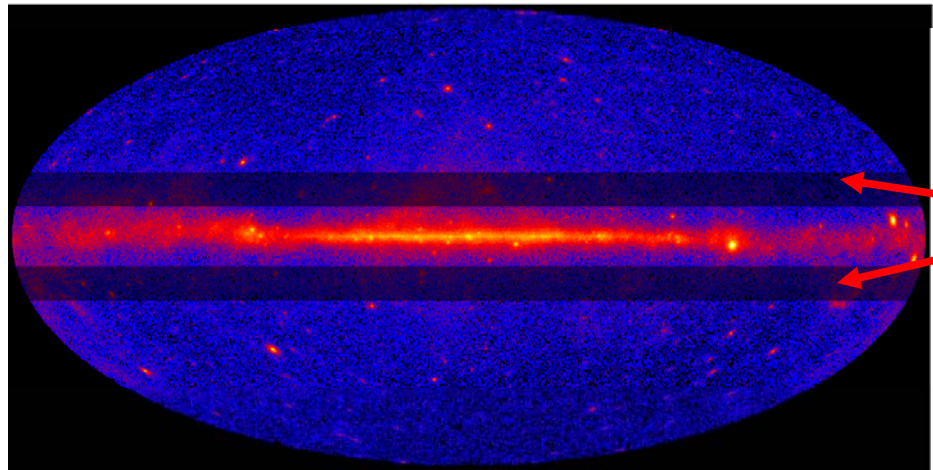


陽電子の割合

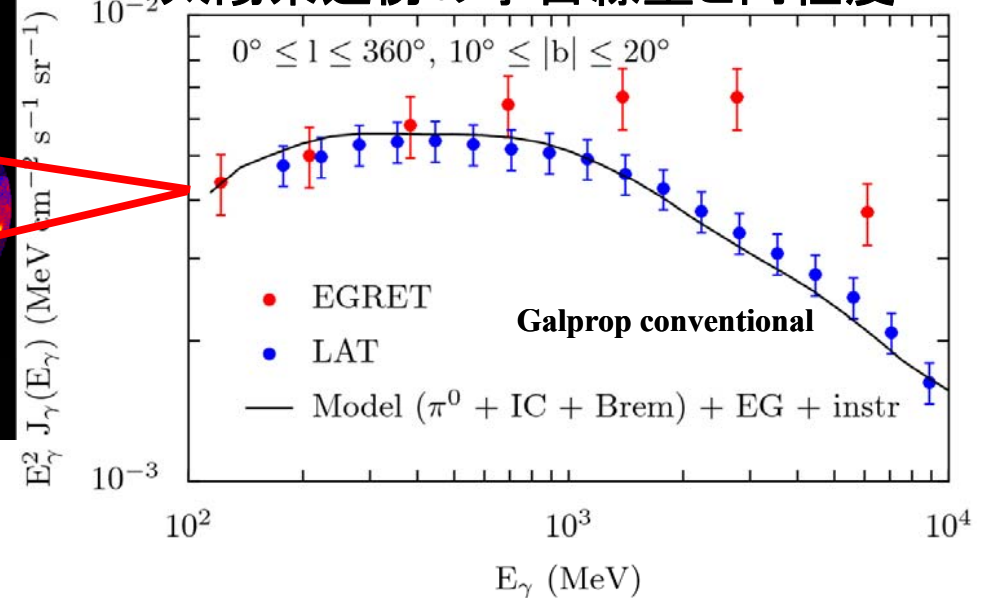


銀河面からのガンマ線放射

宇宙線と星間物質との相互作用



銀河面は、平均的には
太陽系近傍の宇宙線量と同程度



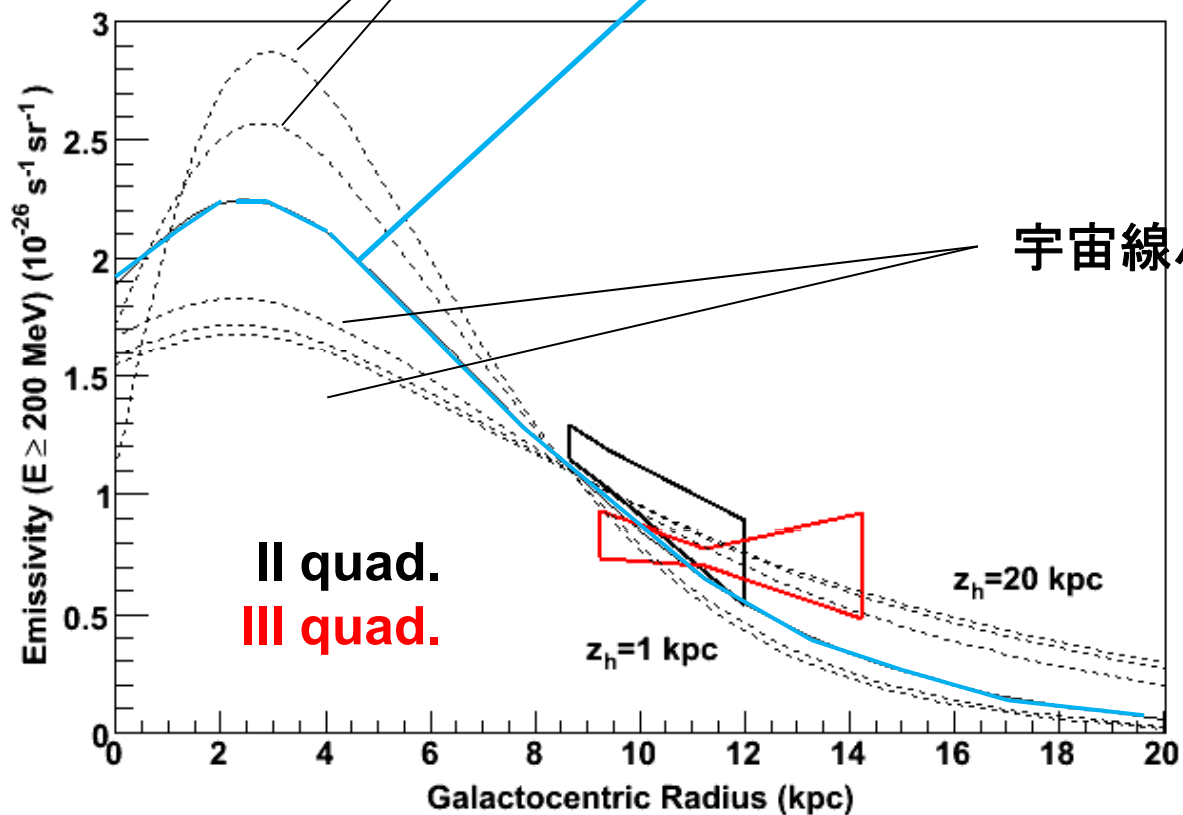
星間物質の情報を用いて、ガンマ線放射の強度と分布から
宇宙線の量と分布をプローブできる。

予想よりも宇宙線は銀河系外側で多い

宇宙線ハローサイズ1,2kpc

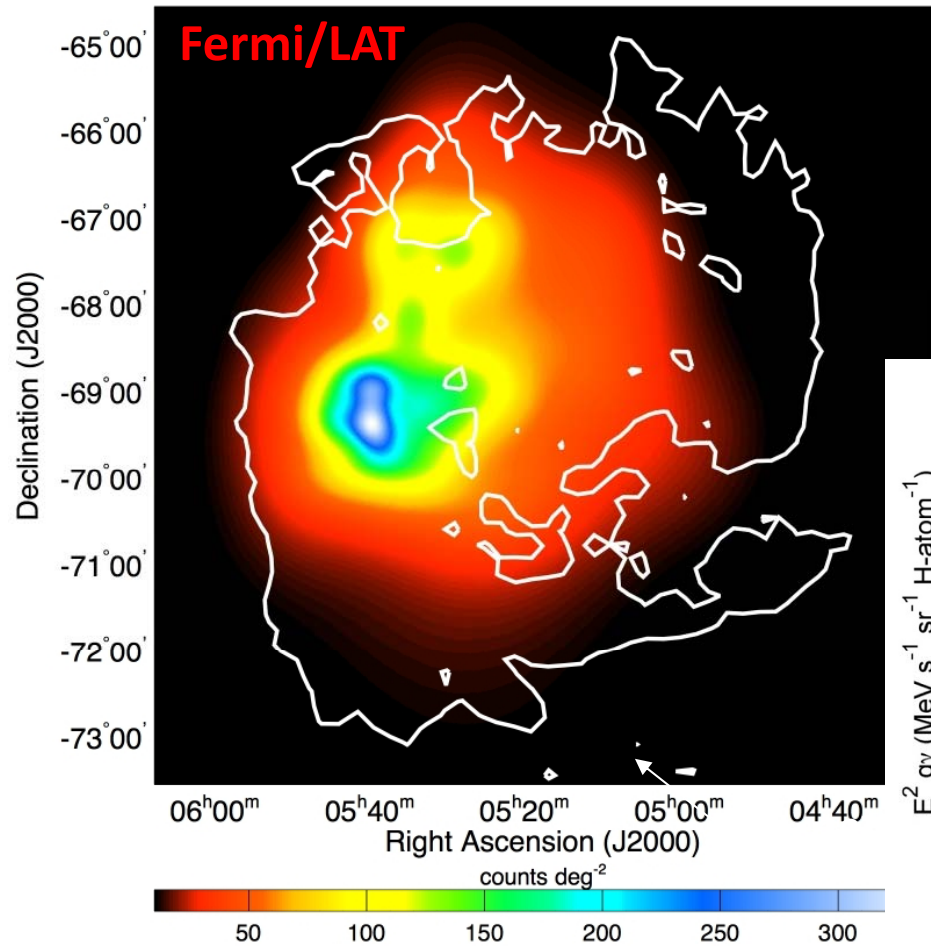
GalPROPで仮定している宇宙線分布
宇宙線ハローサイズ4kpc

宇宙線ハローサイズ10,15,20kpc



近傍銀河の宇宙線

LMCをガンマ線で分解

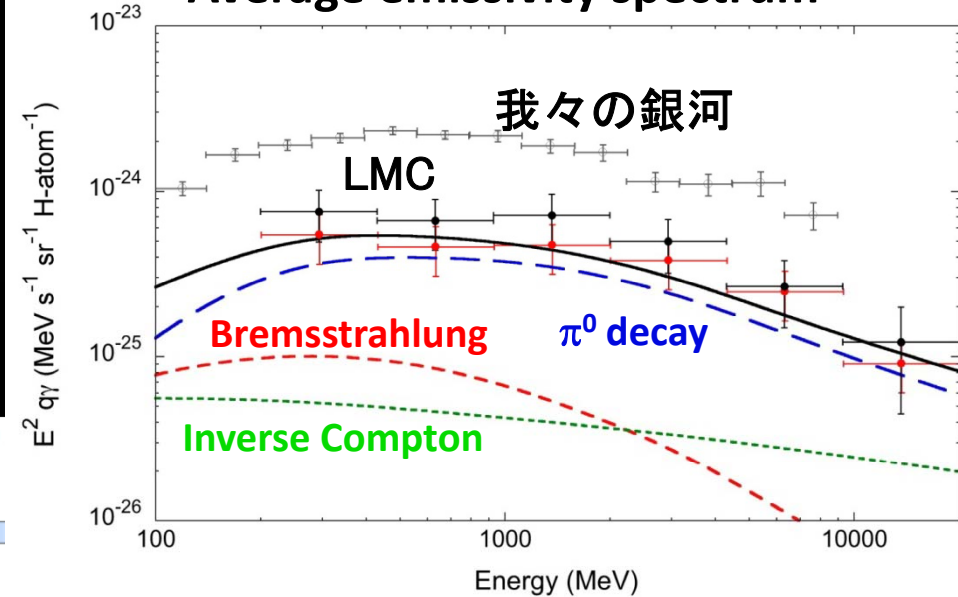


LMC中の宇宙線の密度は？

銀河系の0.2-0.3倍程度

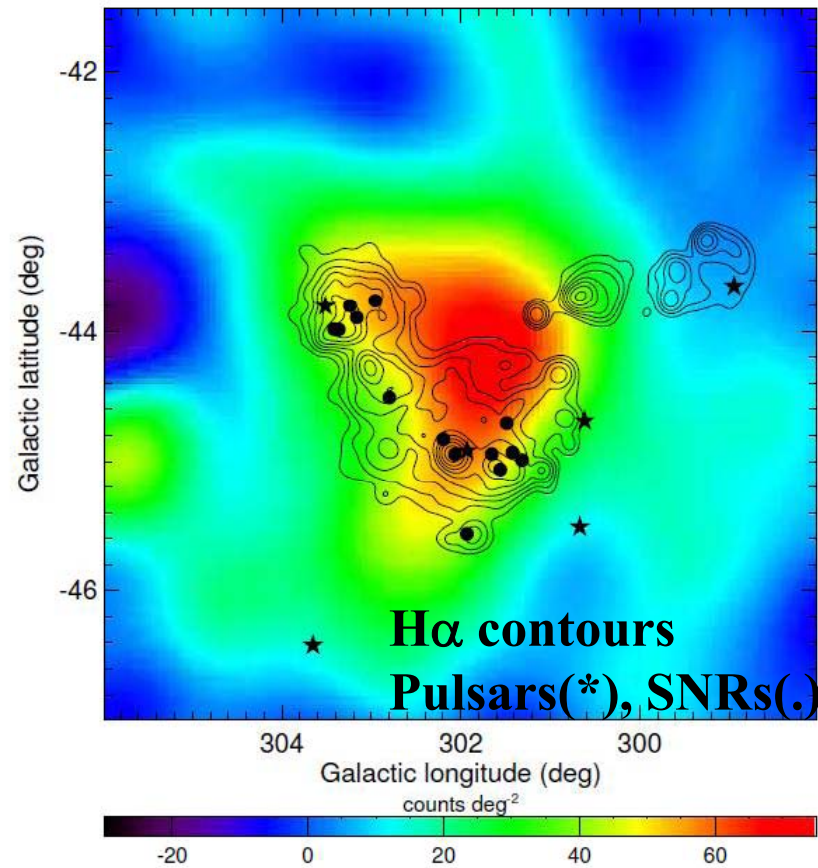
我々の銀河とLMCの星生成率の違いで説明できる(宇宙線の逃げ出しは、あまりない)

Average emissivity spectrum

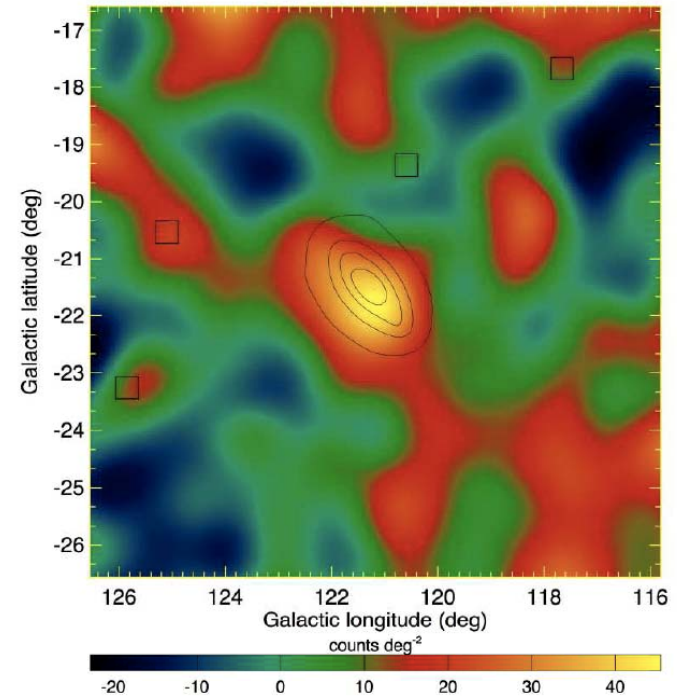


SMC, M31を初めてのガンマ線で検出

SMC: 銀河系の15%以下

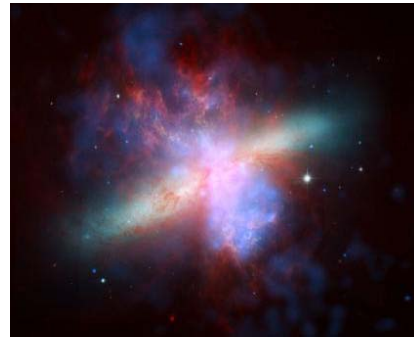


M31: 銀河系の35%程度

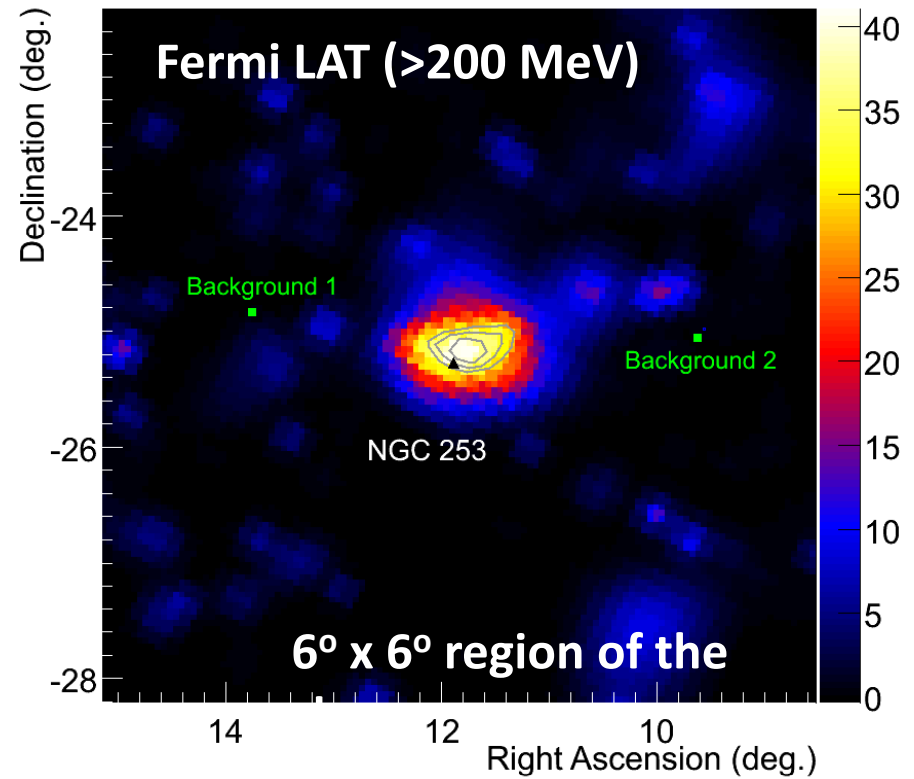
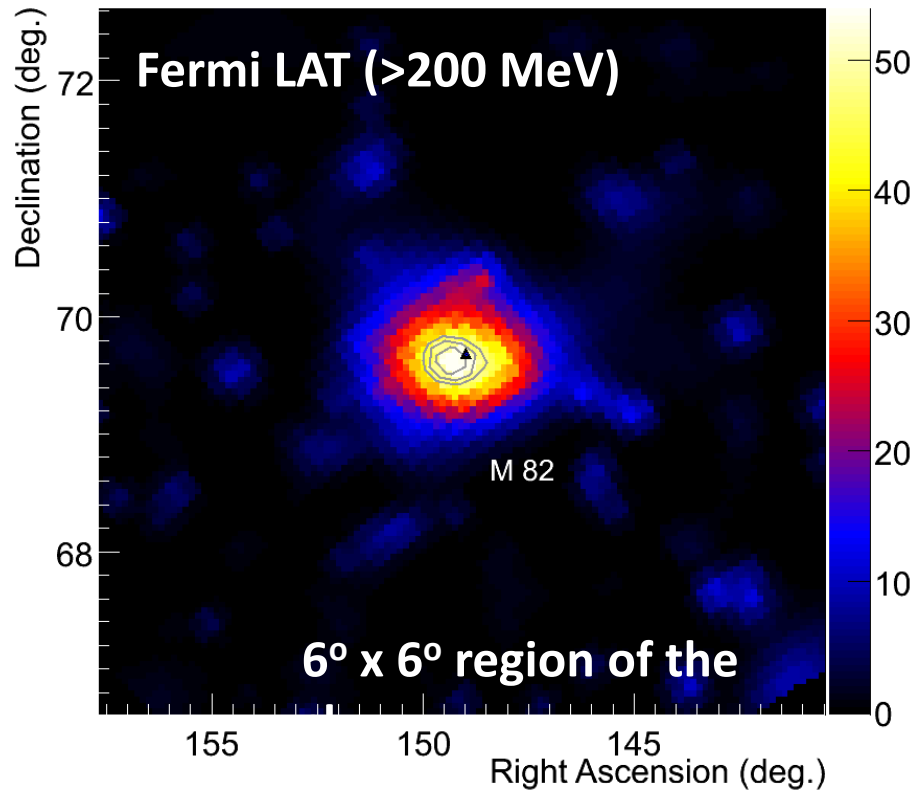
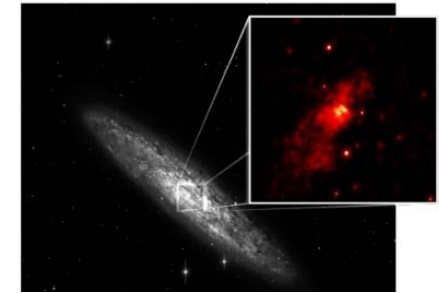


近傍のスターバースト銀河からも初めてGeVガンマ線検出

M82



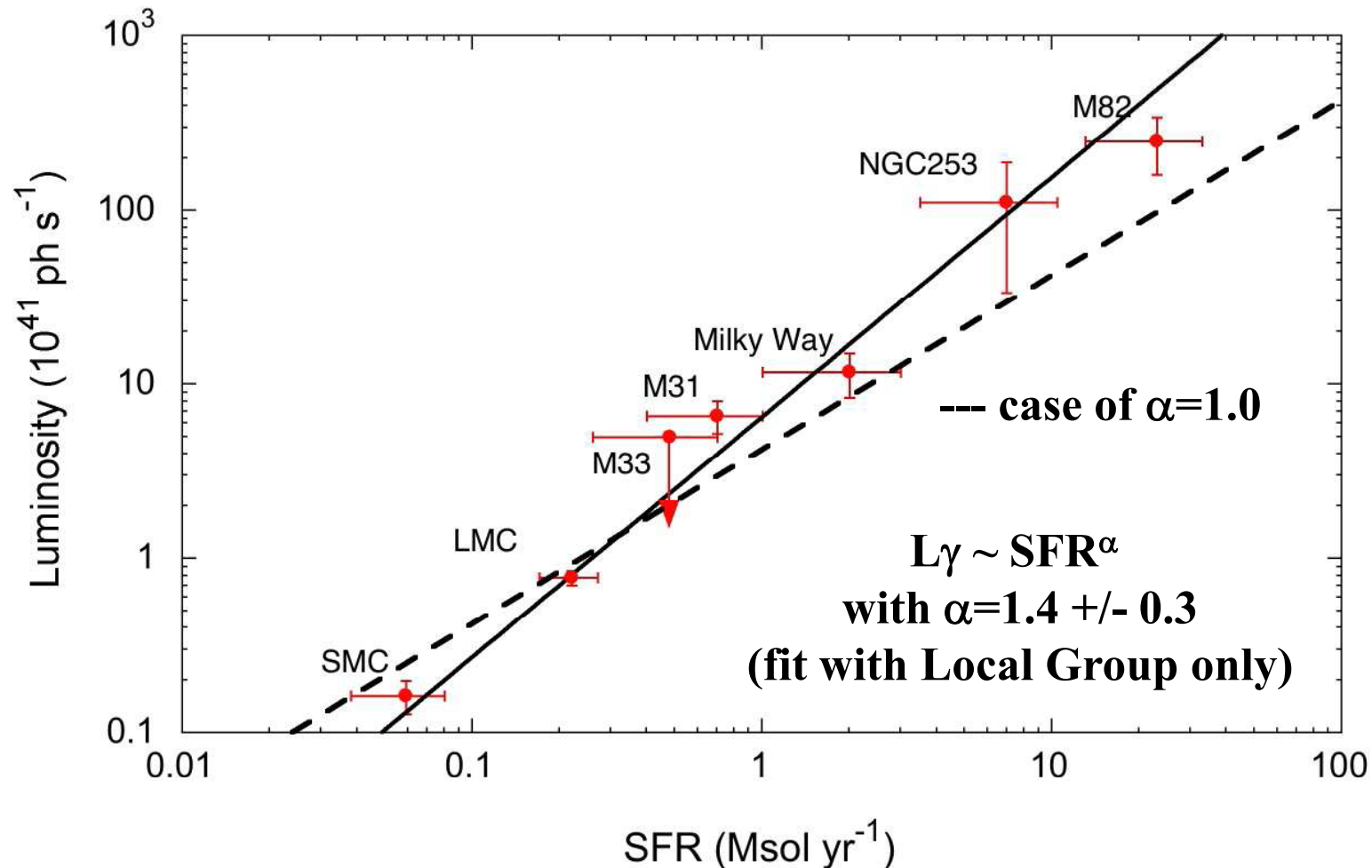
NGC253



フェルミ衛星の発見の直前に、TeVガンマ線でも両銀河とも検出

星生成率とガンマ線光度の相関

星生成によって宇宙線が生成されて明るくガンマ線で輝く描像と一致。ただし、おおまかな相関が見つかったばかりで、パルサーの寄与や閉じ込め効率などの議論は今後。





銀河中心

明るい、天体や宇宙線からのガンマ線混入が大きいので、難しい

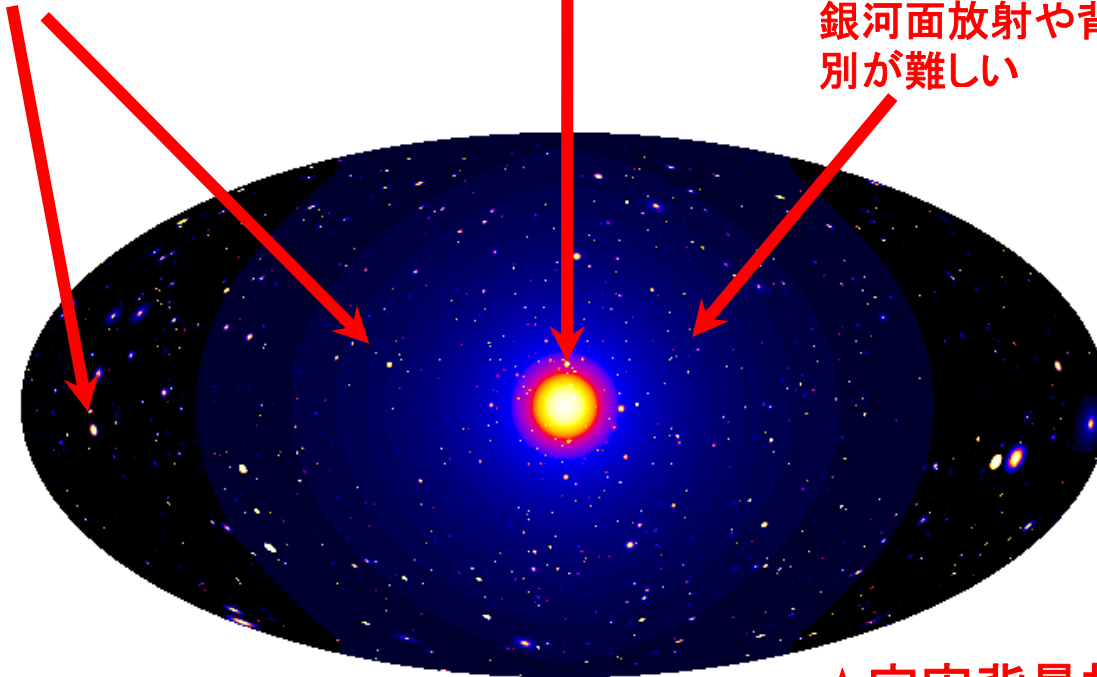
★ダークマター-satellite

矮小銀河やダークマターの小塊を
探査。探しやすい

Milky Way Halo

銀河面放射や背景放射との区別が難しい

All-sky map of
simulated gamma ray
signal from DM
annihilation
(Baltz 2006)



★Spectral Lines

天体からの寄与を考えなくても良い。

★宇宙背景放射

天体からの放射との区別が必要

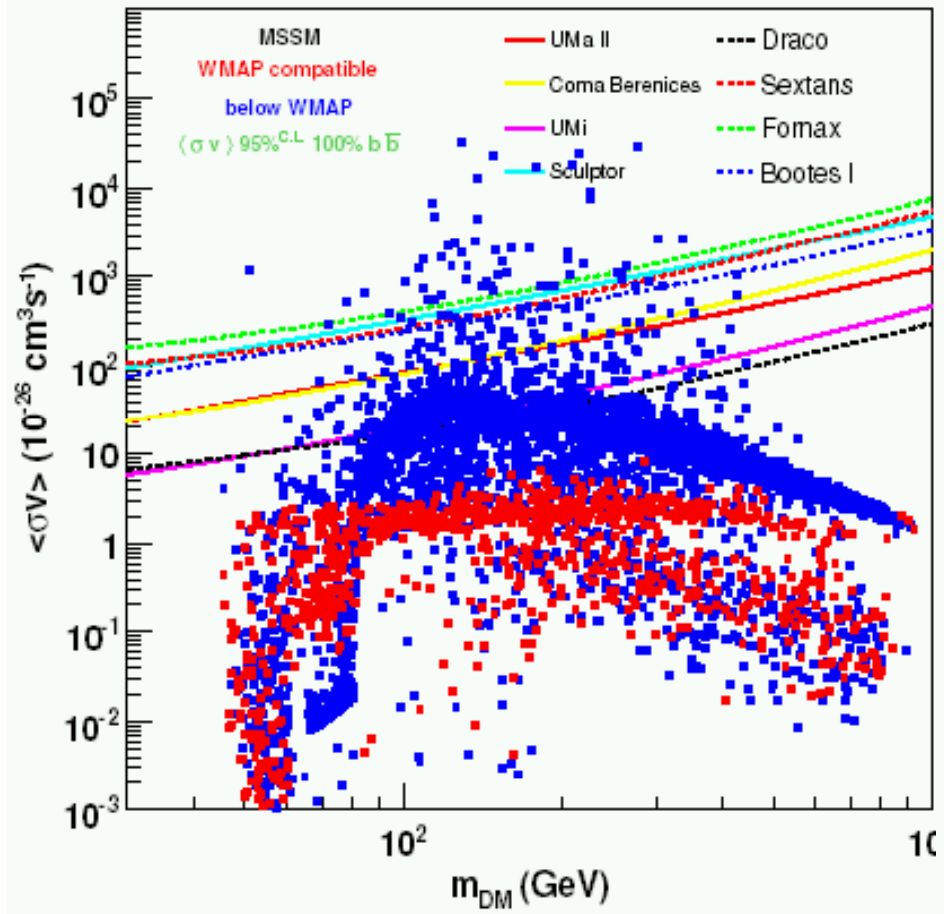
★銀河団

加速粒子からの放射との区別が必要

フェルミによる矮小銀河からのガンマ線の上限值(連続ガンマ線)から得られるDMの断面積の上限値の例

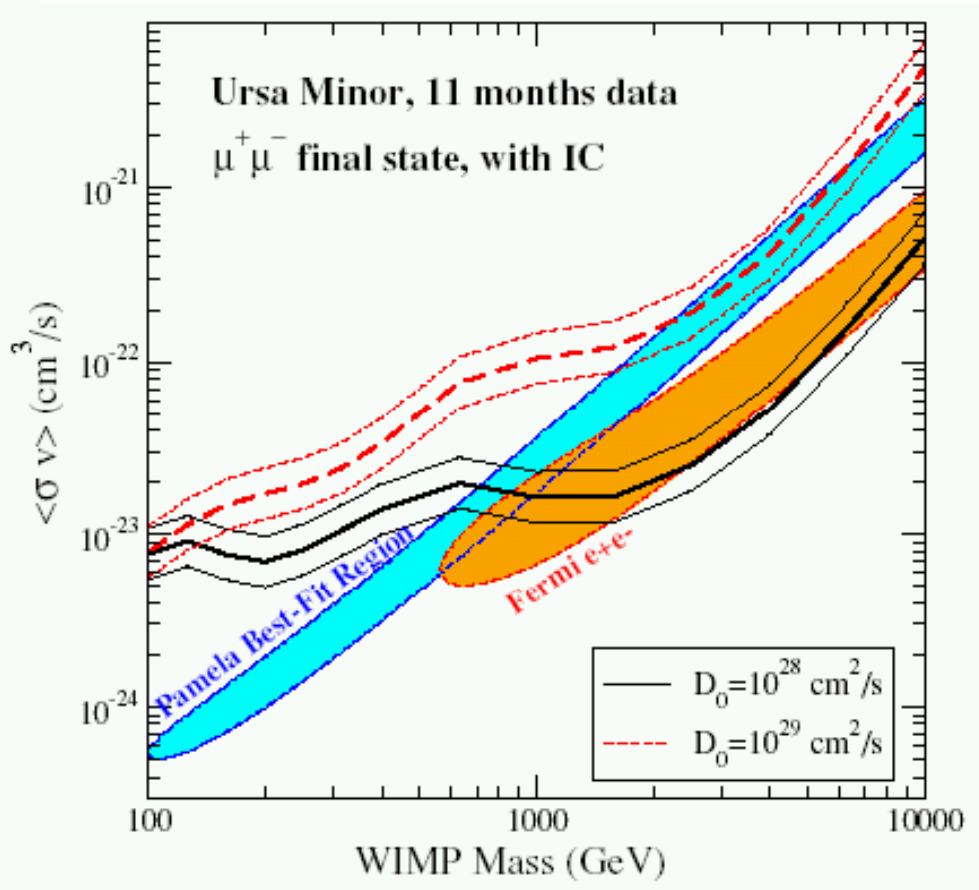
MSSMモデルの場合 (100% $b\bar{b}$)
各銀河ごとの上限値 (95%信頼度)

赤: WMAPによるthermal relic DM量を用いて各種DMモデルから得られる値(青は、nonthermalもある場合)



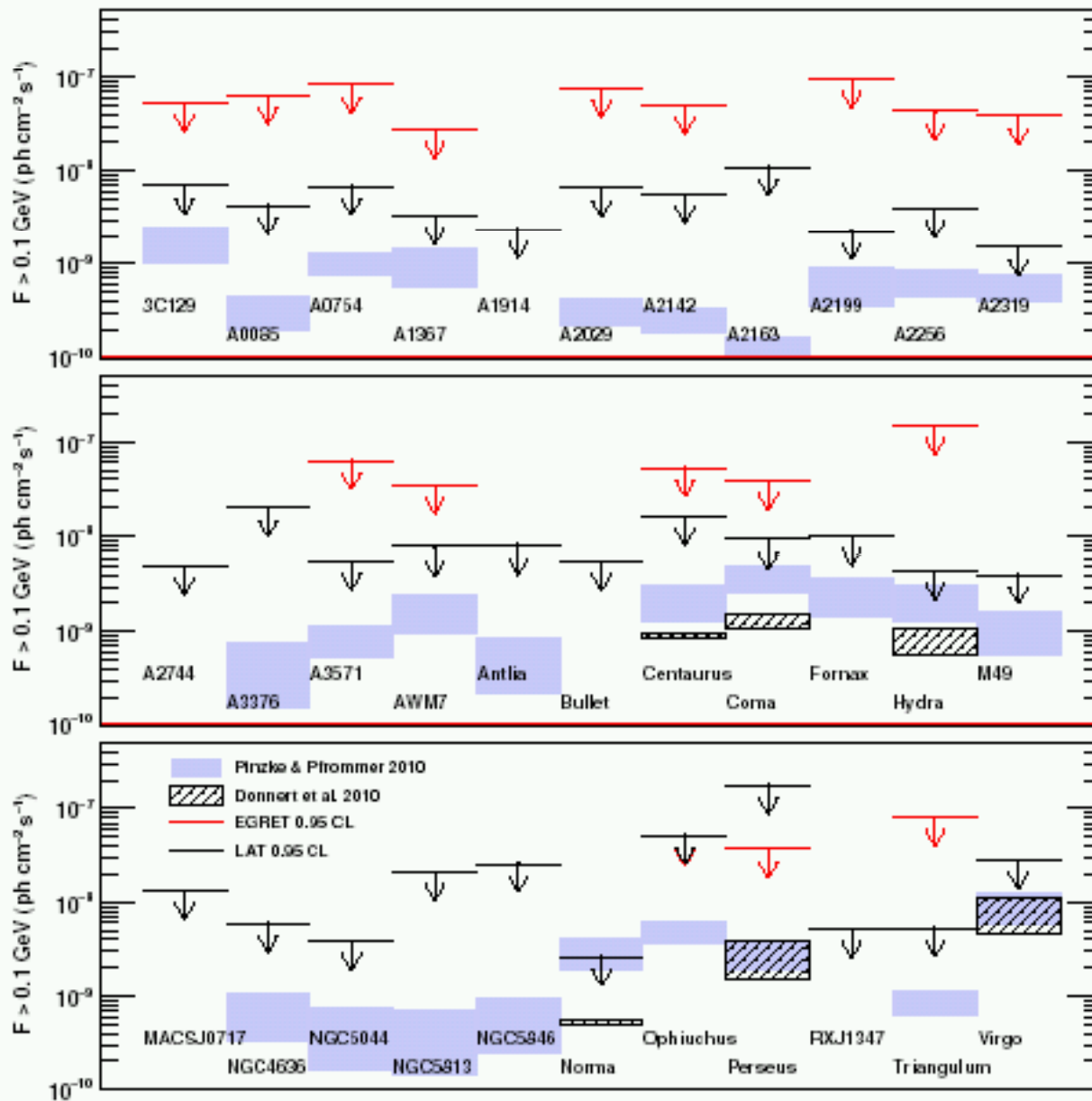
Final Stateがミュオンの場合
宇宙線電子陽電子による制限と比較

最も近傍のUrsa Minor銀河による制限



銀河団からのガンマ線放射は？

フェルミでも未検出

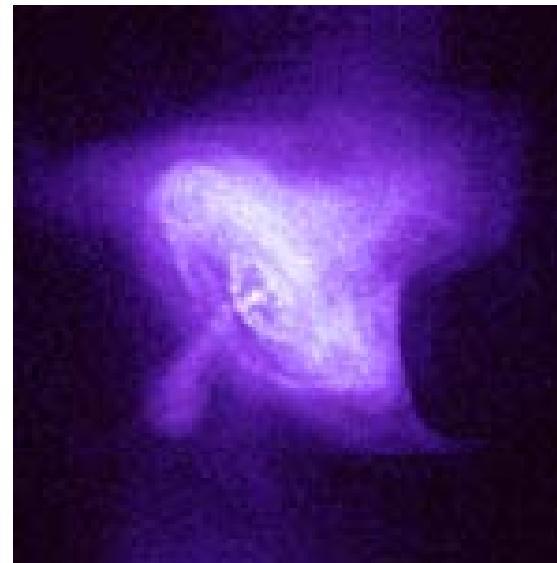
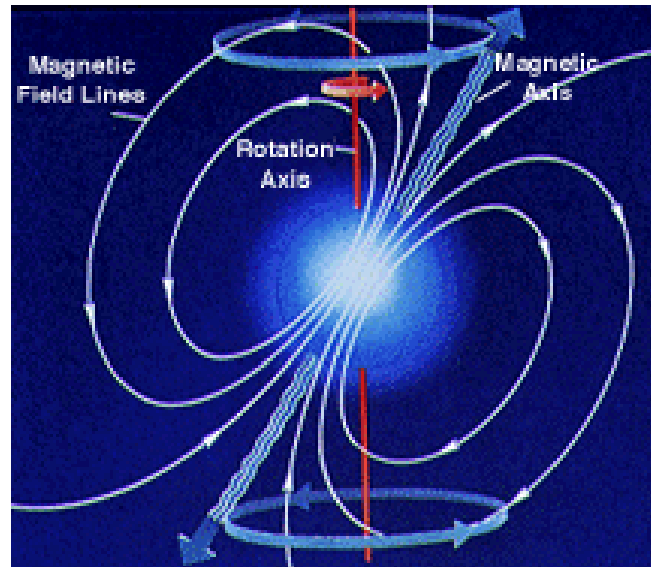


高温ガスの熱エネルギーに対する宇宙線(陽子)のエネルギーの上限値は、5%以下。

電波シンクロトロンと比較した場合、銀河団磁場の下限値は、0.15uG。
(reasonable)

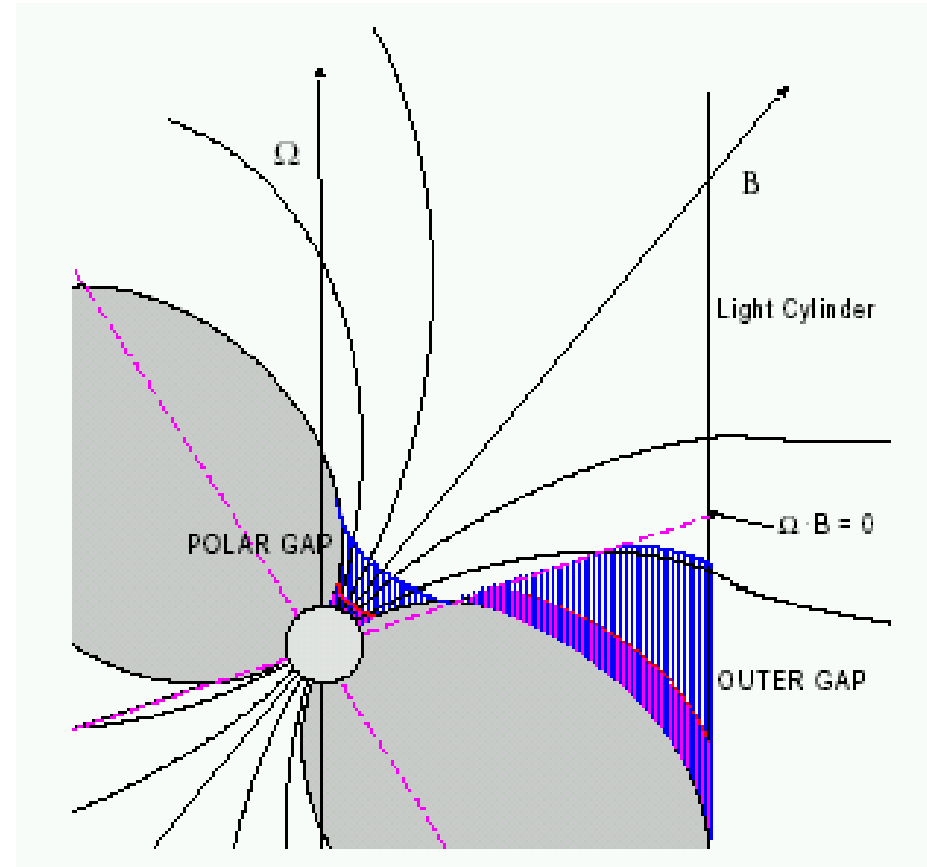
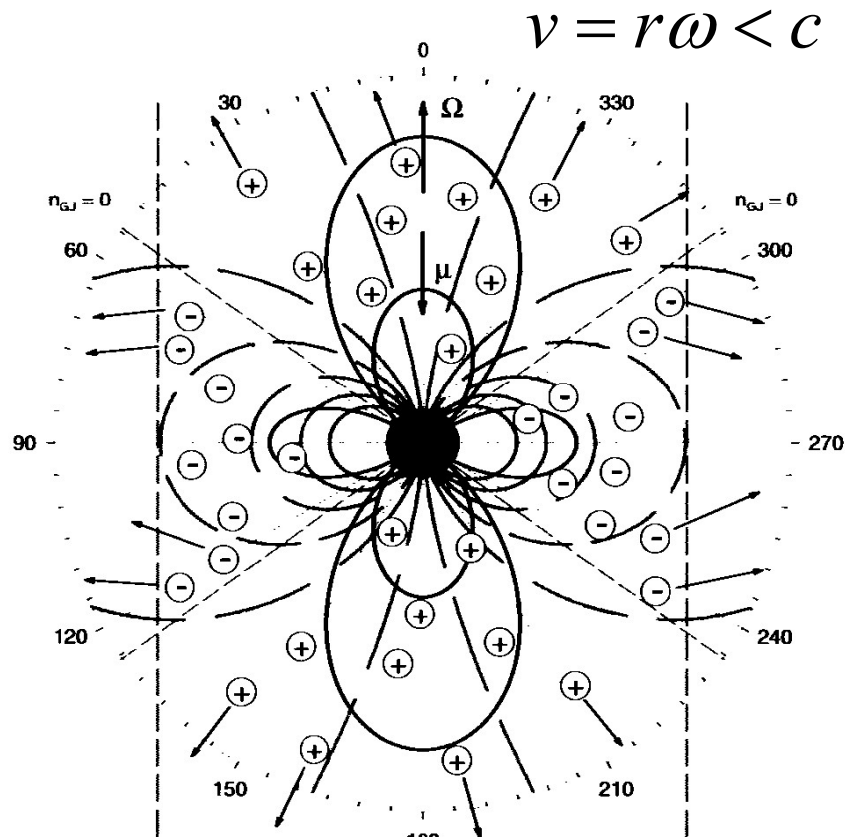
暗黒物質の断面積も制限。

3. ガンマ線パルサー、パルサー星雲 (主に、かに星雲)



Chandra X-ray image of Crab

パルサーの周囲の磁気圏の様子



加速領域

Polar cap model

小さい領域

光子、粒子の相互作用大

高いエネルギーのガンマ線ほど出てきにくくなる。

Outer gap model

放射機構

強い磁場 曲率放射

逆コンプトン散乱

$$E_{cut} = 2\text{GeV} P^{0.5} B_{12}^{-1} \left(\frac{R}{R_{NS}} \right)^{5/2}$$

EGRET時代

Table 6.2. Properties of high-energy pulsars (Thompson et al. 1999)

| Name | P (ms) | τ (10^3 yr) | \dot{E} (10^{36} erg s $^{-1}$) | F_E (erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$) | d (kpc) | L_{HE} (erg s $^{-1}$) | η ($E > 1$ eV) |
|----------|-------------|------------------------|--|--------------------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------|
| Crab | 33 | 1.3 | 450 | 1.3×10^{-8} | 2.0 | 5.0×10^{35} | 0.001 |
| B1509-58 | 150 | 1.5 | 18 | 8.8×10^{-10} | 4.4 | 1.6×10^{35} | 0.009 |
| Vela | 89 | 11 | 7.0 | 9.9×10^{-9} | 0.5 | 2.4×10^{34} | 0.003 |
| B1706-44 | 102 | 17 | 3.4 | 1.3×10^{-9} | 2.4 | 6.9×10^{34} | 0.020 |
| B1951+32 | 40 | 110 | 3.7 | 4.3×10^{-10} | 2.5 | 2.5×10^{34} | 0.007 |
| Geminga | 237 | 340 | 0.033 | 3.9×10^{-9} | 0.16 | 9.6×10^{32} | 0.029 |
| B1055-52 | 197 | 530 | 0.030 | 2.9×10^{-10} | 1.5 | 6.2×10^{33} | 0.207 |

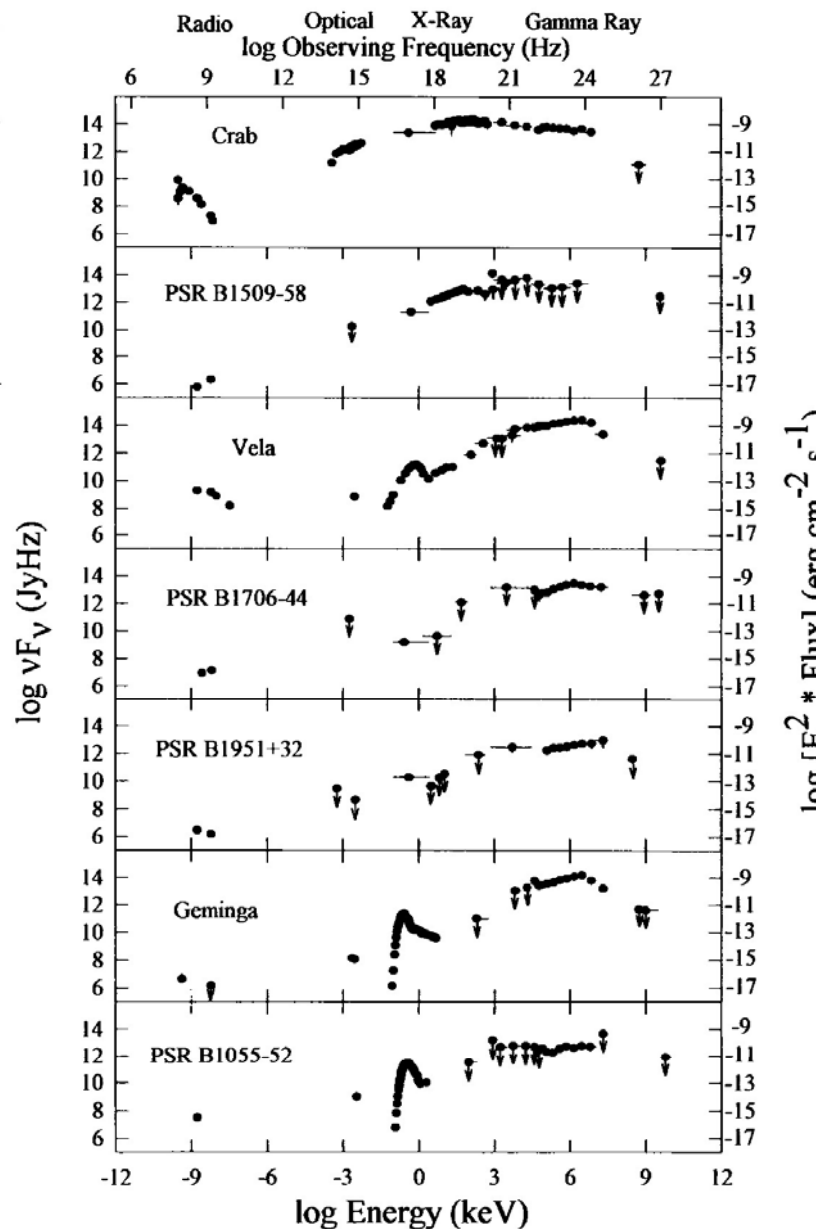
EGRETが検出したパルサー(7つ)

ガンマ線領域で最も明るい
電波で暗いものがある。
Gemingaなど

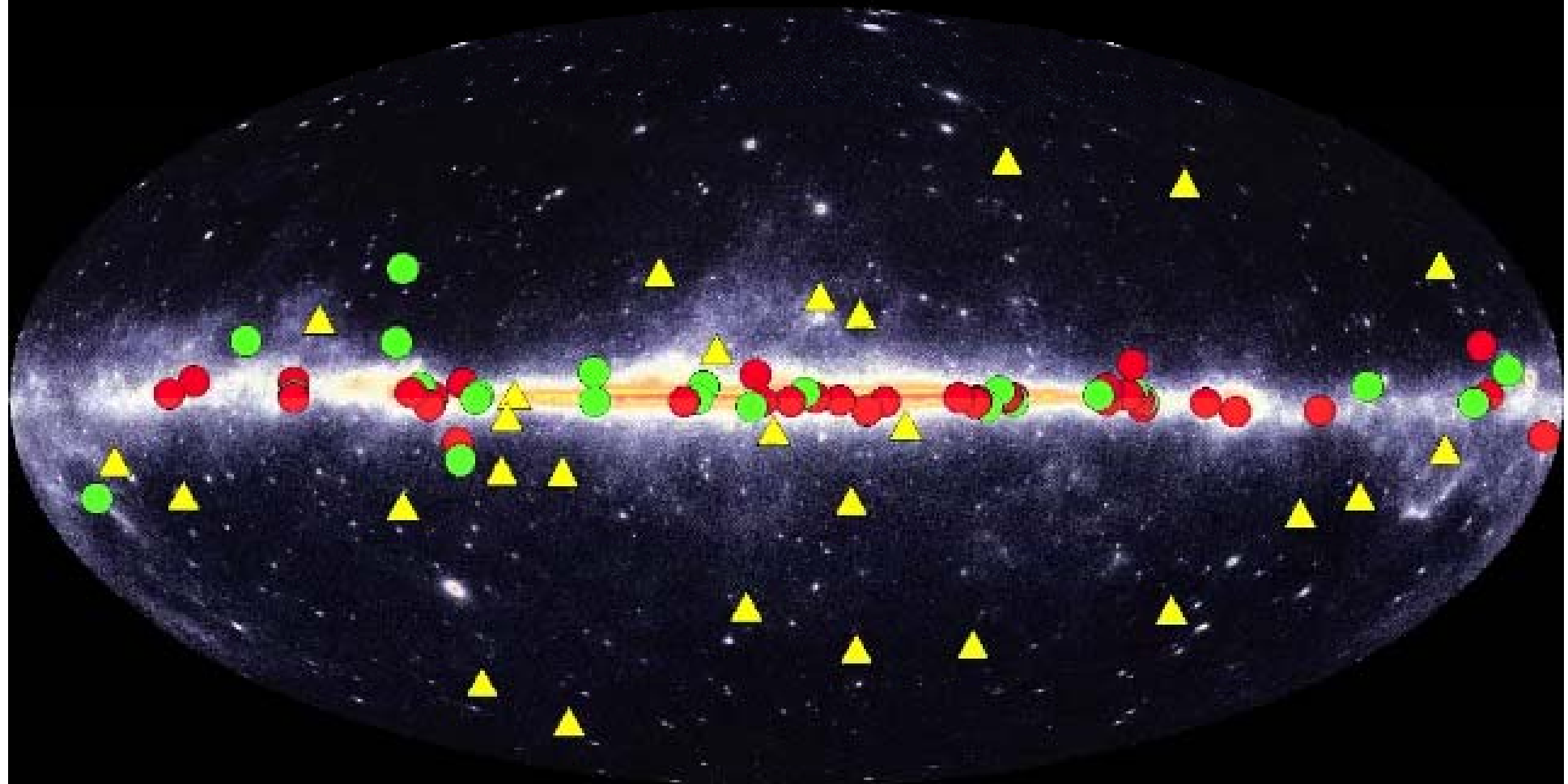
フェルミでの進展

数が増えて統計的な性質(種族など)
パルサーでの放射領域の解明
パルサー磁気圏のマッピング

多波長スペクトル



Fermi LAT γ -ray pulsars



最近、100個を超えた

- ガンマ線で見つかったパルサー
- 若い電波パルサー
- ▲ ミリ秒パルサー

FermiによるVela パルサーのガンマ線スペクトル

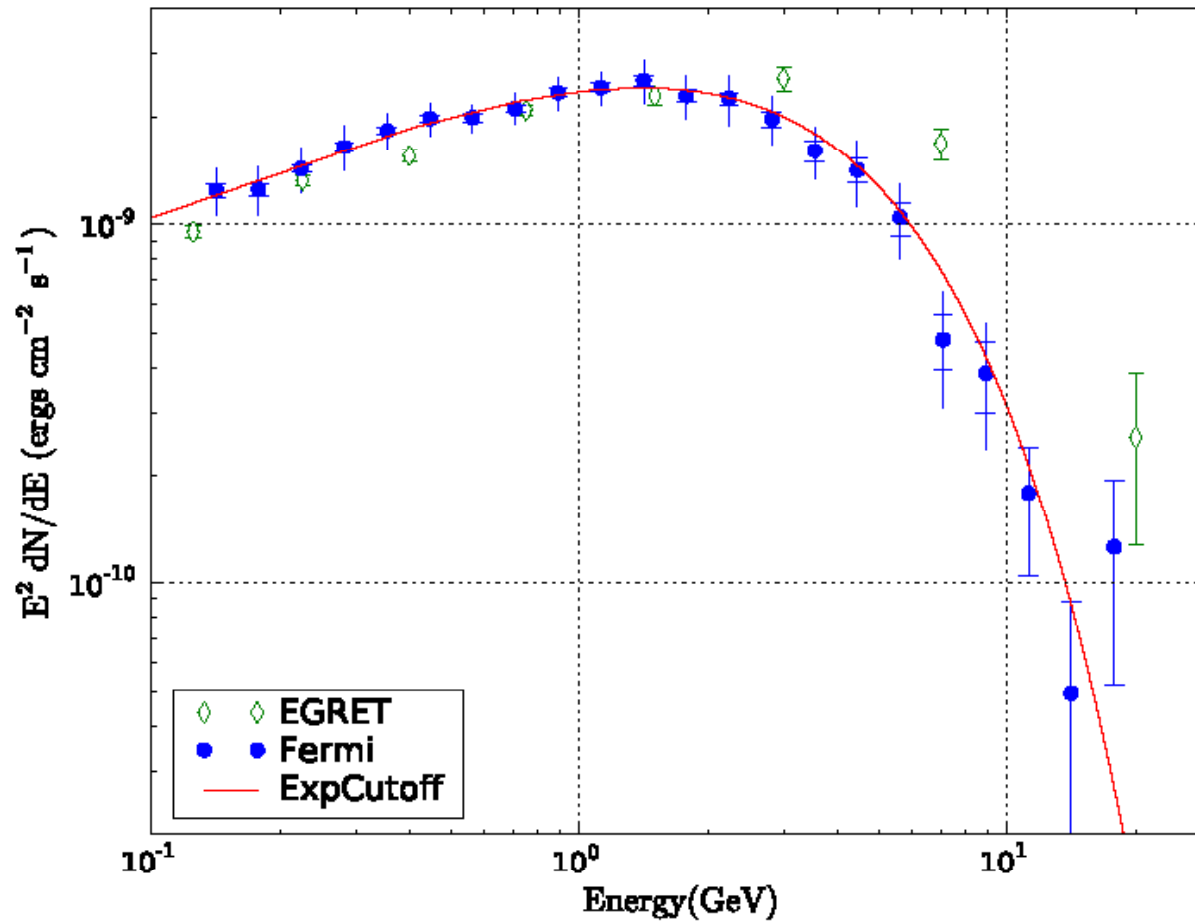
Consistent with $b=1$
(simple exponential)

$$N(E) = N_0 E^\Gamma e^{-(E/E_c)^b}$$

$$\Gamma = -1.51^{+0.05}_{-0.04}$$

$$E_c = 2.9 \pm 0.1 \text{ GeV}$$

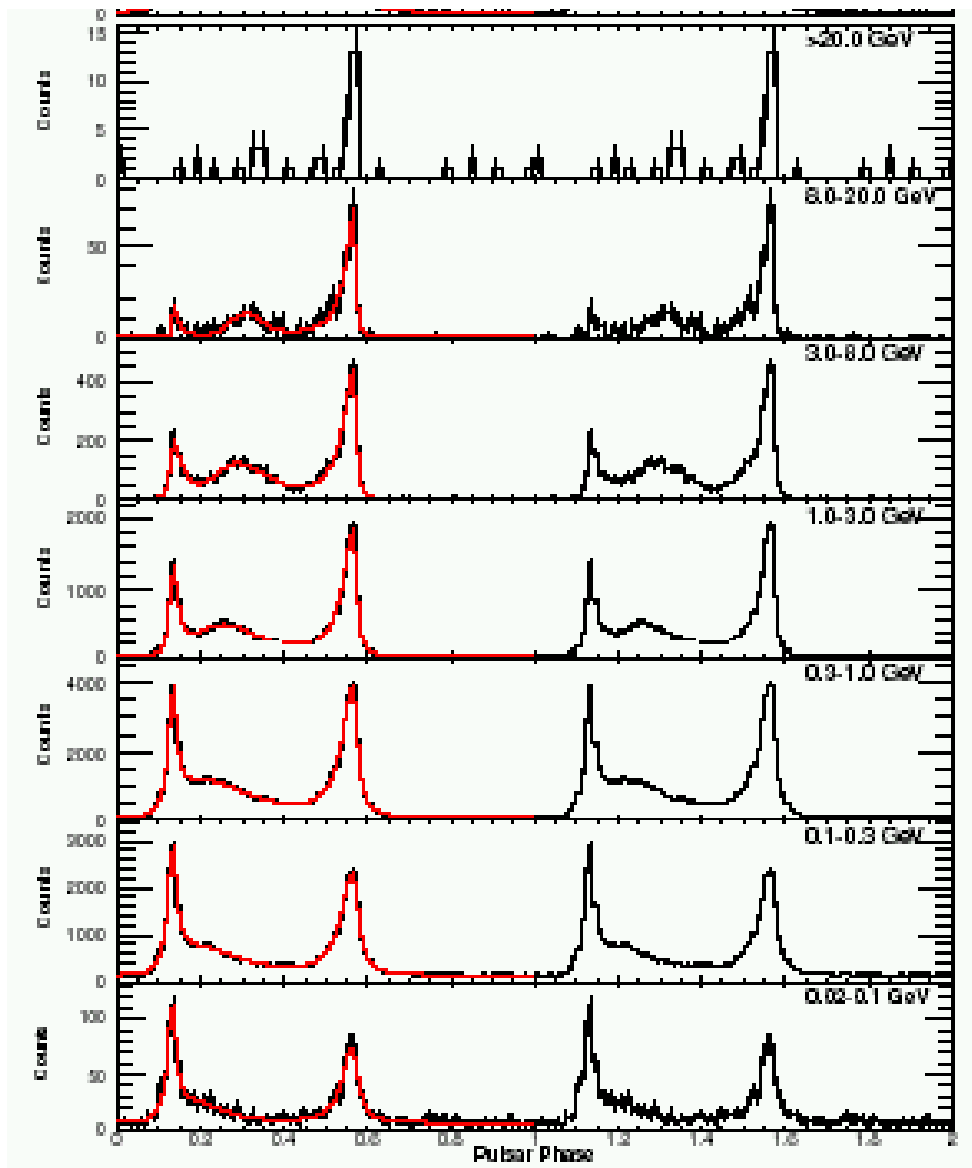
$b=2$ (super-exponential)
rejected at 16.5σ



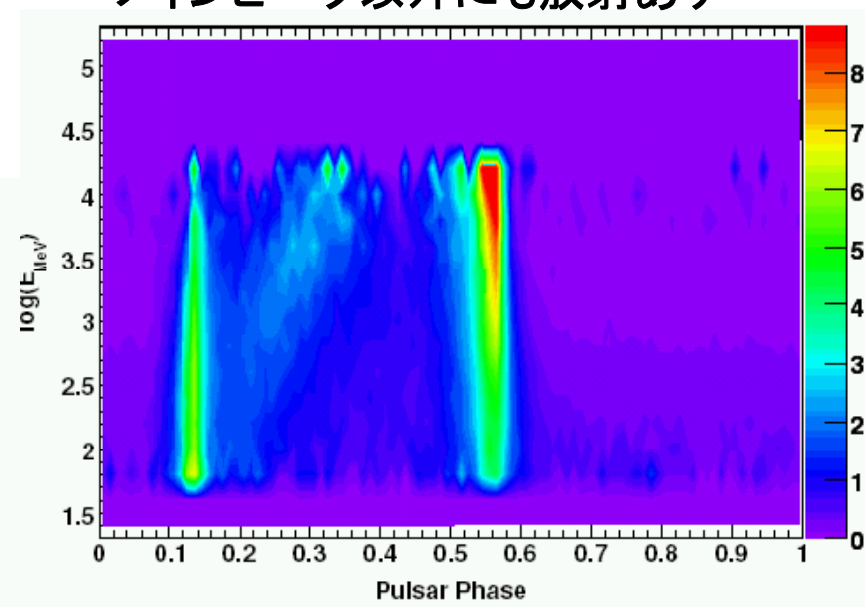
No evidence for
magnetic pair
attenuation:
Near-surface emission
ruled out

Polar Cap modelと合わない

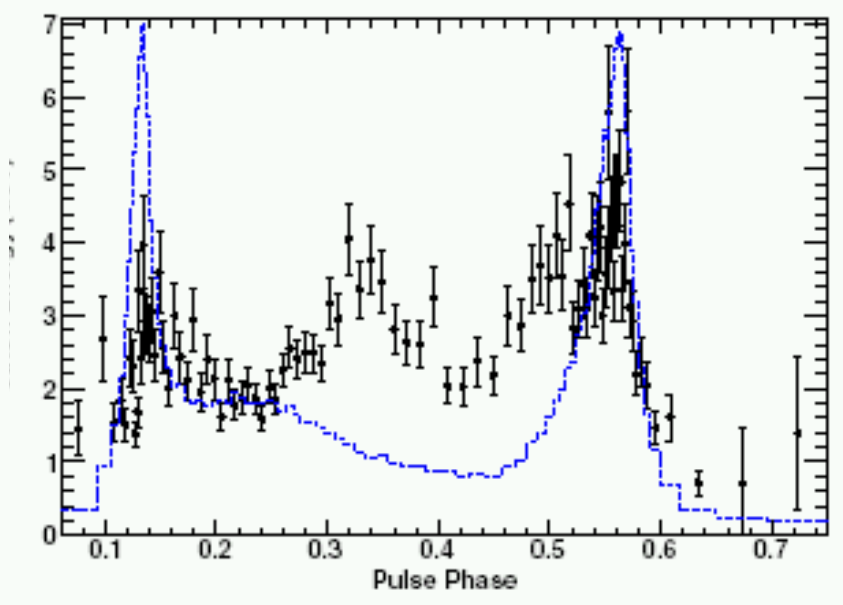
最も明るいガンマ線パルサーのVelaパルサーのエネルギー別のパルスの様子



メインピーク以外にも放射あり



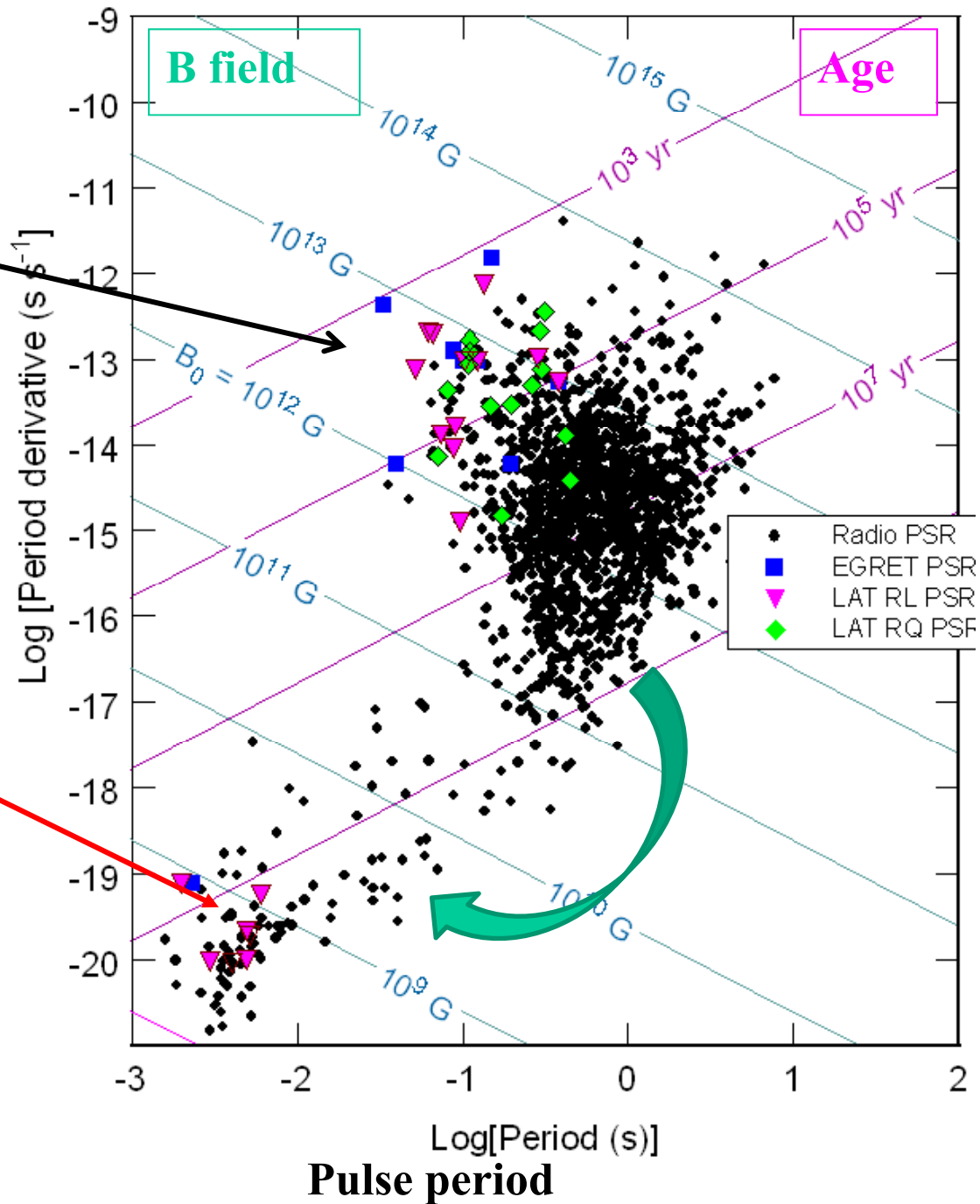
位相ごとのカットオフエネルギーの変化



フェルミで見つかったパルサー

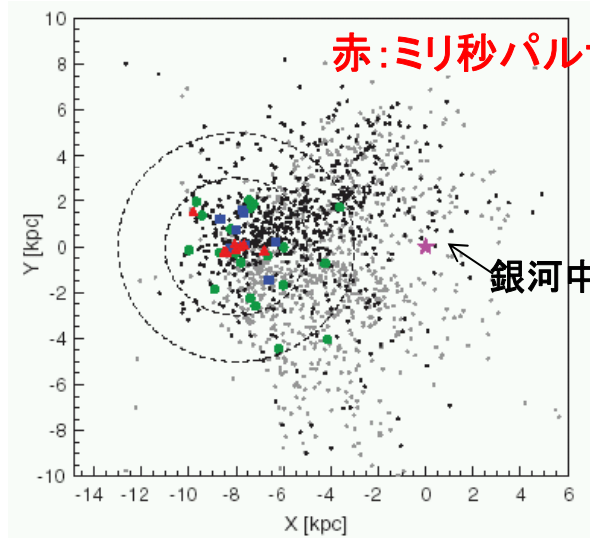
若いパルサー

ミリ秒パルサーからの
ガンマ線パルス発見



ミリ秒パルサーは、古くて全体の磁場は弱い、回転が速いので光円錐が小さく、そこでの磁場の強度は若いパルサーと同じくらい

見つかったガンマ線パルサーの太陽系を中心とした空間分布の図



赤:ミリ秒パルサー

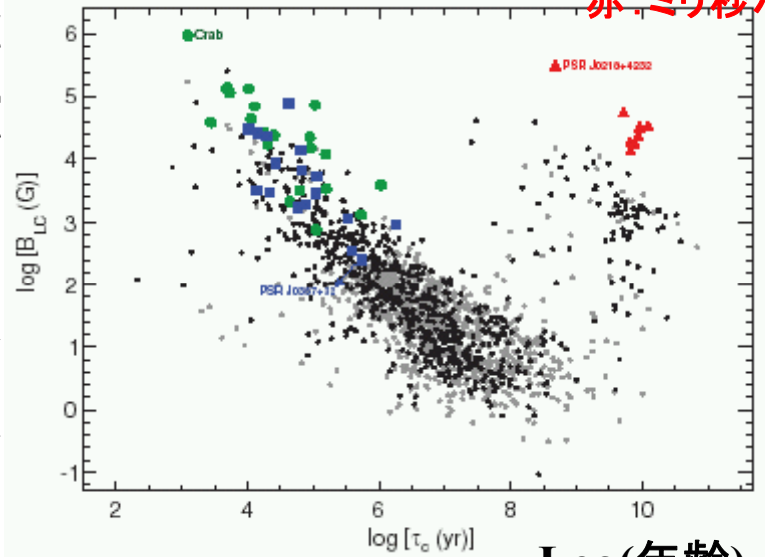
銀河中心

太陽系近傍のものが特に見ついている。銀河全体では多数いるはず

年齢 vs B(LC)

赤:ミリ秒パルサー

光円錐での磁場強度



Log(年齢)

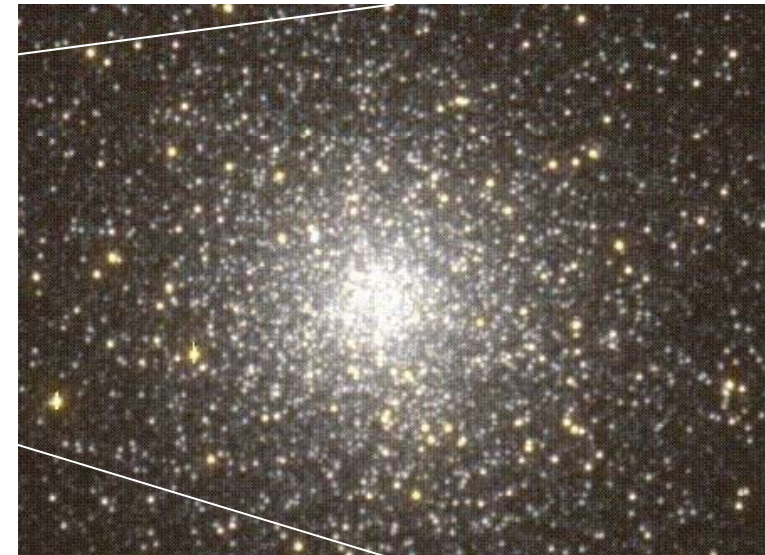
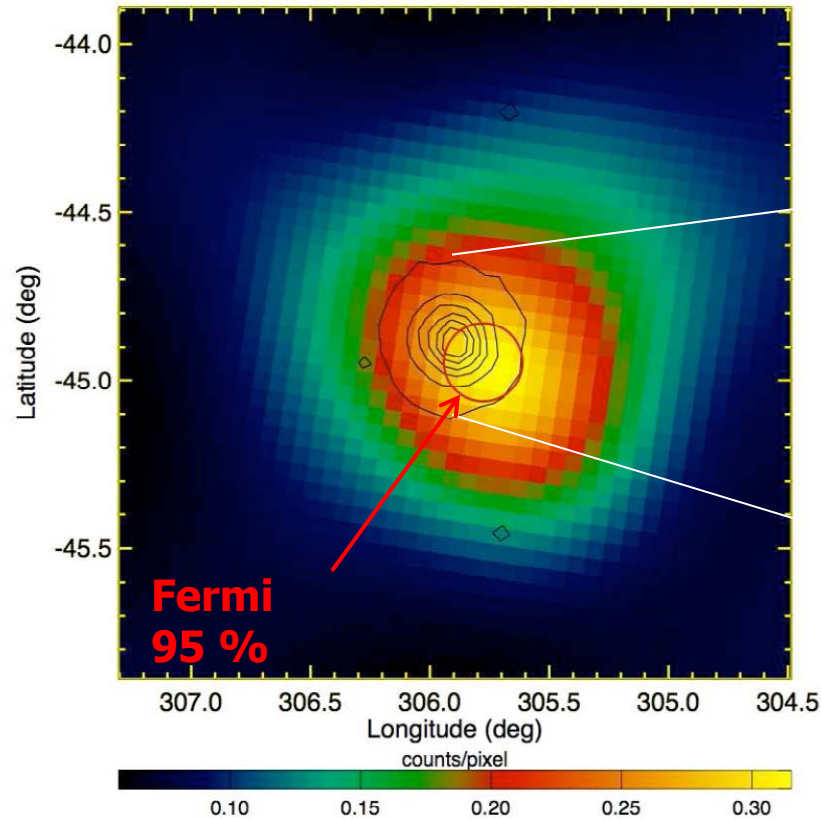
ガンマ線パルサーの生成率 ... 見つかったパルサーの空間密度と年齢から推定

| | | |
|-----------------|---|------------------------------|
| 電波で検出されたパルサー | $8 \times 10^{-5} \text{ kpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ | } 銀河全体で50年に1個生成(超新星爆発の頻度と一致) |
| 電波で検出されていないパルサー | $4 \times 10^{-5} \text{ kpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ | |
| ミリ秒パルサー | $2 \times 10^{-8} \text{ kpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ | |
| | 時間をかけて生成 | |

球状星団 47 Tucanae からのガンマ線検出

古い系なので、古い(ミリ秒)パルサーが多数存在していると考えられる

球状星団の中に23個の電波ミリ秒パルサーが見つかった



Consistent with Fermi
PSF for point source

光度 $4.8(\pm 1.2) \times 10^{34} \text{ erg/s}$

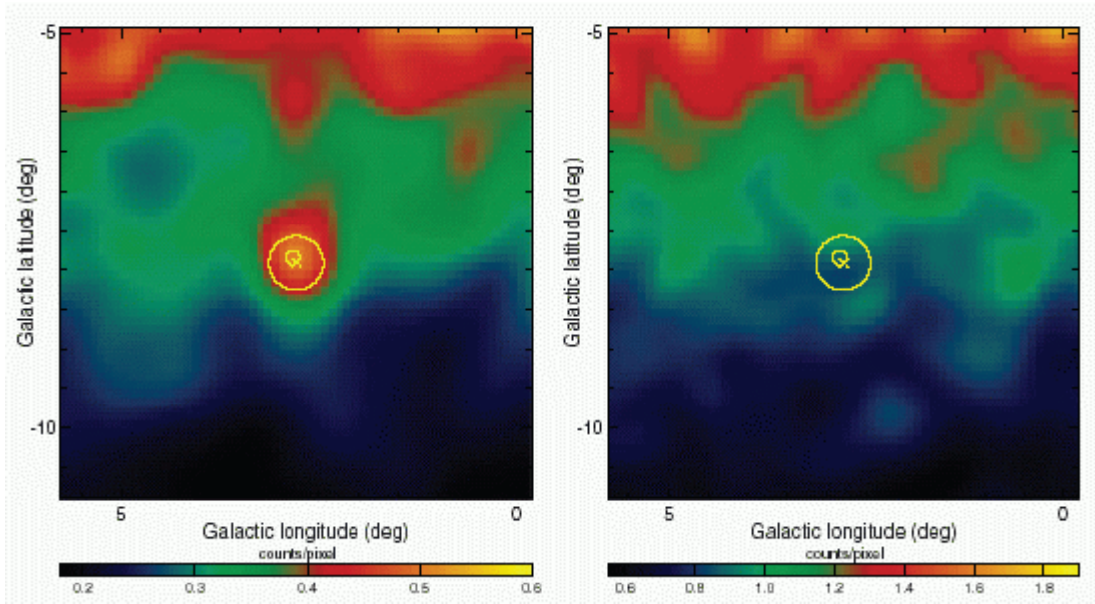
数10個のパルサーが回転エネルギー損失の10%をガンマ線で放射しているとする、観測されるガンマ線光度を説明できる

他にも7個の球状星団がガンマ線で検出された

実際に球状星団からミリ秒パルサーを検出した最初の例 J1823-3021A

球状星団NGC6624

フェルミのガンマ線イメージ



電波のパルスON時

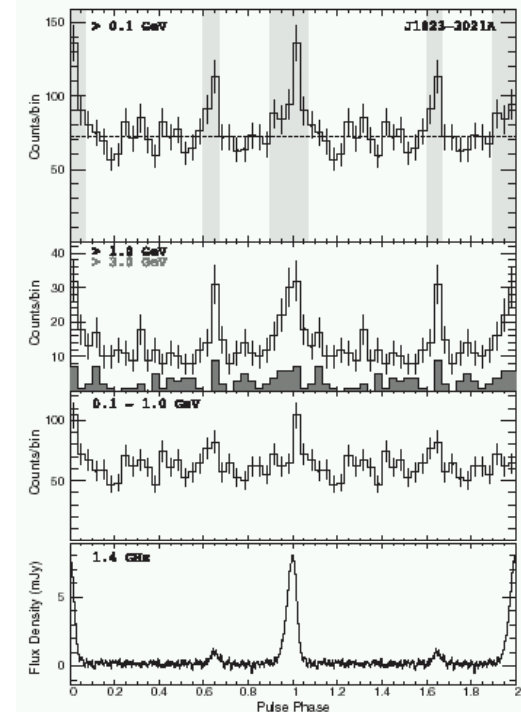
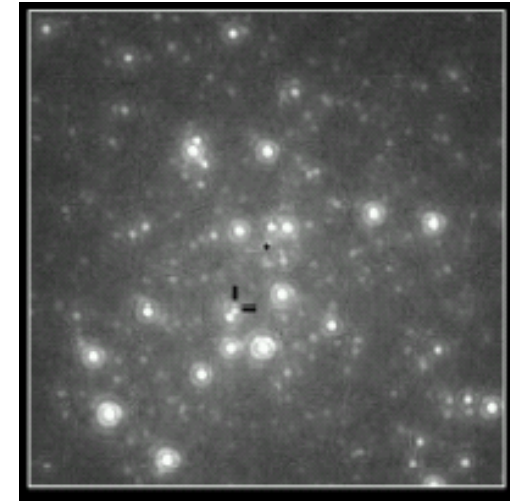
電波のパルスOFF時

非常に明るい $L_\gamma = 8 \times 10^{34} \text{ erg/s}$

$B = 4 \times 10^9 \text{ G}$

かなり若いミリ秒パルサー

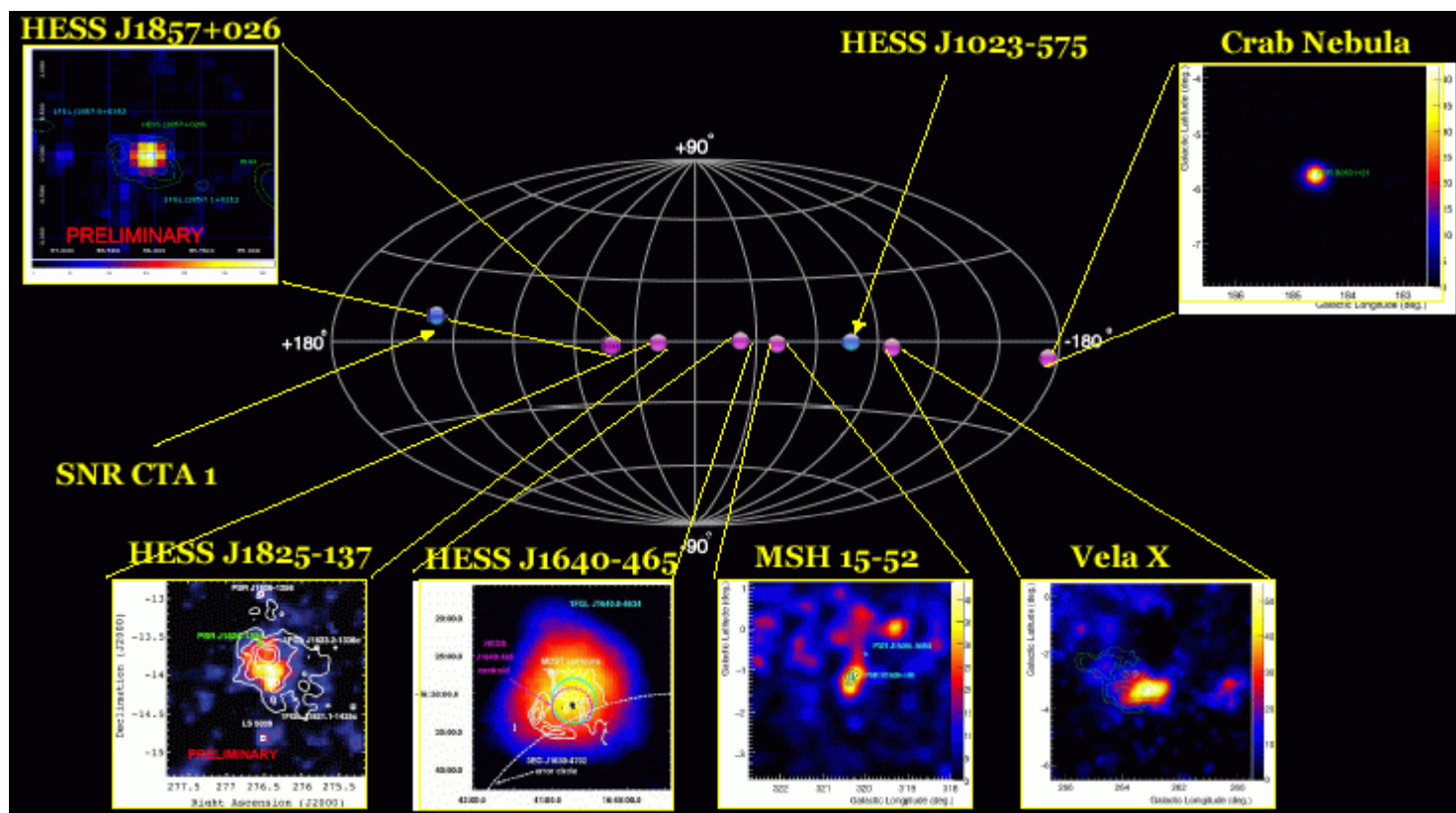
球状星団には、こうしたパルサーが生まれやすい？



パルサー星雲(Pulsar Wind Nebula)

GeVガンマ線でもフェルミで検出され始めた。
多波長スペクトルが詳しくわかるようになった。
電子のエネルギーや磁場の特定。
TeVガンマ線ほど明るくなさそう。

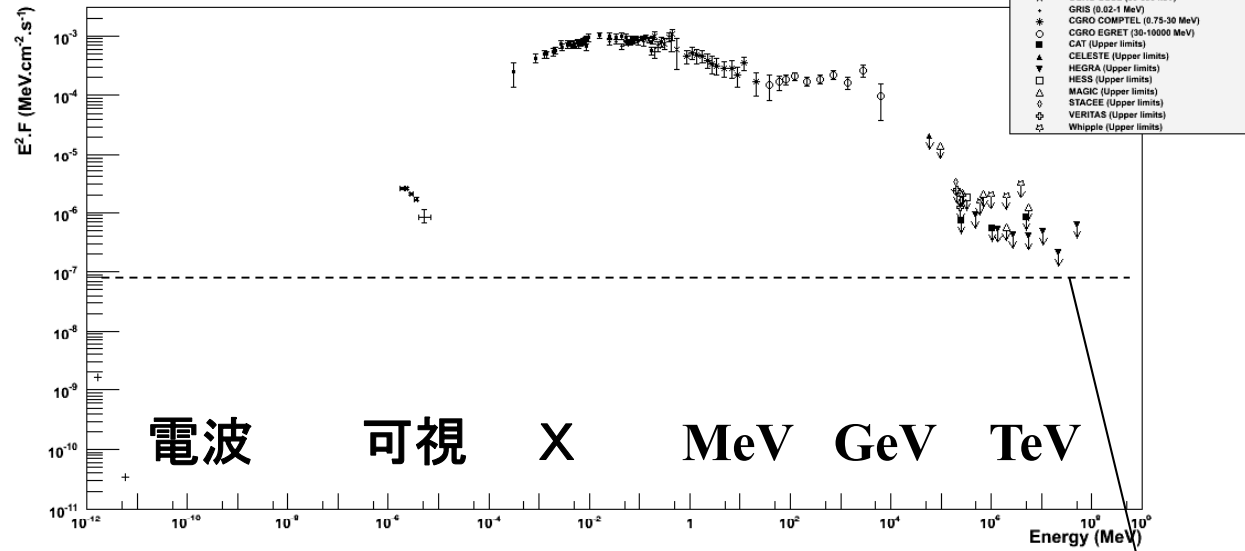
6個検出、2個の候補



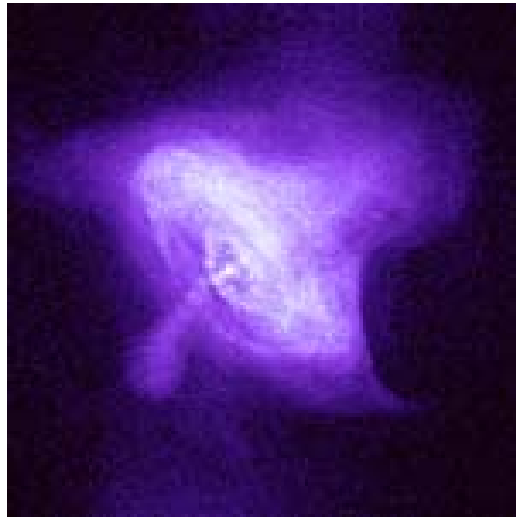
かに星雲の多波長スペクトル

Crab Pulsar

Spectral Energy Distribution of the Crab Pulsar

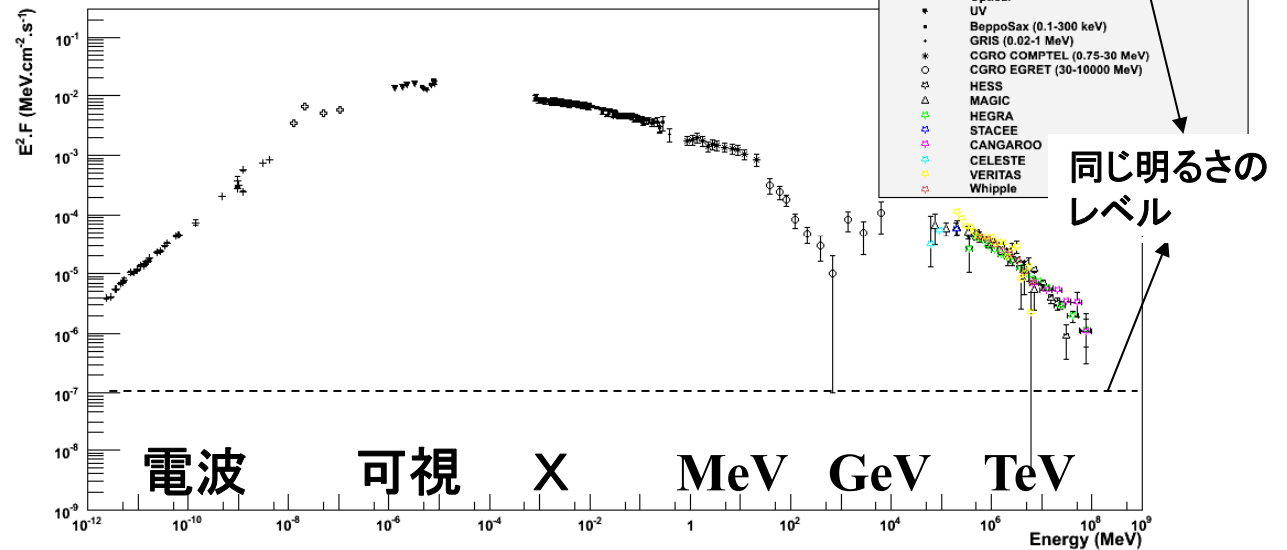


Crab Pulsar and Nubula

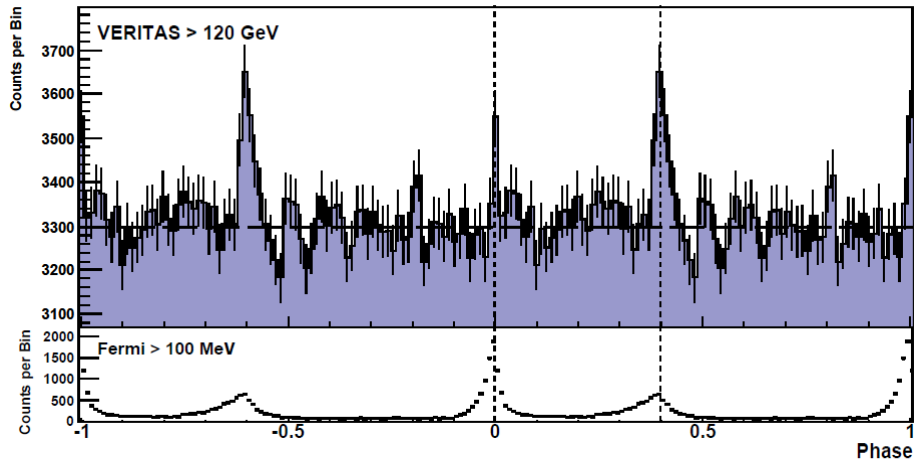


Crab Nubula

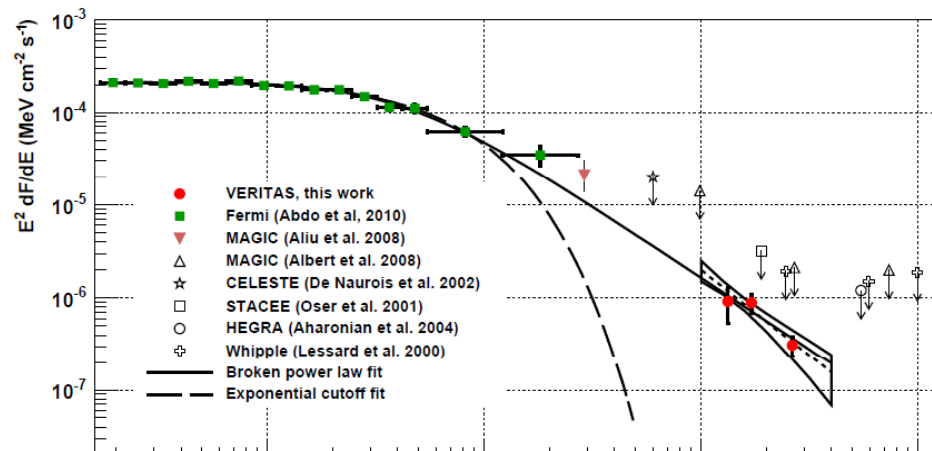
Spectral Energy Distribution of the Crab nebula

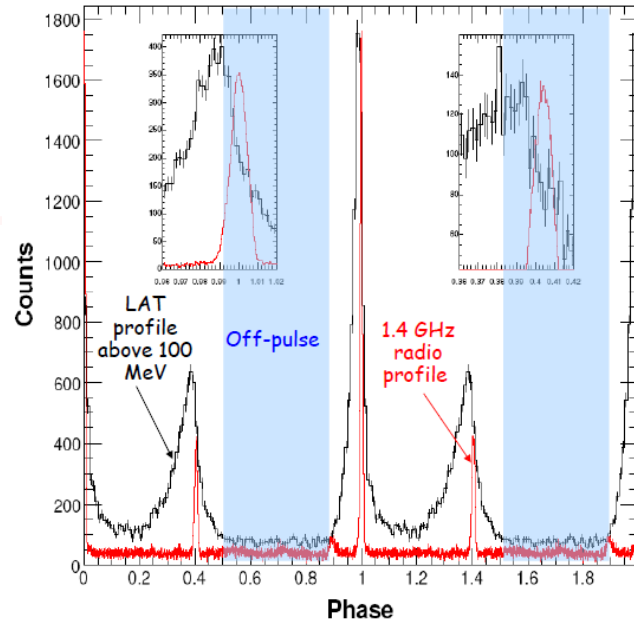


Crabから、最近、TeVガンマ線でパルスが発見された。



Veritas Coll. +11





Crab ... 数分角
フェルミで分解できない

パルスのない時期に定常成分
→パルサー星雲

b Nebula Spectrum

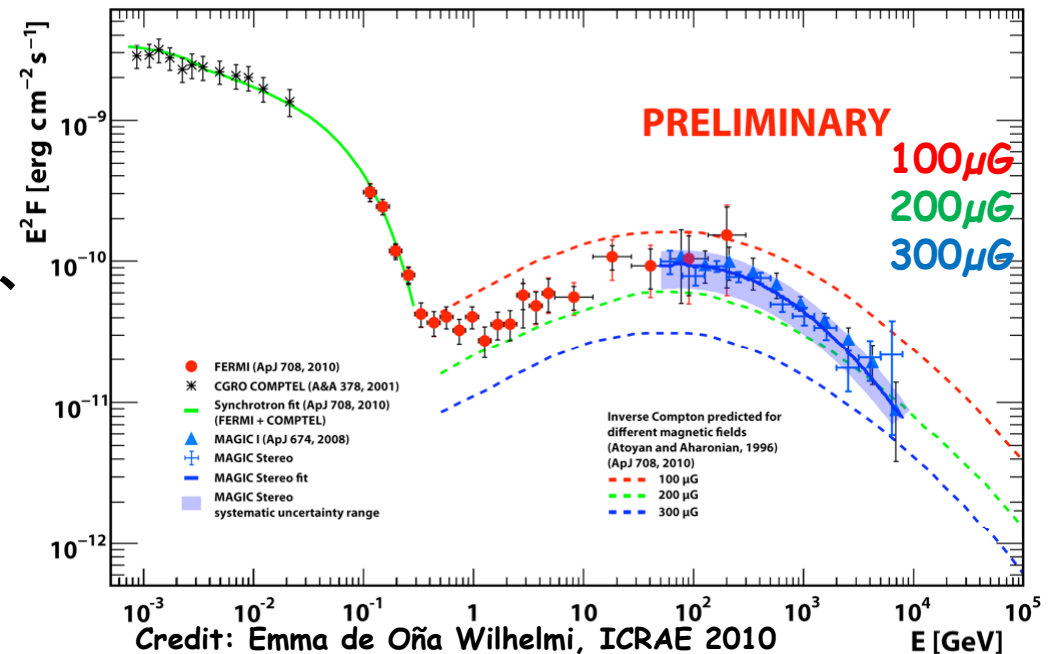
Abdo et al., 2010, ApJ, 708, 1254

MAGIC Stereo in combination with neighbouring wavelengths

逆コンプトン散乱
CMBの散乱で説明できる
シンクロトロンと逆コンプトンの比より、
磁場 100-200uG

シンクロトロン cut-off
97MeV
電子の最高エネルギー

$$\gamma \approx 5 \times 10^9 \quad (2.5\text{PeV})$$



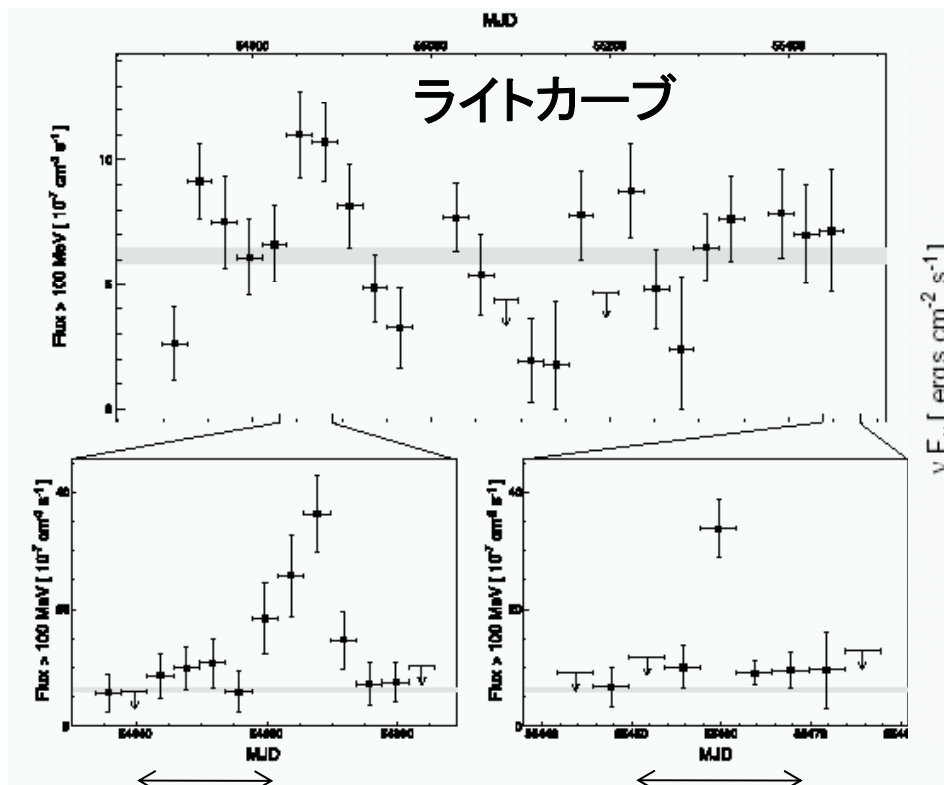
Credit: Emma de Oña Wilhelmi, ICRAE 2010

Crab Nebulaからのガンマ線フレア

X線では数年での微小な変動が観測されている

(de Jager+96, Wilson-Hodge+10)

2年間



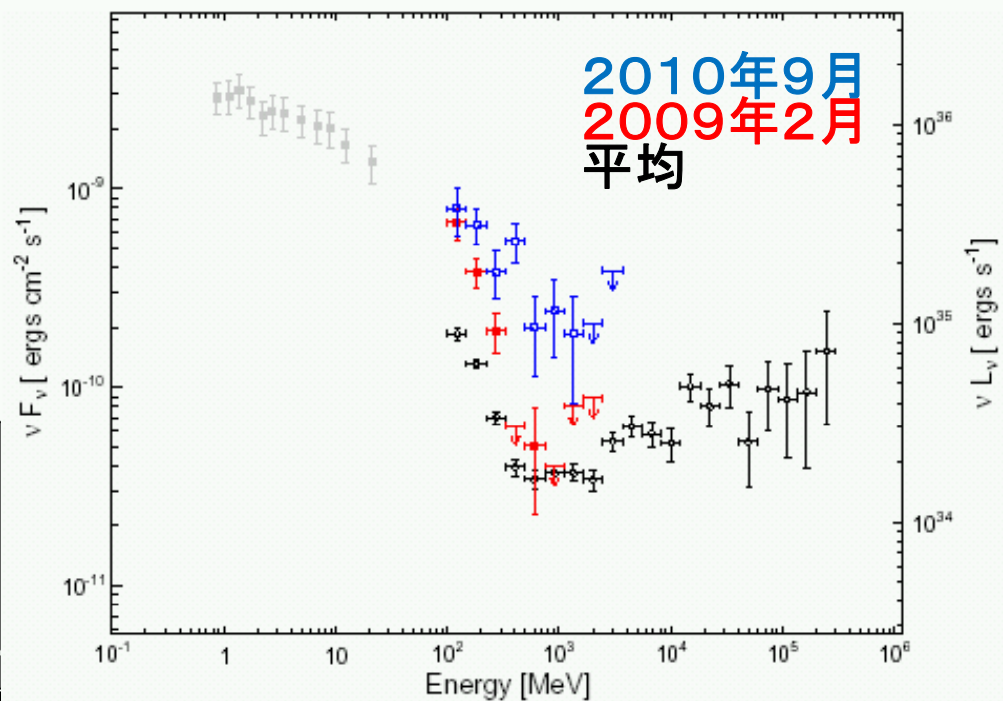
20日

2009年2月

20日

2010年9月

フレア時のガンマ線スペクトル



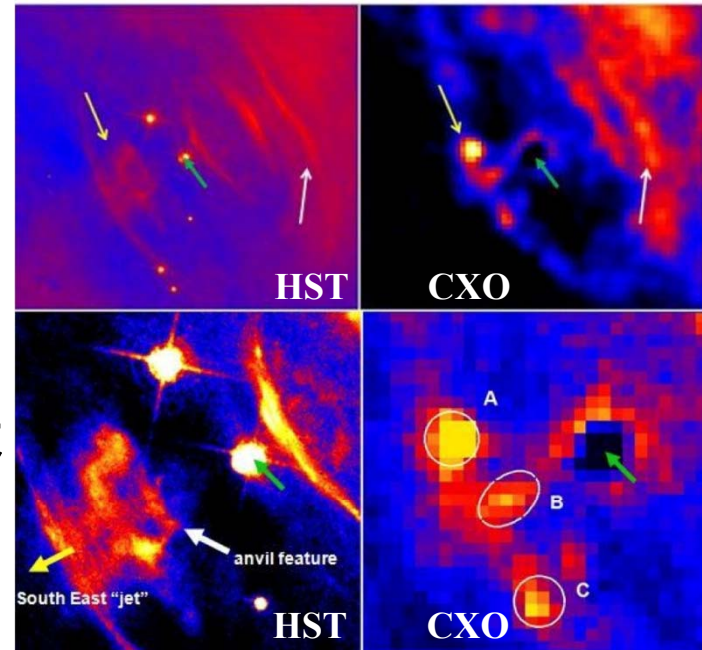
シンクロトロン成分が高エネルギー側に伸びている

フレア時に1PeV(10^{15}eV)の電子が加速

1日以内の変動 0.0004pc程度の領域
(星雲全体の1/1000、局所的に強い磁場?)

通常の加速メカニズムでは説明が難しい

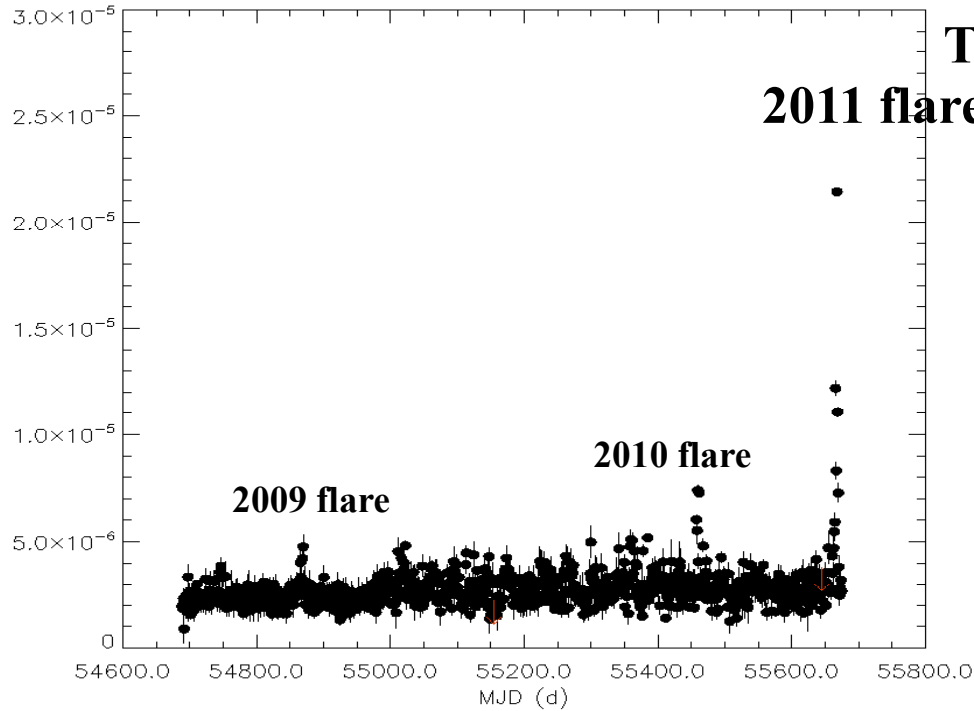
他の波長でフレアした領域を探しているが、面白そうな領域はあるが、まだ同定されていない。



拡大

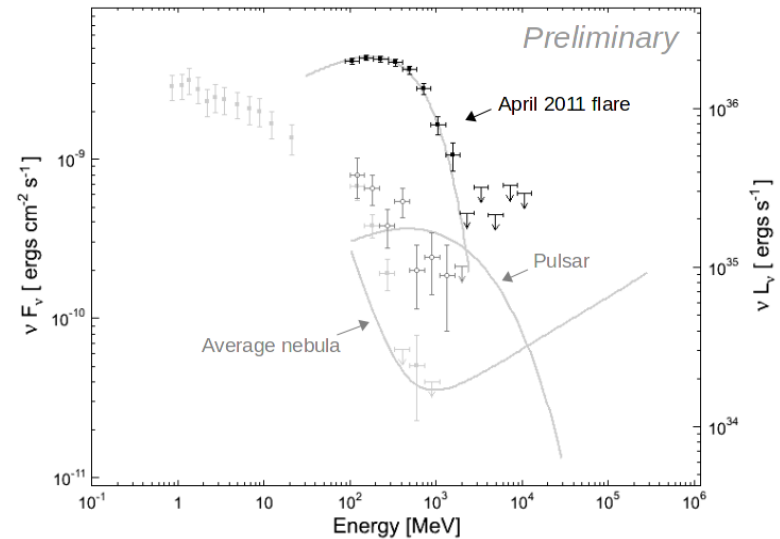
Crabのガンマ線ライトカーブ

Source = Crab Pulsar Duration = 86400.0



Tavani et al. 2011, Science, 331, 736

2011 4月の大フレア



4. ガンマ線連星

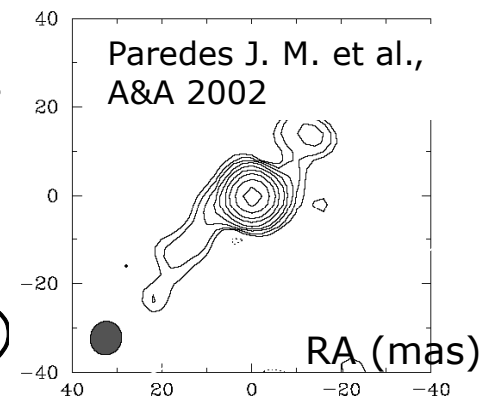
ガンマ線連星(フェルミ衛星以前の観測)

X線連星のGeV/TeVガンマ線観測 1970-1990年代

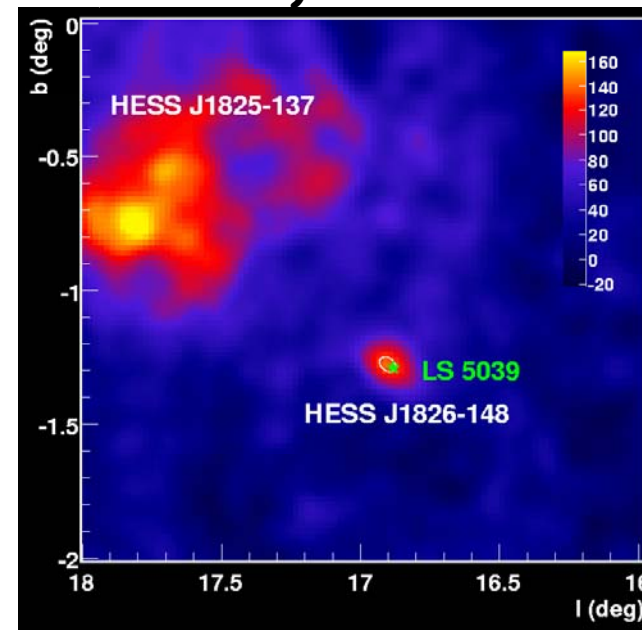
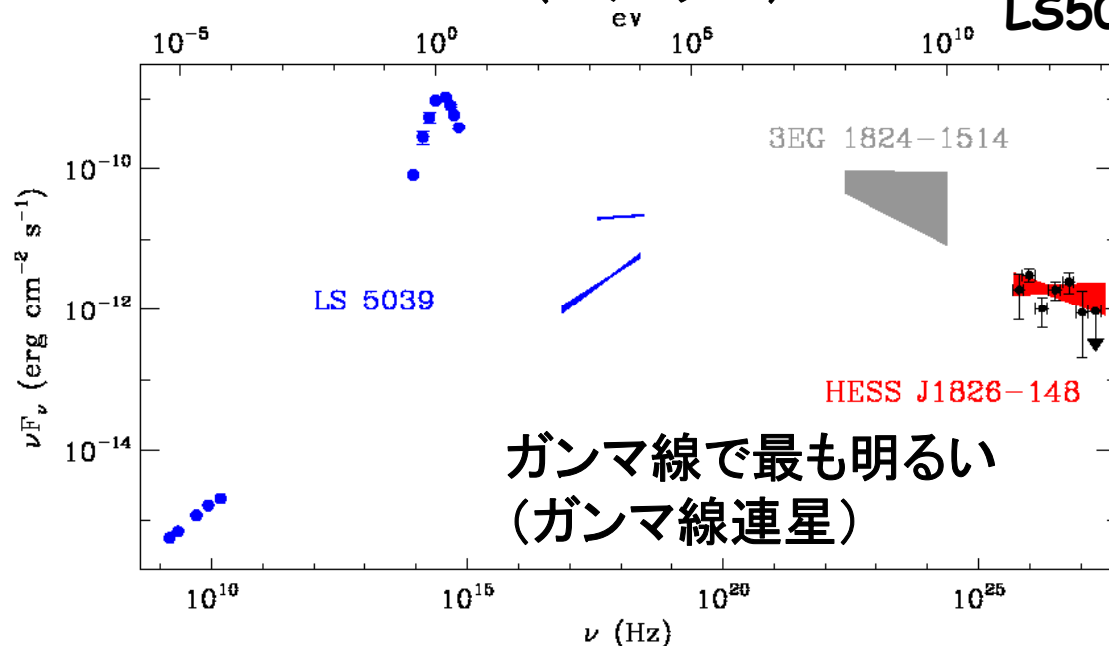
いくつかの衛星で、CenX-3 CygX-3の方向からガンマ線検出の報告
しかし、見るたびに明るさが暗くなっていく。
より感度の良い観測衛星で検出されない場合もあり。

新たな種類の連星からTeVガンマ線が検出された (2000年代初頭)

EGRET
LS 5039 (3EGJ1824+1514と思われる)
LS I+61 303 (2CG135+01, 3EGJ0241+6103と思われる)
COS-B EGRET
PSR B1259-63 (パルサー)



LS5039(Aharonian+05)



伴星は重い星、コンパクト星は、パルサー？

3つのうち、PSR B1259には、パルサーが見つかっている

LS I+6 303には、パルサー風と思われる電波雲あり

LS天体2つは、マイクロクエーサーと思われていた(強い電波源)

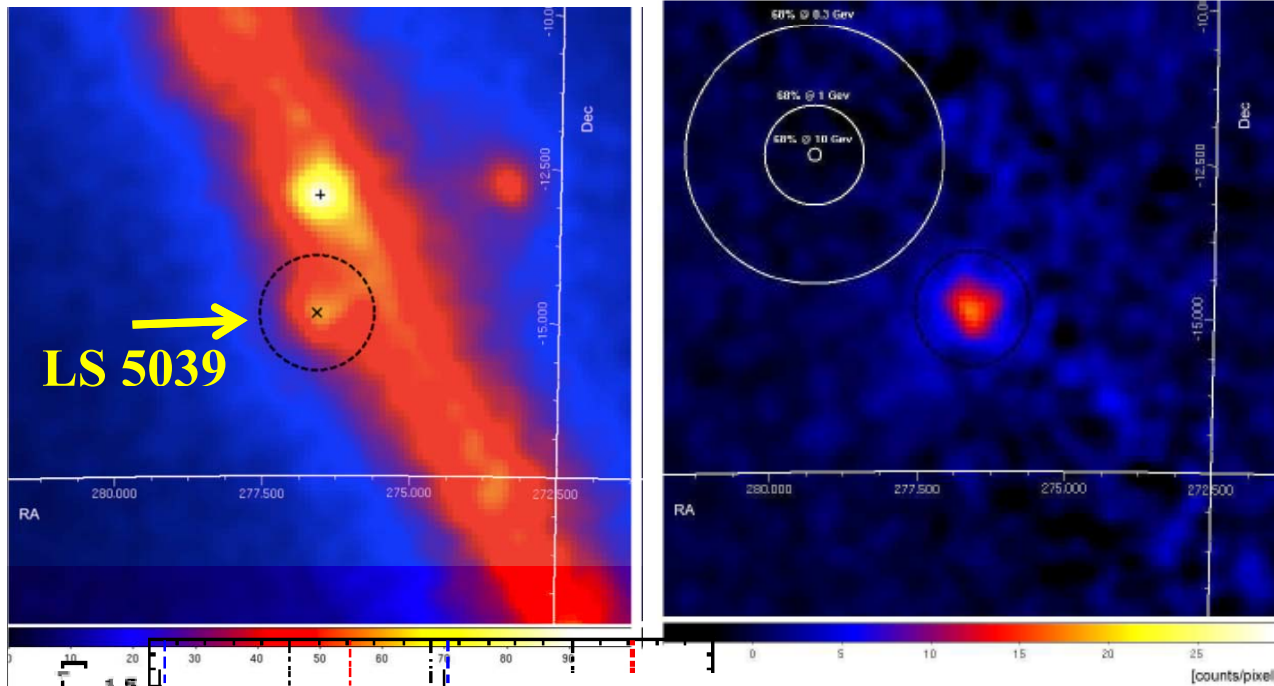
パルサー風に伴う高エネルギー電子が
重い星の強い可視光を逆コンプトン散乱

あるいは、パルサー風と重い星からの
星風が衝突して強く加速された粒子の
逆コンプトン散乱あるいはハドロン放射

EGRETでは、位置決定精度が悪くて
完全に同定できなかった。

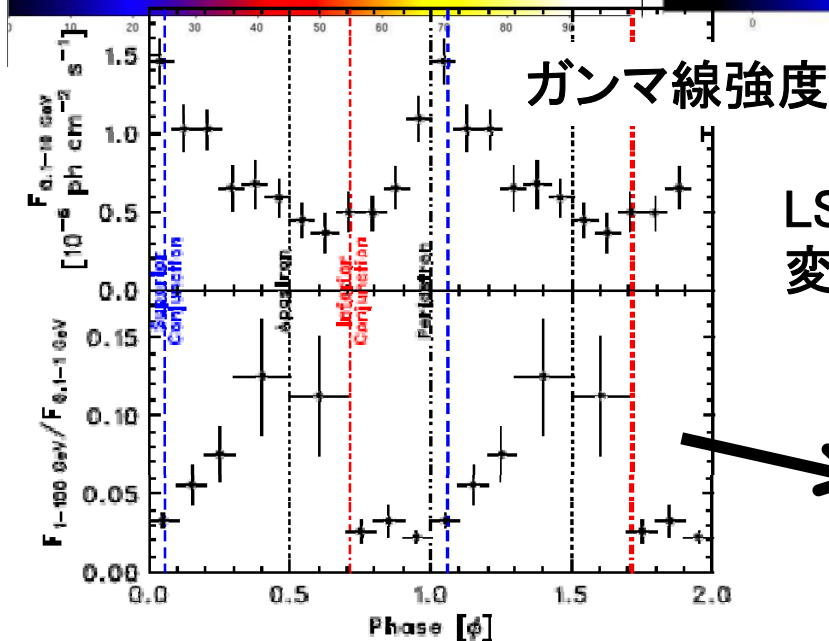
LS 5039

フェルミのイメージ



周囲の放射をモデル化して差し引いた

LS5039の位置に天体を検出



LS5039の連星軌道に同期したガンマ線の時間変動も検出 → LS5039に同定

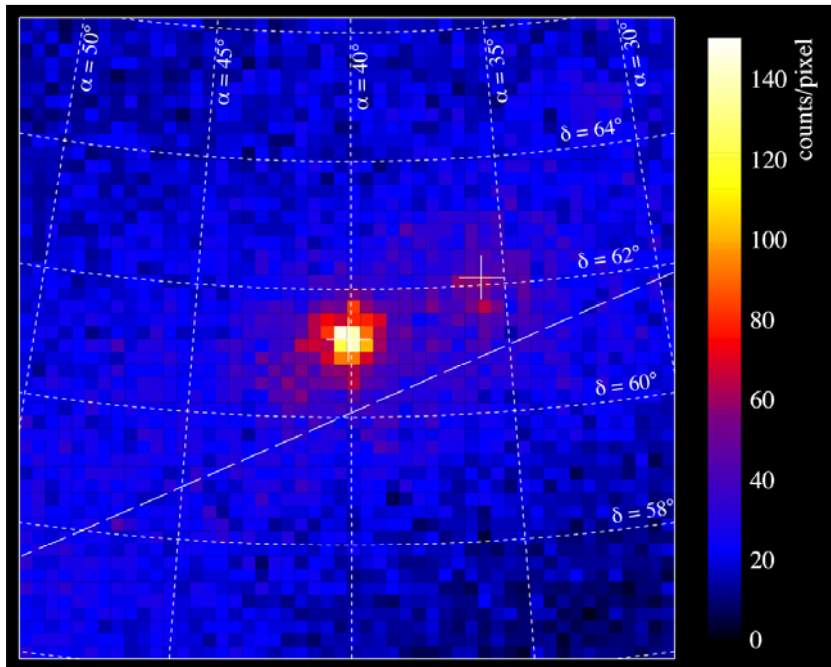
連星軌道周期 3.9日

→ $F(1-100\text{GeV})/F(0.1-1\text{GeV})$

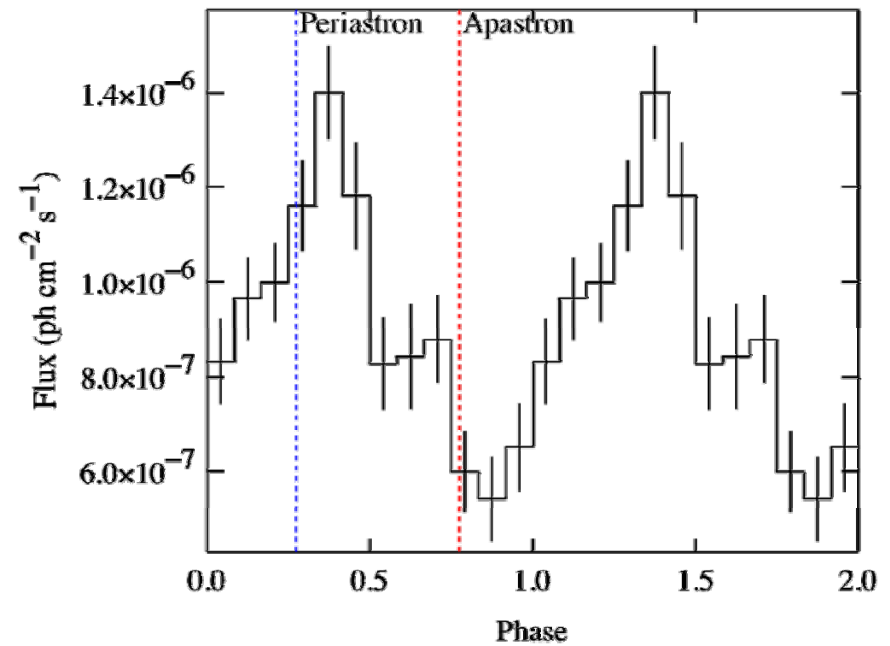
軌道周期に同期してスペクトルも変動

LS I +61° 303

フェルミのイメージ

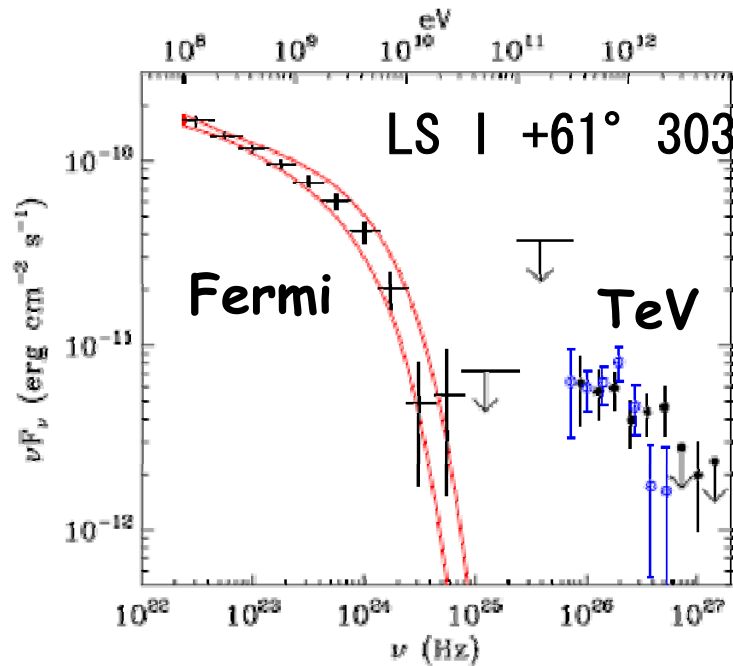


位置は連星に一致

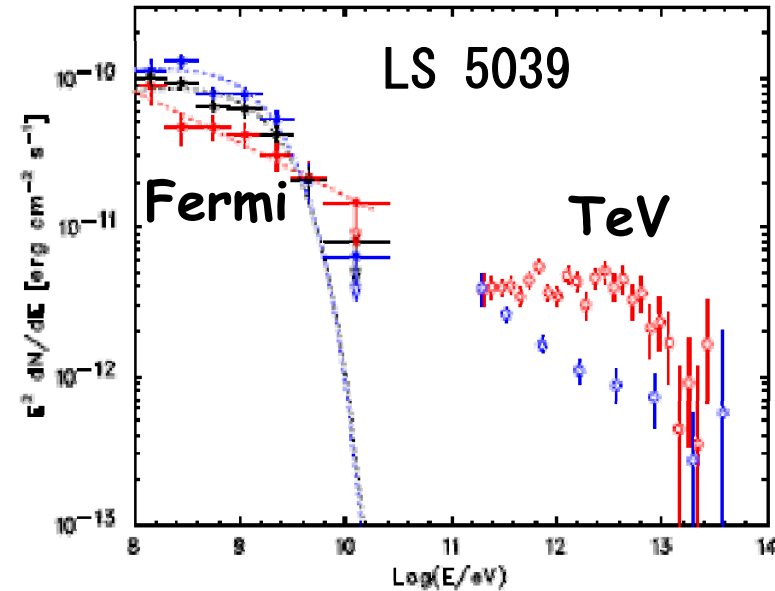


軌道周期 26.6 ± 0.5 日のガンマ線変動を検出
→ LS I+61 303に同定

ガンマ線スペクトル



Average spectrum:
 Index: 2.21, Cutoff:
 6.3 GeV



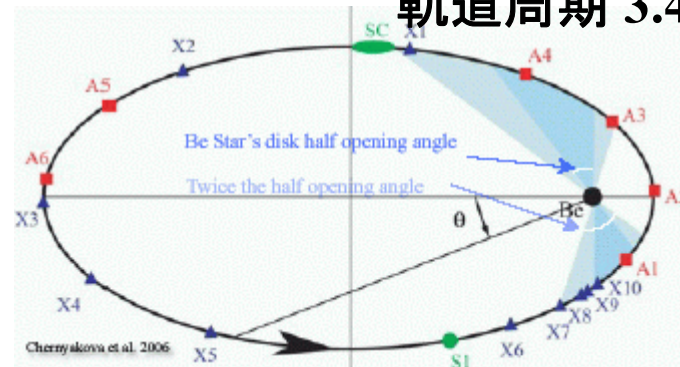
Average spectrum:
 Index: 1.9, Cutoff:
 2.1 GeV

- 両方ともカットオフを持つ→ガンマ線パルサーに似ている。
- 軌道周期に伴うスペクトル変動の原因は不明。

理論モデルと比較する精度良いデータが得られた

PSR B1259-63 パルサー

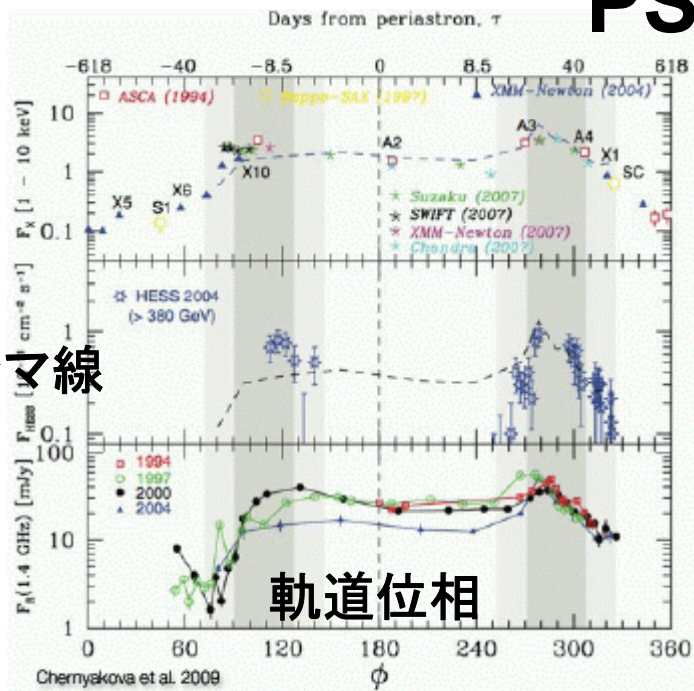
軌道周期 3.4年



TeVガンマ線は、periastron (近日点) の付近でのみ検出

X線

TeVガンマ線

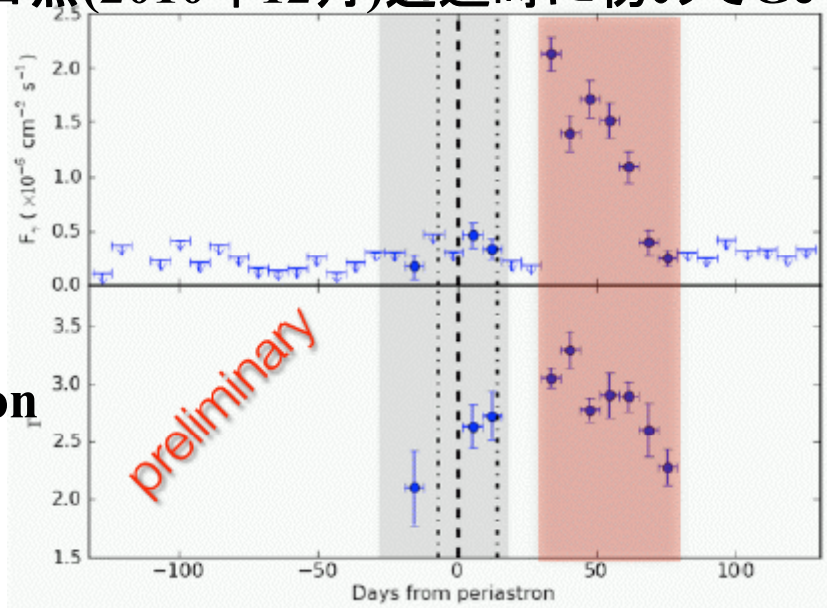


軌道位相

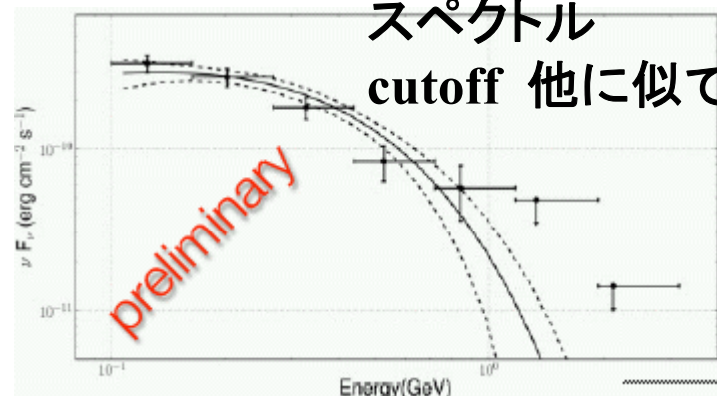
近日点(2010年12月)通過時に初めてGeVガンマ線を検出

flux

Photon index

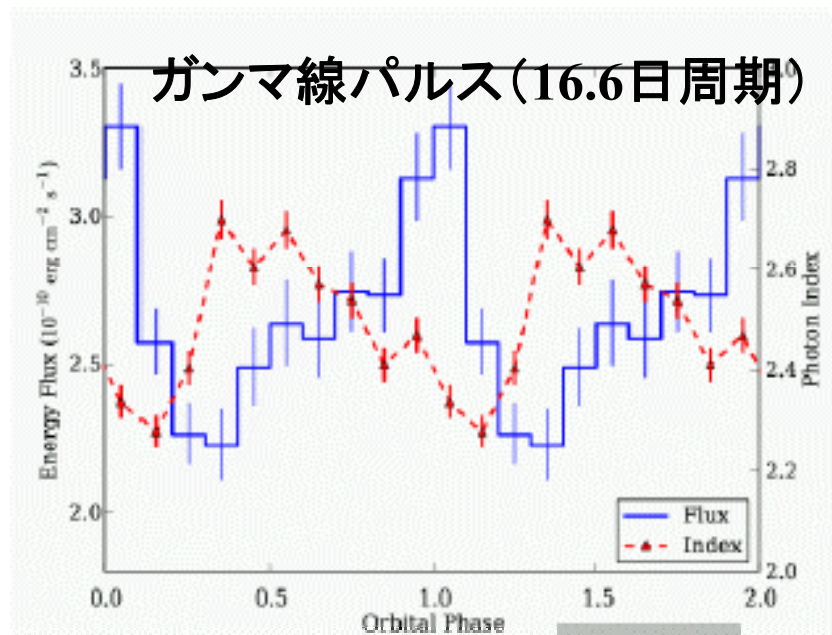


スペクトル cutoff 他に似ている

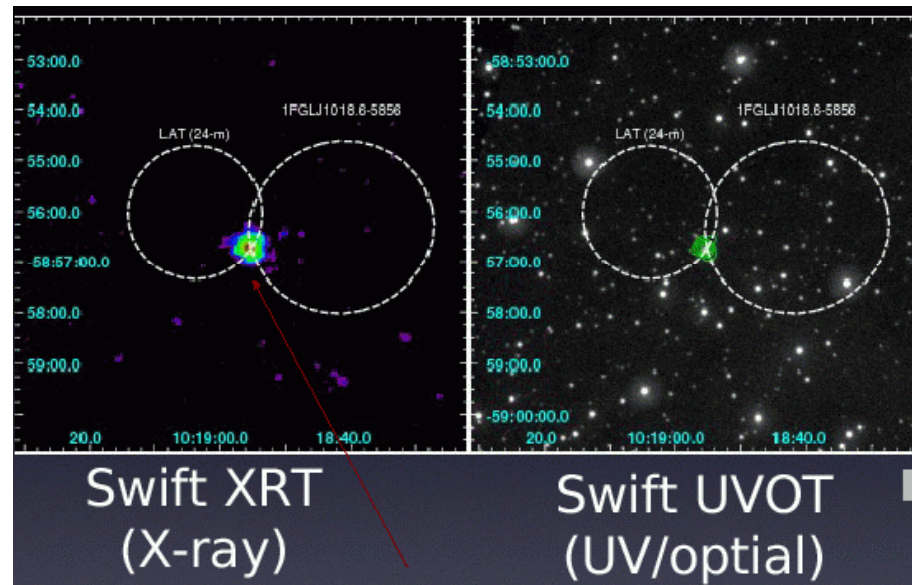


ガンマ線パルスは未検出
明るさは、回転エネルギー損失の0.7%
ガンマ線パルサーに比べて小さい

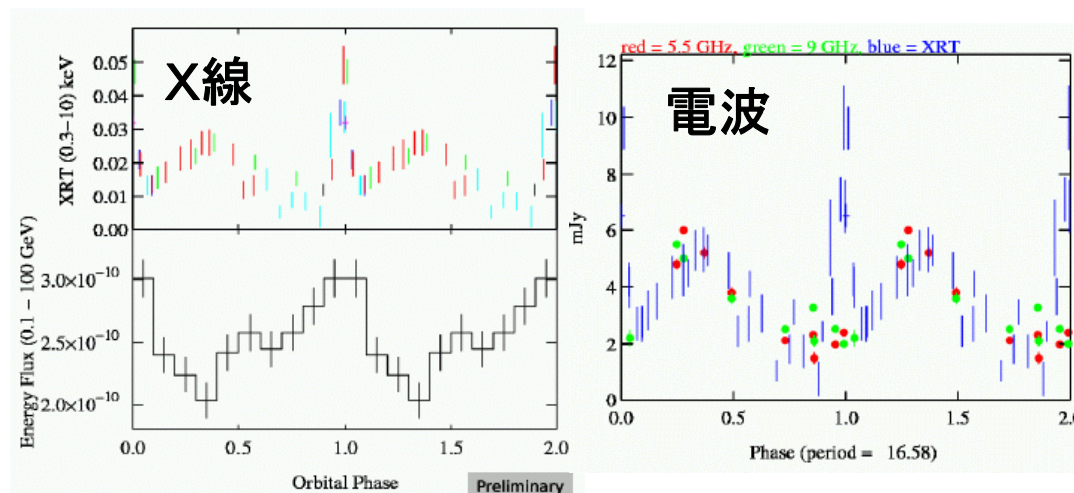
ガンマ線で初めて見つかったガンマ線連星 1FGL J1018.6-5867



2つの円は、ガンマ線位置の誤差(11カ月、2年)



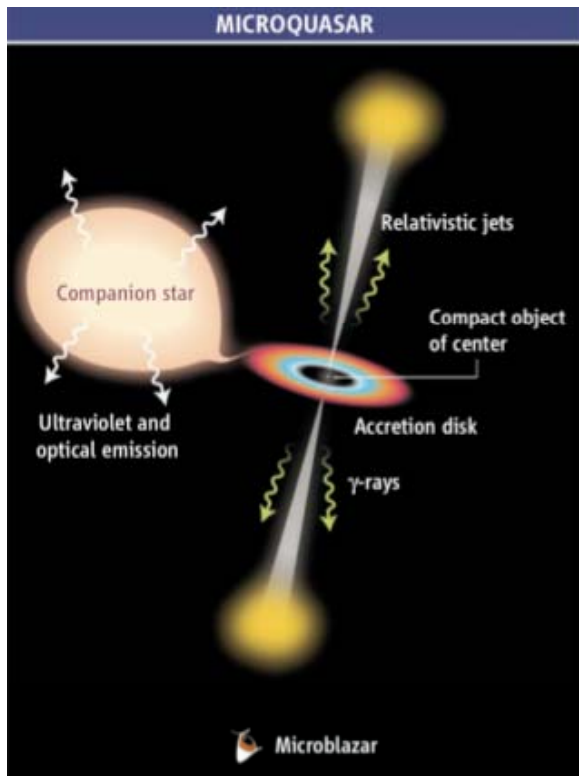
1. フェルミがパルサーを発見
2. X線と可視で同定、同期した変動を検出
3. 電波源も同定



マイクロクエーサー

電波ジェットが観測されている。多くは、ブラックホールか中性子星を含む連星
電波と硬X線の相関 X線はジェット起源??

CygX-3もマイクロクエーサーの1つだが、ガンマ線検出は不確定。
CygX-(ブラックホール連星)からは、一度だけTeVガンマ線フレア。



相手の星が軽い時

ジェットからの放射(逆コンプトン散乱)が予想される
実際、電波や可視光でシンクロトロンが見えている

相手の星が重い時

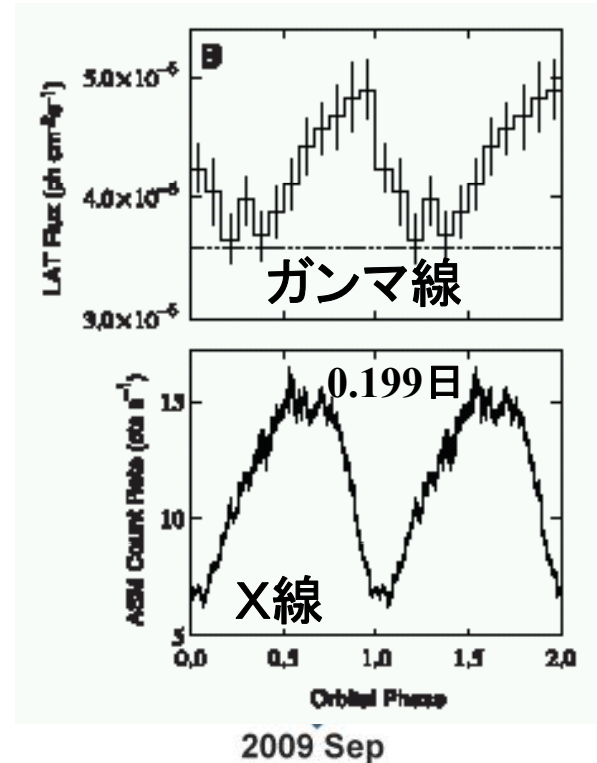
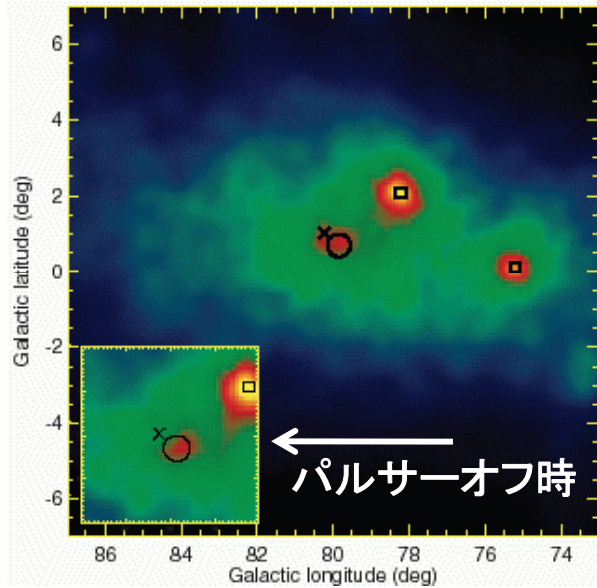
ジェットが星の強い紫外線や星風と激しく相互作用
してガンマ線が発生? CygX-1, CygX-3

X線連星 CygX-3

CygX-3の位置に検出
(ただし、そばに明るいパルサーがいた)

CygX-3の軌道周期に同期したガンマ線変動→同定

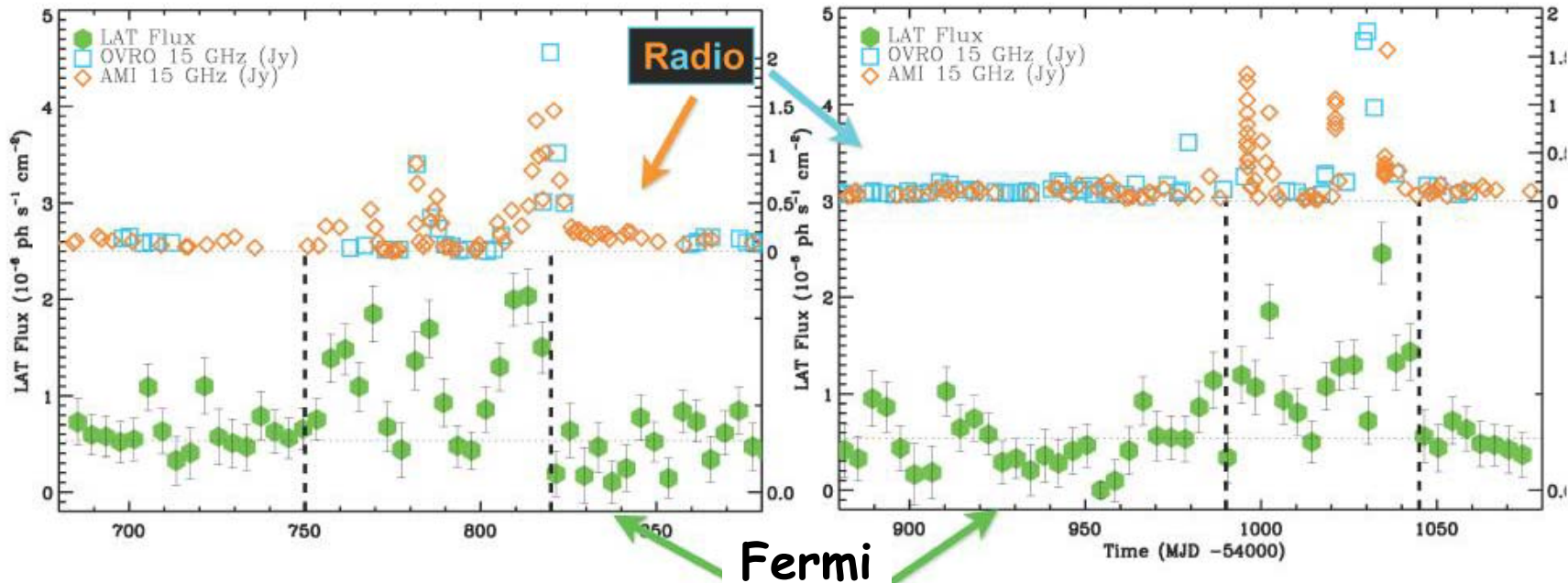
さらに、電波フレアと同期してガンマ線も明るくなった。

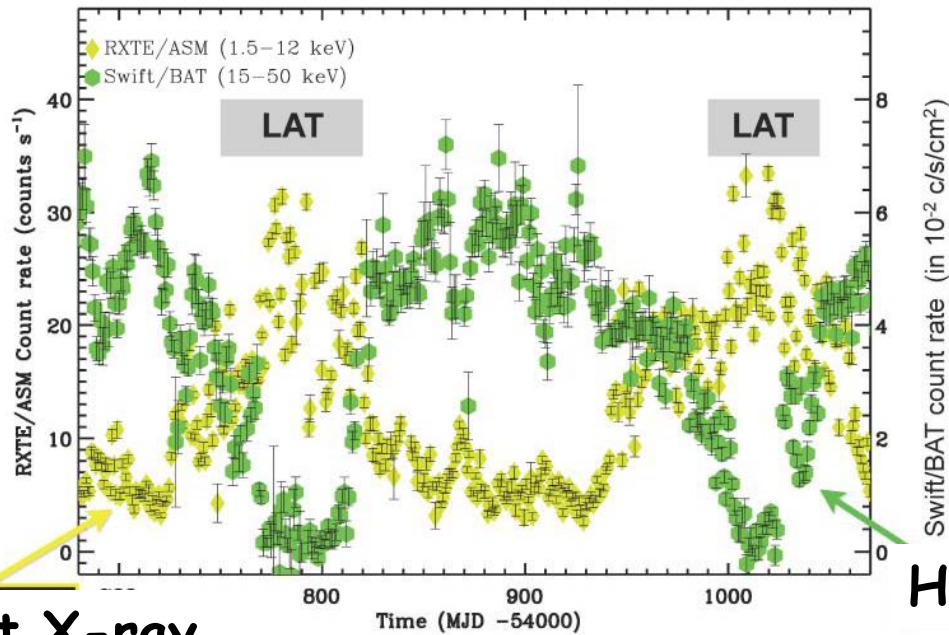


2008 Aug

2009 Feb

2009 Sep



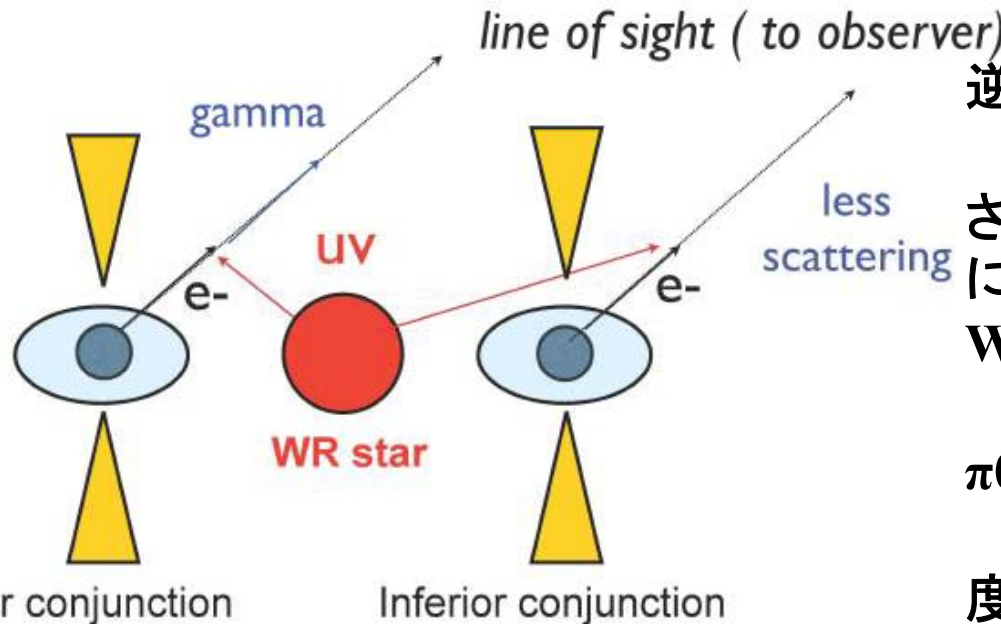


Soft X-ray

Hard X-ray

ガンマ線で明るい時期は、soft stateに一致

Soft stateにみられるX線ハードテールがべき2でガンマ線まで伸びているが、フェルミでは、べきが2.7(カットオフ?)



逆コンプトン散乱の場合

ガンマ線変動は、ジェットと散乱される紫外線の入射角度が軌道に伴って変化することが原因

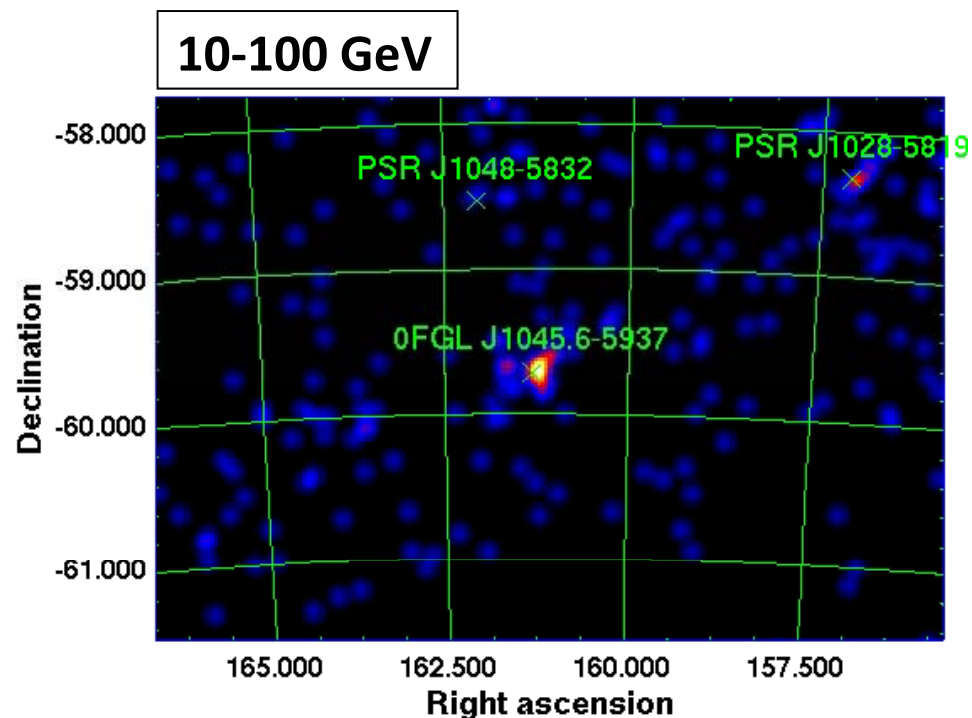
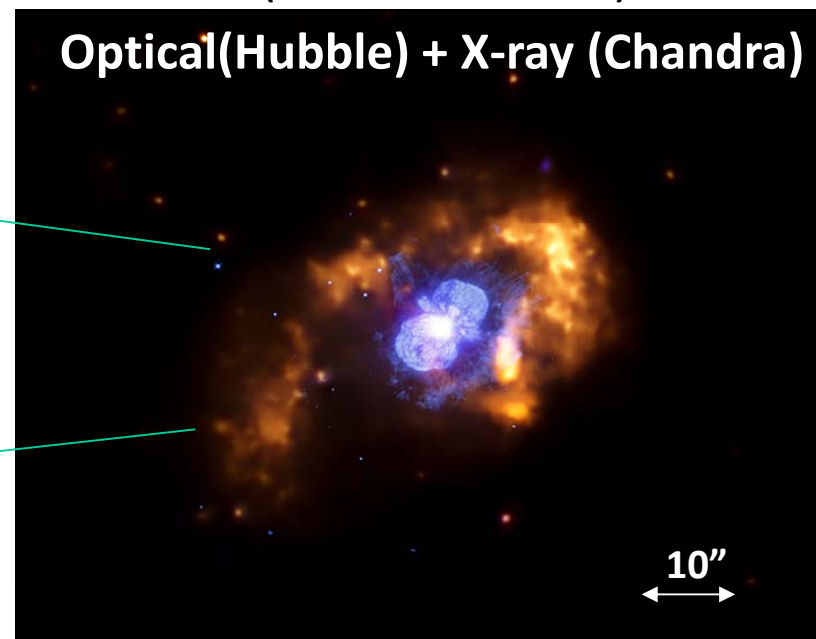
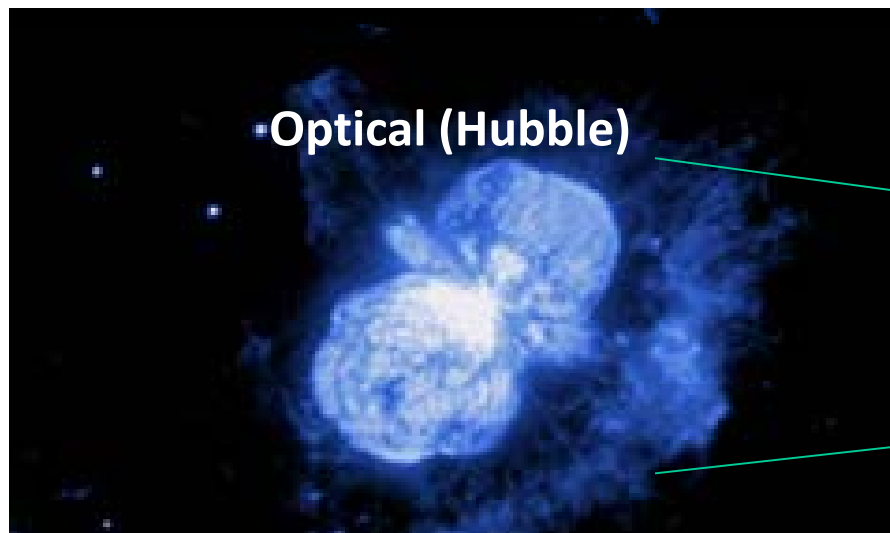
W_e は熱エネルギーの10%

π^0 崩壊の場合

ジェットと星風の相互作用の角度の変化

W_p が熱エネルギーに匹敵

Eta Carinae (100M. 程度の重い星を含む恒星連星) (Chandra Photo Album)



Eta Carinaの位置にガンマ線検出

LAT error circle

+/-0.030 deg (stat.)

+/- 0.003 (syst.)

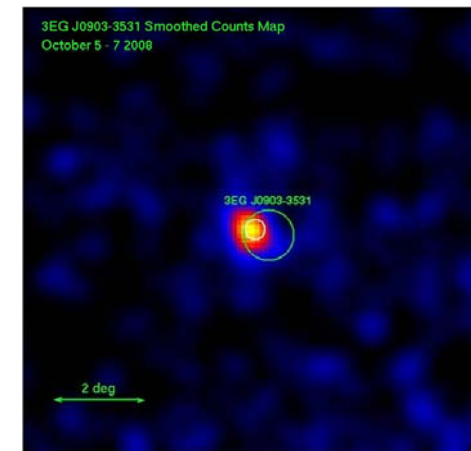
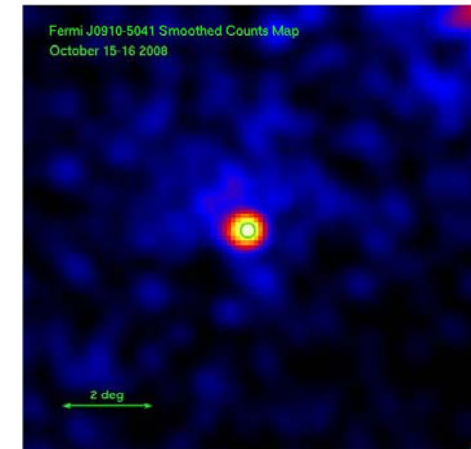
AGILEがガンマ線フレアを報告しているが、フェルミでは確認されず

現状では変動同期が見られず、同定が確定していない

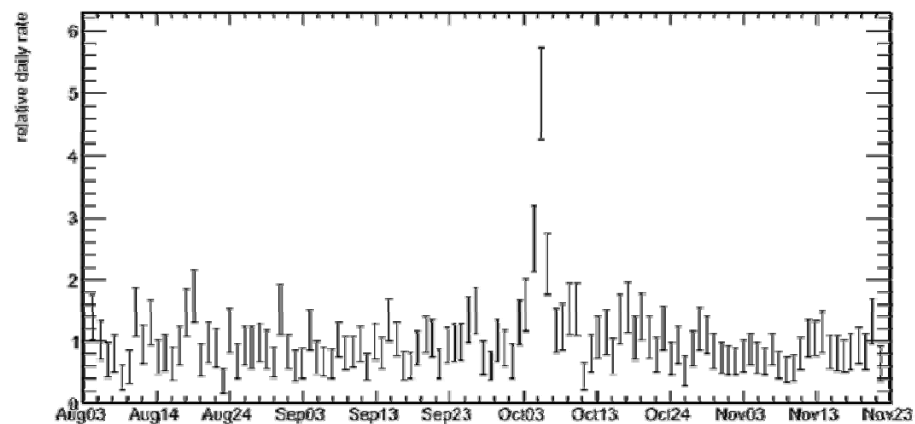
銀河面では、時々ガンマ線フレアアップする天体がいる

フェルミ衛星は、毎日数時間おきに全天をサーベイ
時々、このような天体を発見する。

ただし、相手が何者か同定できない場合が多い。



3EG J0903-3531

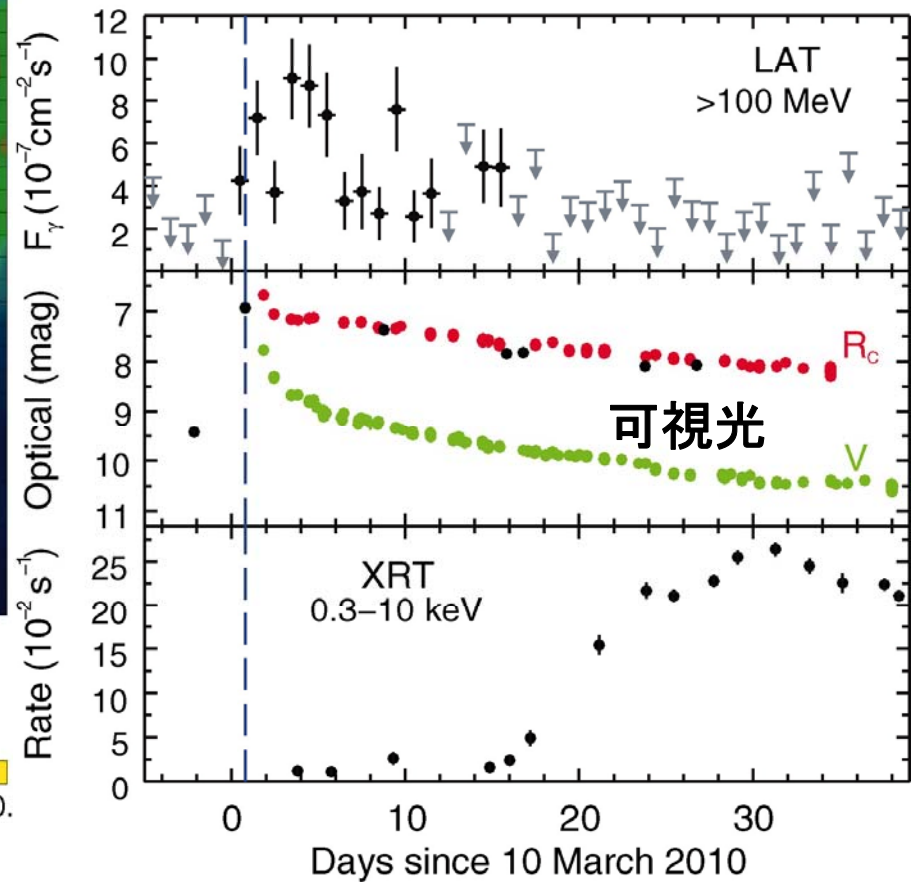
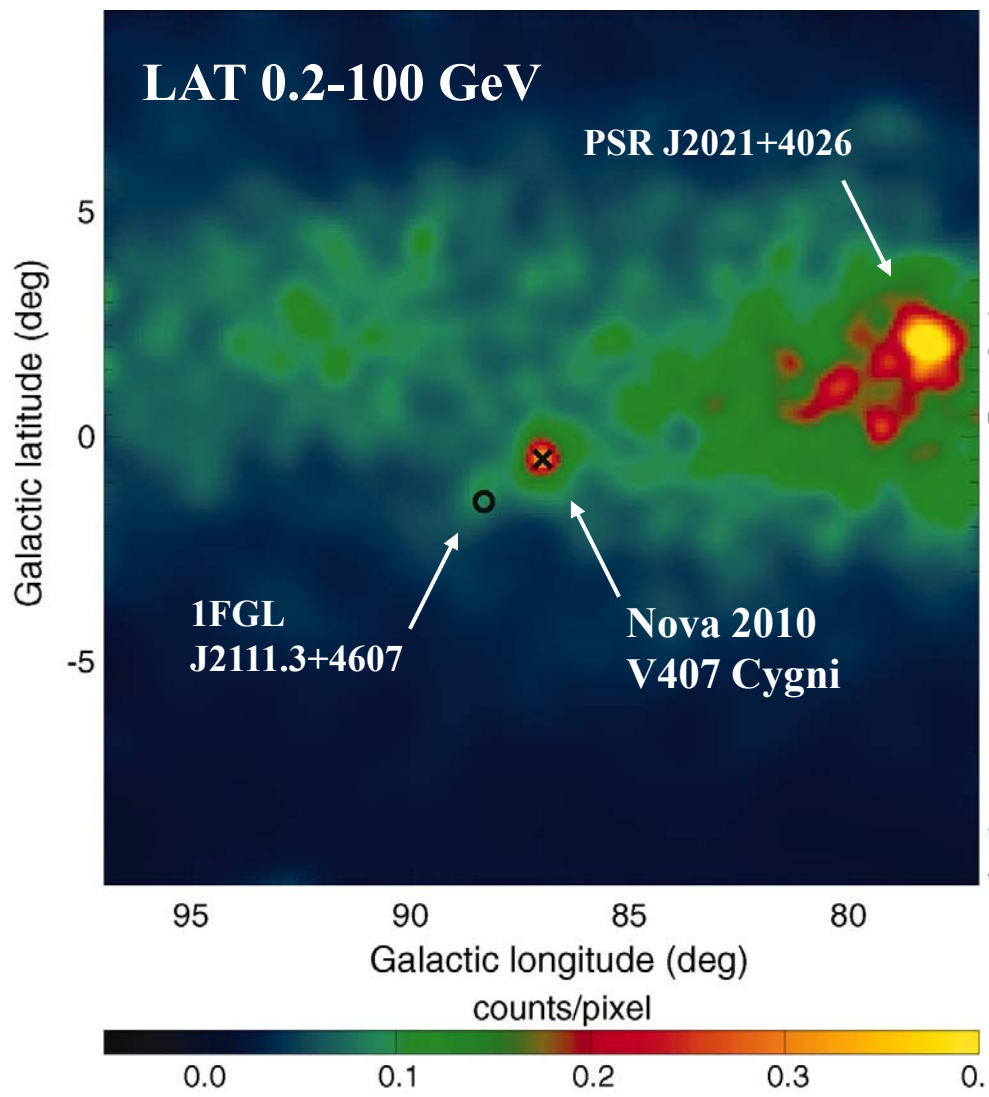


相手が同定された唯一の例（思わぬ発見）

ある時、ガンマ線でフレアアップした天体を発見。

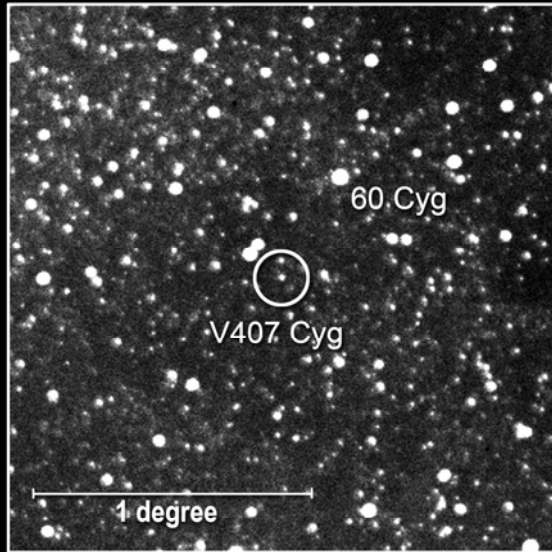
遑って調べると、その位置にいる矮新星が明るくなった時に同期

→ 新星 V 407 Cyg からガンマ線と同定

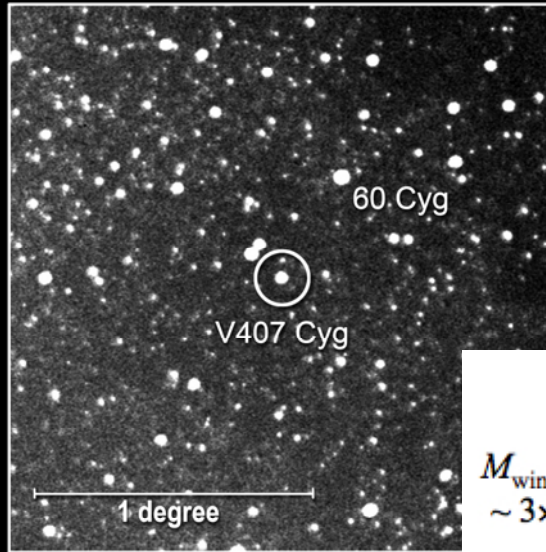


新星 V407 Cyg

Nova Cygni 2010 in Visible Light



March 7, 20:36 UT



March 10, 19:08 UT

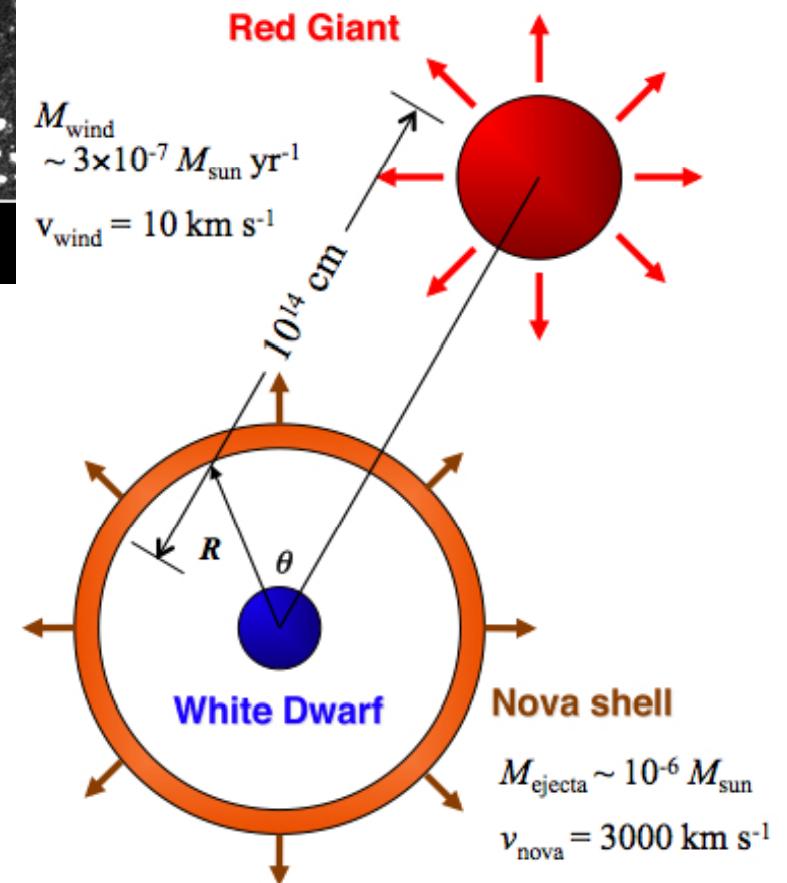
■ 距離~2.7 kpc

■ 赤色巨星 + 白色矮星の連星

■ 静穏期~12等,

■ peak 6.9等

日本のアマチュア天文家が発見。その後、京大望遠鏡で確認。



未同定ガンマ線天体

フェルミの検出した630個の天体の約半数が、他波長で未同定のまま
多くは、位置決定精度が悪いため
一部は、位置決定精度が良いにも関わらず見つからない

銀河面に沿った天体

星生成領域に付随するものが多い

超新星残骸と分子雲の衝突？、マイクロクエーサー？
パルサー？

銀河面から離れた天体も多い

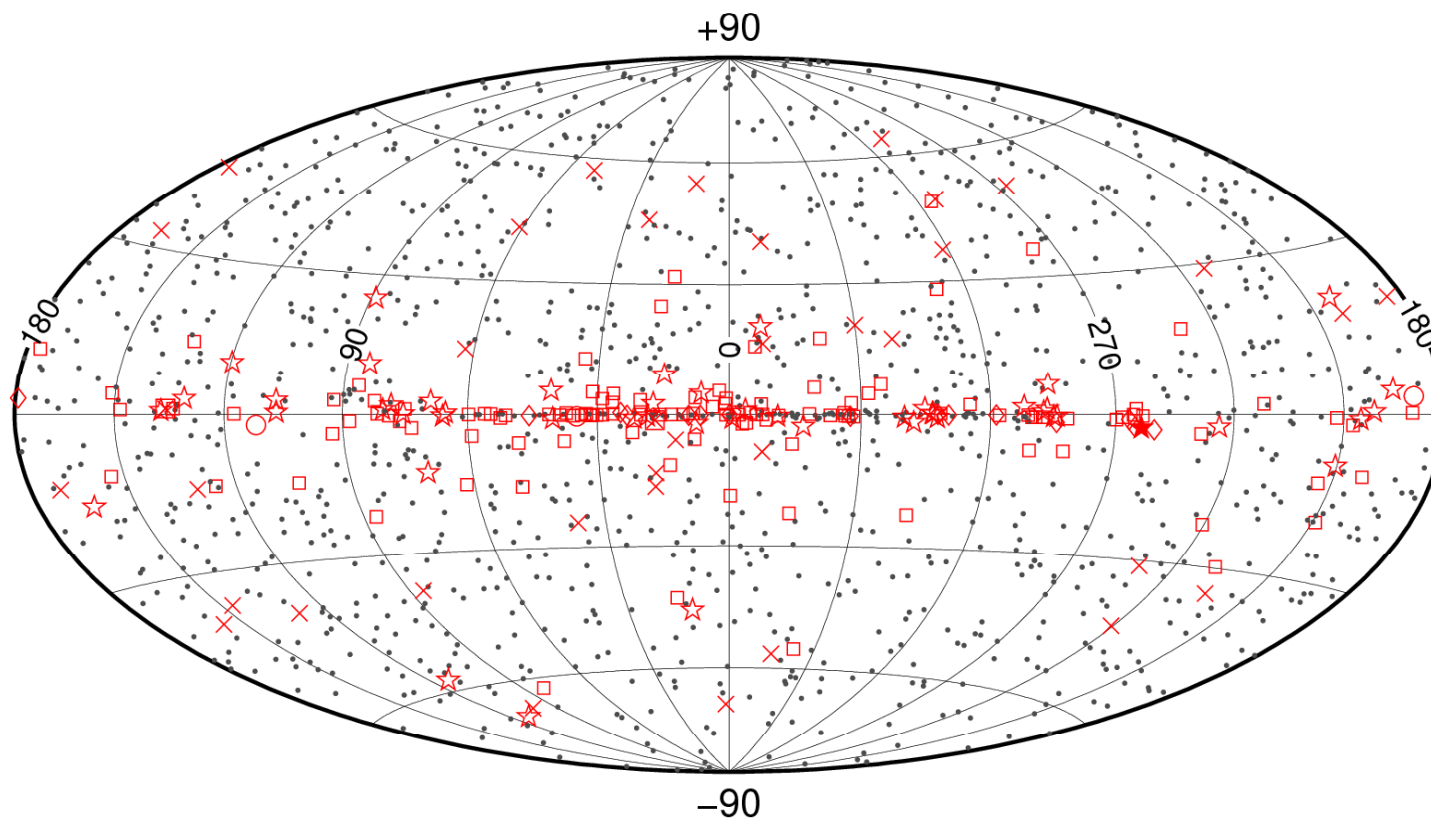
他の波長で暗いAGN？、銀河団？

TeV未同定天体もある

多くは、X線観測によりパルサー星風らしいことがわかりつつある

ガンマ線スペクトルが曲がっているもの

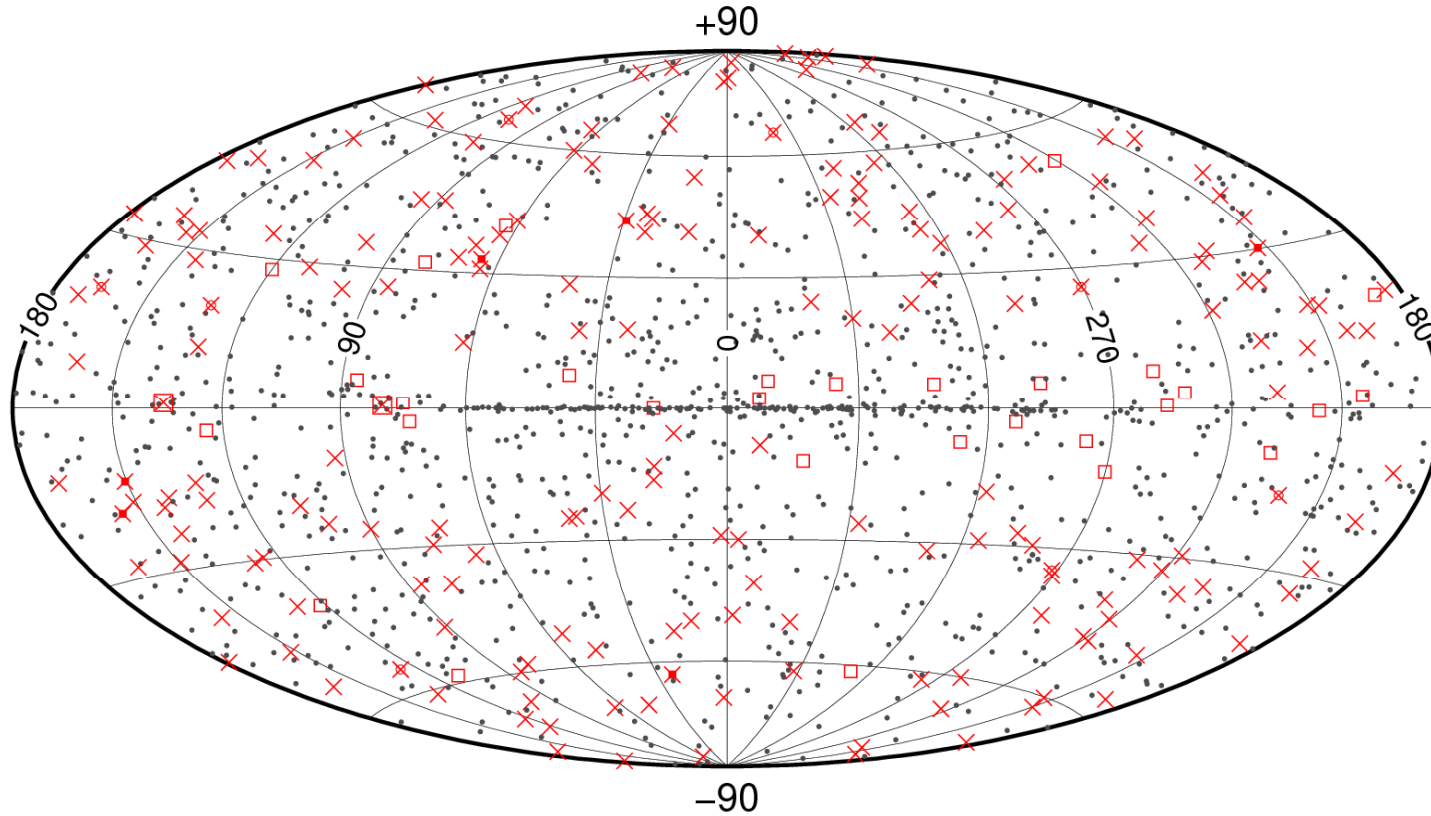
パルサーあるいはブレイザーに似たもの



| | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| □ Unassociated | × AGN – blazar | × AGN – unknown |
| ◇ Potential SNR | * Starburst Gal | × AGN – non blazar |
| ☆ Pulsar | ★ Pulsar w/PWN | + Galaxy |
| ○ SNR | ⊠ XRB or MQO | △ Globular cluster |

時間変動を示すもの

ブレーザーに似たもの



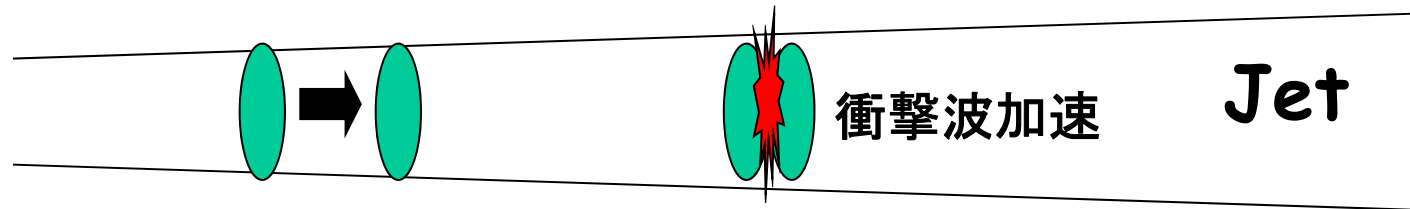
| | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| □ Unassociated | × AGN – blazar | × AGN – unknown |
| ◇ Potential SNR | * Starburst Gal | × AGN – non blazar |
| ☆ Pulsar | ★ Pulsar w/PWN | + Galaxy |
| ○ SNR | ⊠ XRB or MQO | △ Globular cluster |

5. ガンマ線バースト

GRBの現在の描像 (火の玉モデル Fire Ball model)

何かが爆発して、ジェット(相対論的流れ)がある方向に出る

ジェット内で内部衝撃波発生($\sim 10^{13}\text{cm}$) \longrightarrow Prompt放射

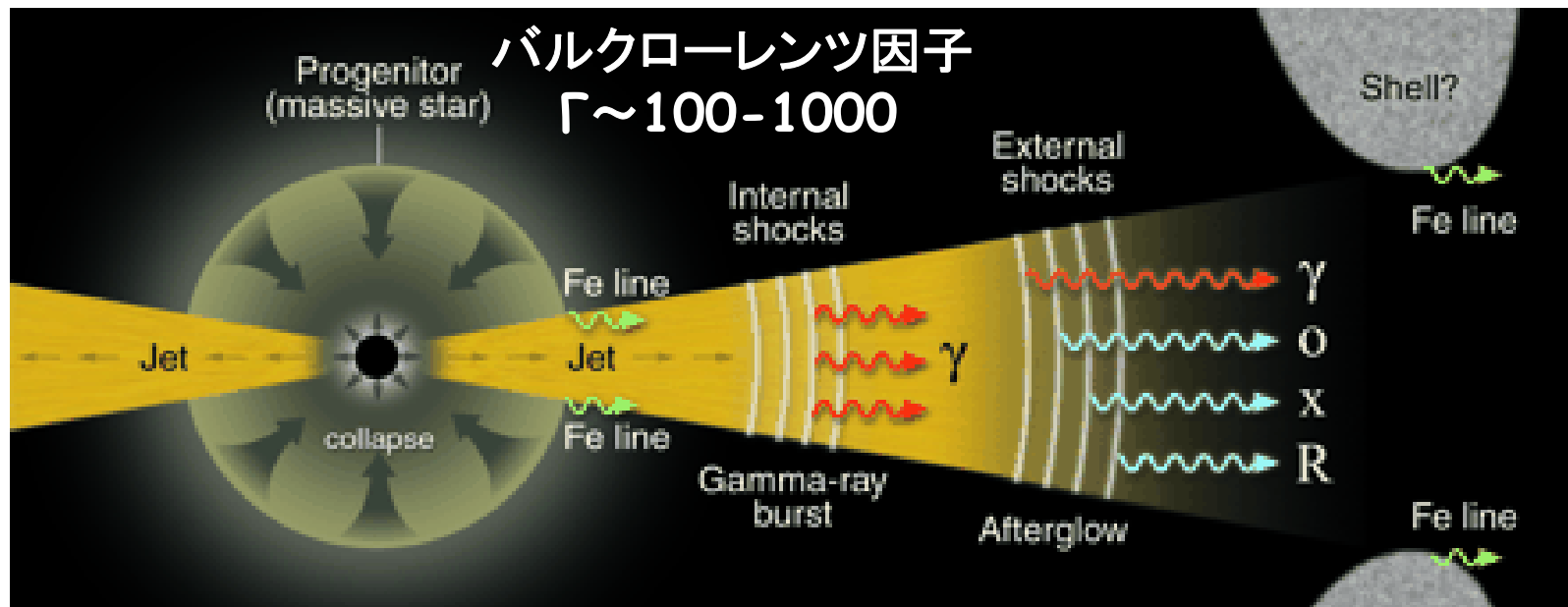


ジェットが周囲の星間物質と衝突して外部衝撃波形成($\sim 10^{16}\text{cm}$)

\longrightarrow 残光

両方とも、シンクロトン放射と考えられている
(外部衝撃波については、ほぼ確立している)

Meszaros+02



ガンマ線バーストの現状とフェルミ衛星による研究

残光については、細かいことを除いて外部衝撃波モデルの描像で合う
Prompt放射については、最近は、あまり進展がない。

フェルミ衛星によるPrompt放射のガンマ線の詳細な研究が必要

ジェットの力学的エネルギー(バルクローレンツ因子)

放射機構はシンクロトロンで良いのか？(火の玉からの熱放射？)

ハードテール(他の放射機構は？)

ハドロンの寄与？ 最高エネルギー宇宙線の起源？

EGRETで、発生後4500秒後に検出された18GeVガンマ線は？
(GRB940217) 中心エンジンの継続時間は長い？

量子重力効果の制限

promptガンマ線スペクトル

Broken powerlaw

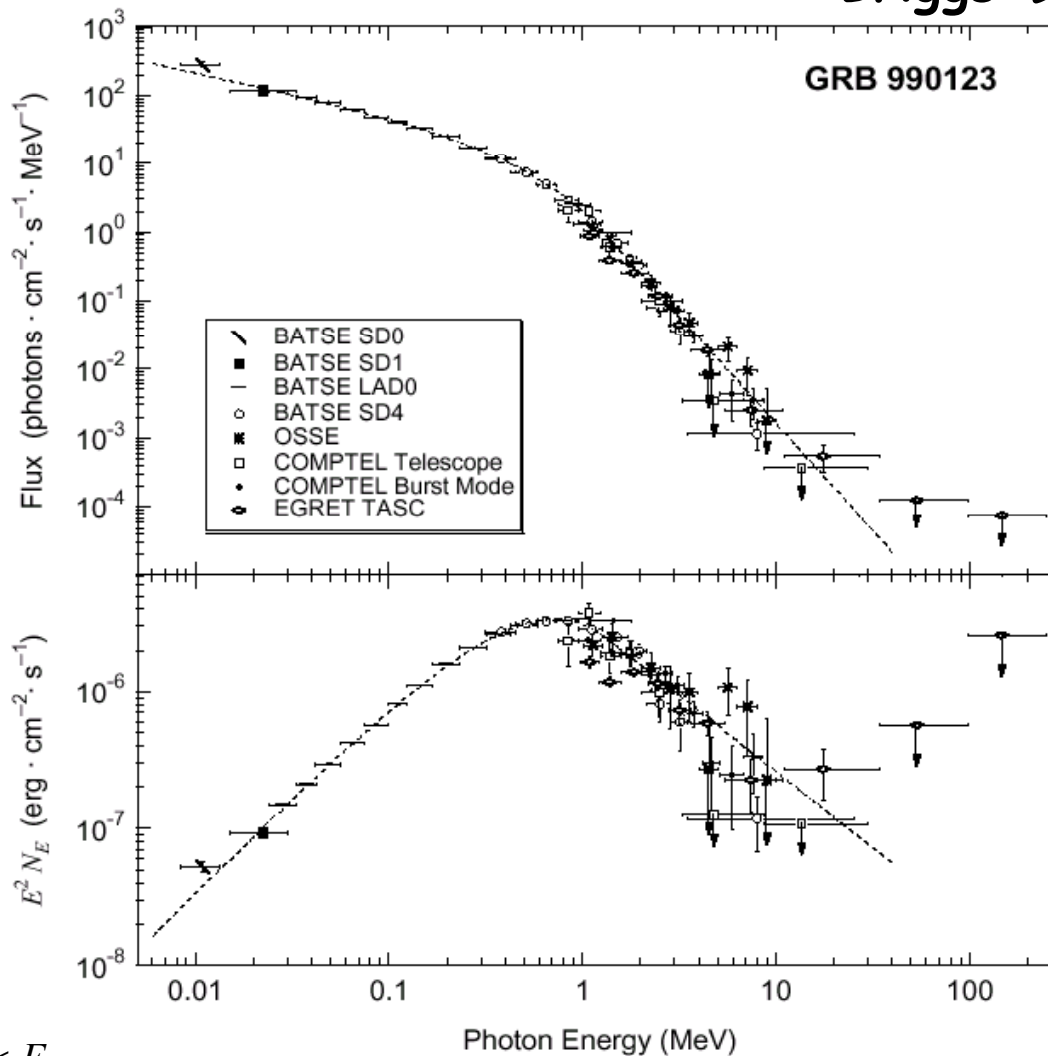
or Band function

Briggs+99

折れ曲がりのエネルギー E_{break}
 特徴的な物理量
 何かを反映したもの

Band Function (Band+93)

特に理論的な意味は無いが、ほとんどのGRBのPromptのスペクトルは、これで再現できる

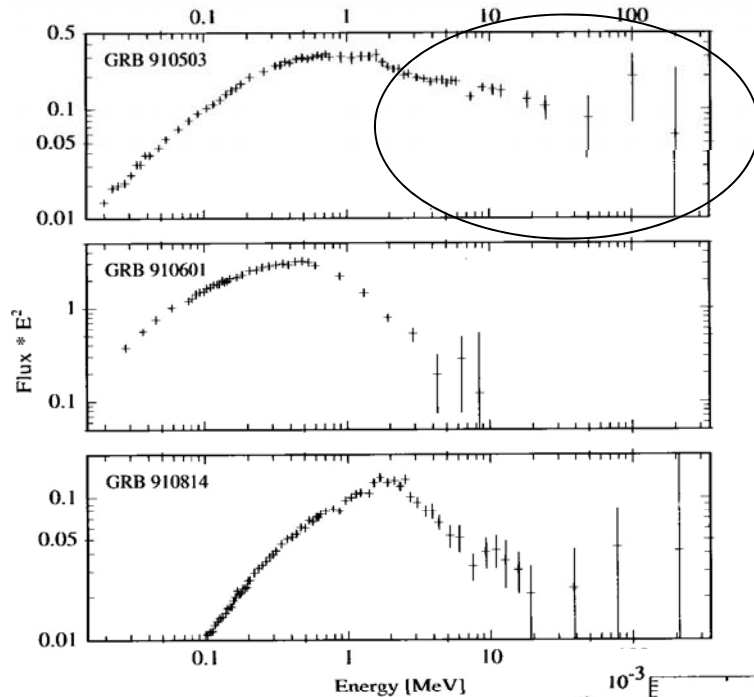


$$n(E) = \begin{cases} AE^\alpha \exp\left(-\frac{E(2+\alpha)}{E_{peak}}\right) & E < E_c \\ A\left(\frac{(\alpha-\beta)E_{peak}}{2+\alpha}\right)^{\alpha-\beta} \exp(\alpha-\beta)E^\beta & E \geq E_c \end{cases}$$

$$E_c = \frac{(\alpha-\beta)E_{peak}}{2+\alpha}$$

ハードテール

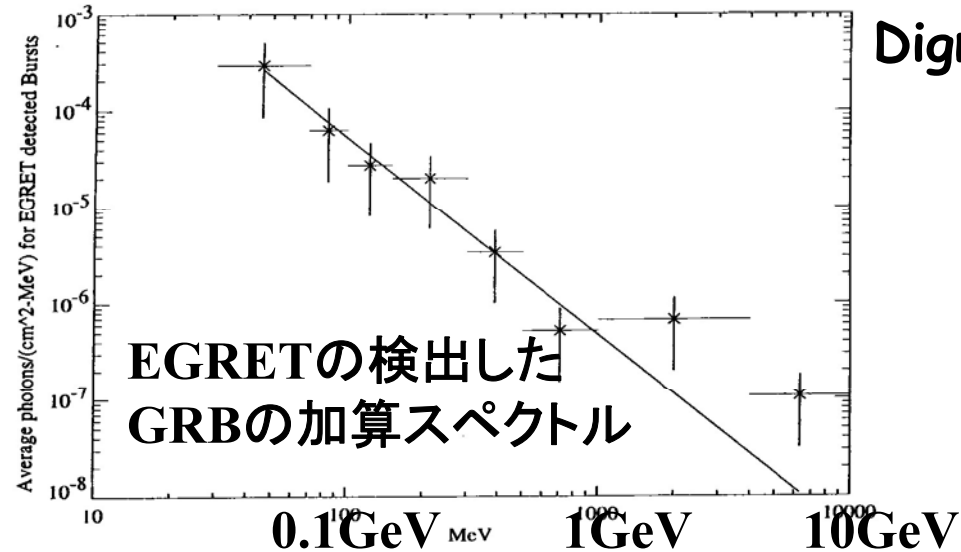
CGRO BATSE/COMPTEL/EGRETが検出



EGRETでは、7つのGRBからGeVガンマ線が検出されたが、光子数が少なくて、精度良い結果が得られなかった。

どれくらいのエネルギーまで伸びているか？

ハードテールの存在するものがある



Dignus+98

EGRETの検出したGRBの加算スペクトル

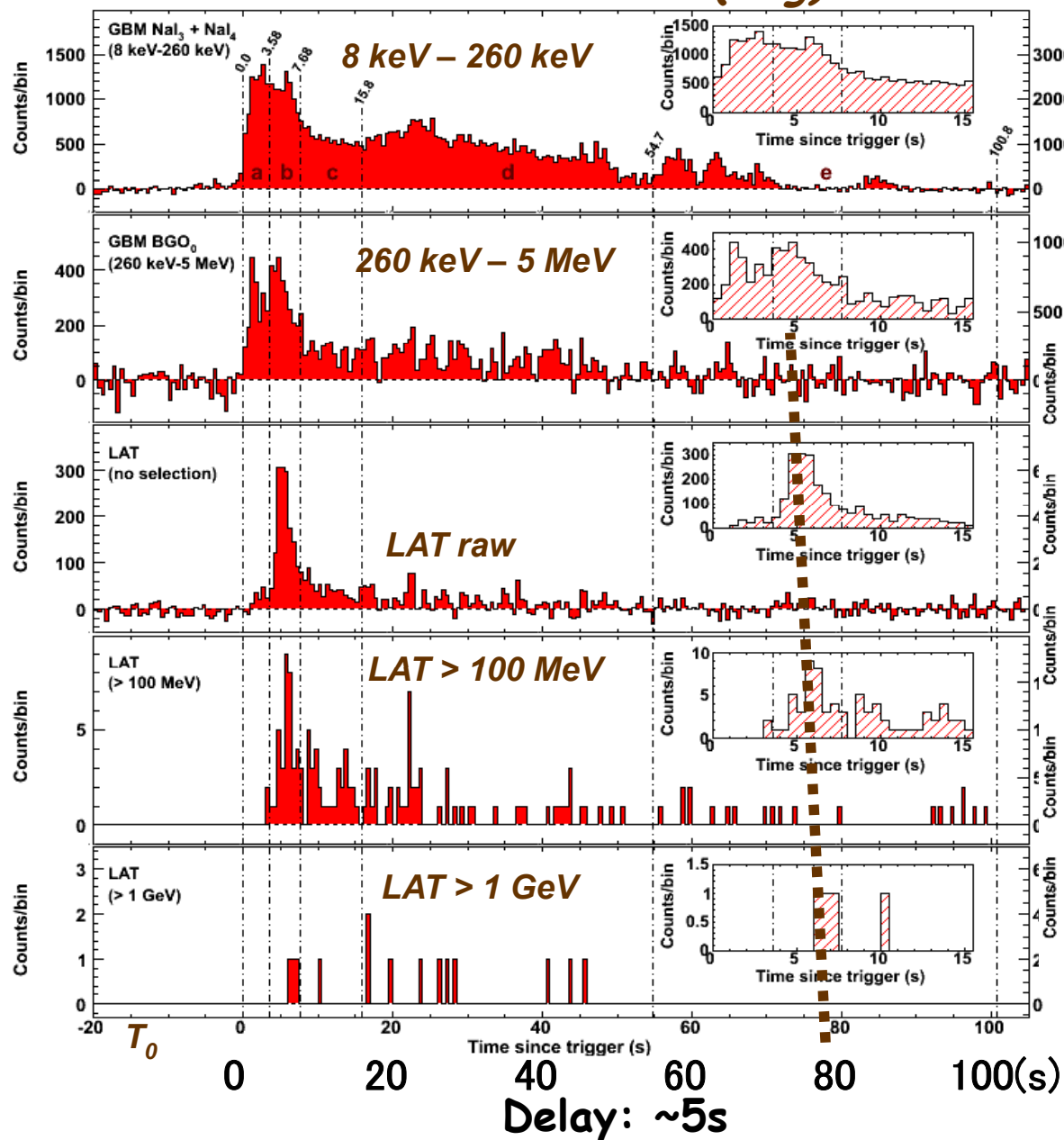
| GRB1 | Angle from LAT | Duration (or class) | # of events > 100 MeV | # of events > 1 GeV | Delayed HE onset | Long-lived HE emission | Extra spectral comp. | Highest photon Energy | Redshift |
|----------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| 080825C | ~ 60° | long | ~ 10 | 0 | ? | ✓ | X | ~ 600 MeV | |
| 080916C | 49° | long | 145 | 14 | ✓ | ✓ | ? | ~ 13.2 GeV | ~ 4.35 |
| 081024B | 21° | short | ~ 10 | 2 | ✓ | ✓ | ? | 3 GeV | |
| 081215A | ~ 86° | long | — | — | — | — | -- | — | |
| 090217 | ~ 34° | long | ~ 10 | 0 | X | X | X | ~ 1 GeV | |
| 090323 | ~ 55° | long | ~ 20 | > 0 | ? | ✓ | ? | | 3.57 |
| 090328 | ~ 64° | long | ~ 20 | > 0 | ? | ✓ | ? | | 0.736 |
| 090510 | ~ 14° | short | > 150 | > 20 | ✓ | ✓ | ✓ | ~ 31 GeV | 0.903 |
| 090626 | ~ 15° | long | ~ 20 | > 0 | ? | ✓ | ? | | |
| 090902B | 51° | long | > 200 | > 30 | ✓ | ✓ | ✓ | ~ 33 GeV | 1.822 |
| 090926 | ~ 52° | long | > 150 | > 50 | ✓ | ✓ | ✓ | ~ 20 GeV | 2.1062 |
| 091003A | ~ 13° | long | ~ 20 | > 0 | ? | ? | ? | | 0.8969 |
| 091031 | ~ 22° | long | ~ 20 | > 0 | ? | ? | ? | ~ 1.2 GeV | |
| 100116A | ~ 29° | long | ~ 10 | 3 | ? | ? | ? | ~ 2.2 GeV | |
| 100225A | ~60 | long | ~10 | 1 | ? | ? | | ~9.5 GeV | |
| 100325A | ~10 | long | ~5 | 0 | ? | ? | ? | 800 MeV | |
| 100414A | ~70 | long | ~20 | > 0 | ? | ? | ? | 4 GeV | |

GeV領域での立ち上がりの遅れ

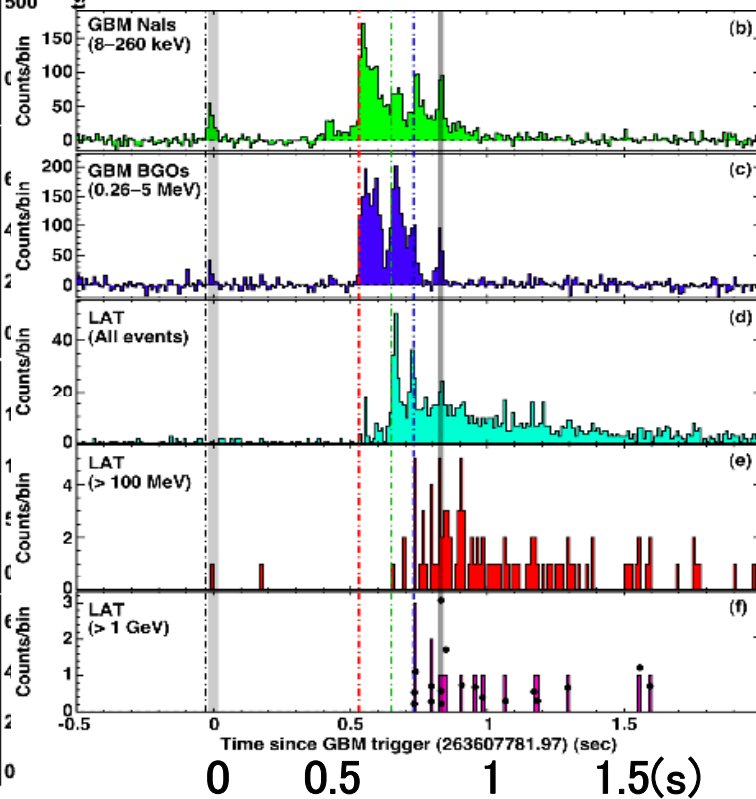
GRB 080916C (long)

ほぼすべてのGRBで見られる

1. Opacity effect
2. 量子重力効果
3. 加速の時間



GRB 090510 (short)



Limits on Lorentz Invariance Violation (LIV)

量子重力効果

ある種の量子重力理論は相対論のローレンツ不変を破る:

光速度はエネルギー依存性をもつ

(真空の量子場と光子が相互作用。屈折率が変化するようなもの)

$$c^2 p_{ph}^2 = E_{ph}^2 \left[1 + \frac{E_{ph}}{M_{QG,1} c^2} + \left(\frac{E_{ph}}{M_{QG,2} c^2} \right)^2 + \dots \right], \quad v_{ph} = \frac{\partial E_{ph}}{\partial p_{ph}} \approx c \left[1 - \frac{1+n}{2} \left(\frac{E_{ph}}{M_{QG,n} c^2} \right)^n \right]$$

エネルギーの高い γ 線ほど、遅れてやってくる

$$\Delta t = \frac{(1+n)}{2H_0} \frac{E_h^n - E_l^n}{(M_{QG,n} c^2)^n} \int_0^z \frac{(1+z')^n}{\sqrt{\Omega_m (1+z')^3 + \Omega_\Lambda}} dz'$$

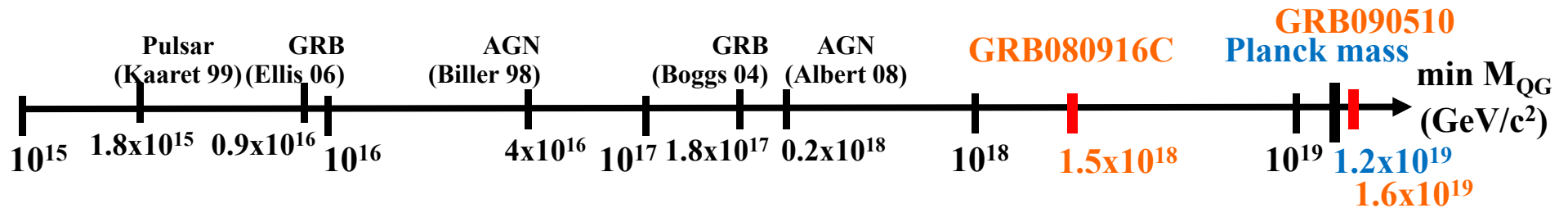
Ellis et al. (2003);
Jacob and Piran (2008)

n = 1,2 for linear and quadratic Lorentz invariance violation, respectively



フェルミ衛星による制限

| GRB | Duration (or class) | # of events > 0.1 GeV | # of events > 1 GeV | Method | Lower Limit on $M_{QG,1}/M_{\text{Planck}}$ | Valid for $s_n =$ | Highest photon energy | Redshift |
|---------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------|---|-------------------------|-----------------------|----------|
| 080916C | long | 145 | 14 | 1 | 0.11 | 1 | ~ 13 GeV | ~ 4.35 |
| 090510 | short | > 150 | > 20 | 1 2 3 | 1.2, 3.4, 5.1, 10 102 1.2 | 1 ± 1 ± 1 | ~ 31 GeV | 0.903 |
| 090902B | long | > 200 | > 30 | 1 | 0.068 | 1 | ~ 33 GeV | 1.822 |
| 090926A | long | > 150 | > 50 | 1,3 | 0.066, 0.082 | 1, 1 | ~ 20 GeV | 2.106 |



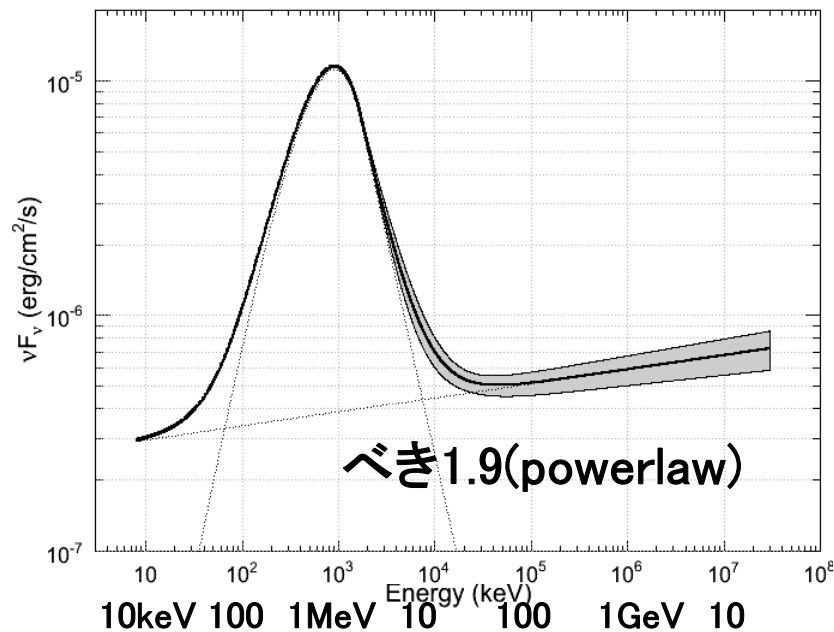
$$M_{QG,1} > 1.60 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2$$

今までのあらゆる観測で最も強い制限

ある種の量子重力理論を棄却する

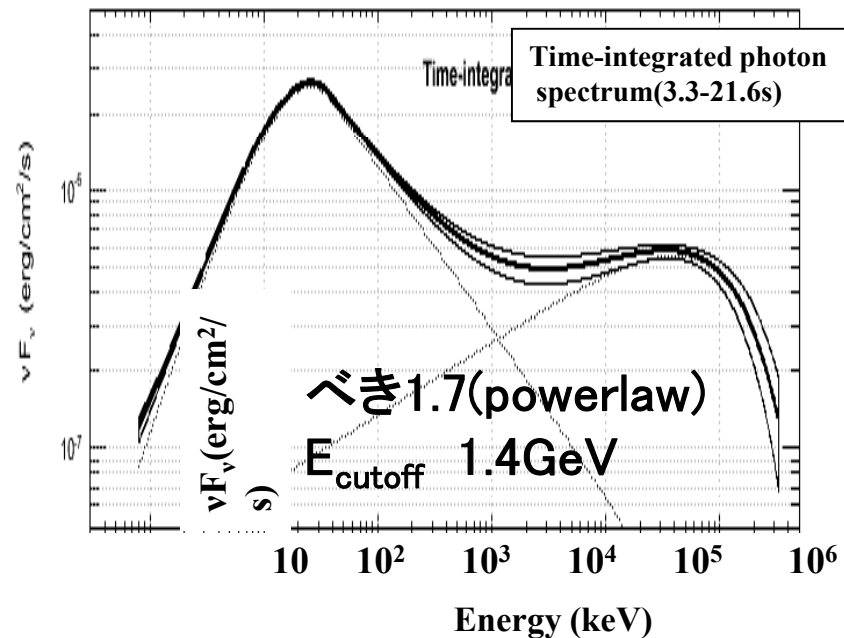
Band functionに対する高エネルギー超過成分の検出

GRB 090902B (long)



発生5秒後から、見えるようになった

GRB 090926A (long)



γ γ 吸収によるカットオフだとすると、
バルクローレンツ因子が決まる
 $\Gamma = 720 \pm 76$ (時間変動 0.15sの場合)

より複雑なモデルの場合には、 Γ は
200くらいにもなりうる

6. 活動銀河核

ブレーザー、新種のガンマ線AGN
背景放射、遠方天体

BLAZAR

QSOと同じく、最初は周囲の銀河が見えないくらい中心が明るい
時間変動が非常に激しい
強い偏光(電波、可視光)
シンクロトロン放射

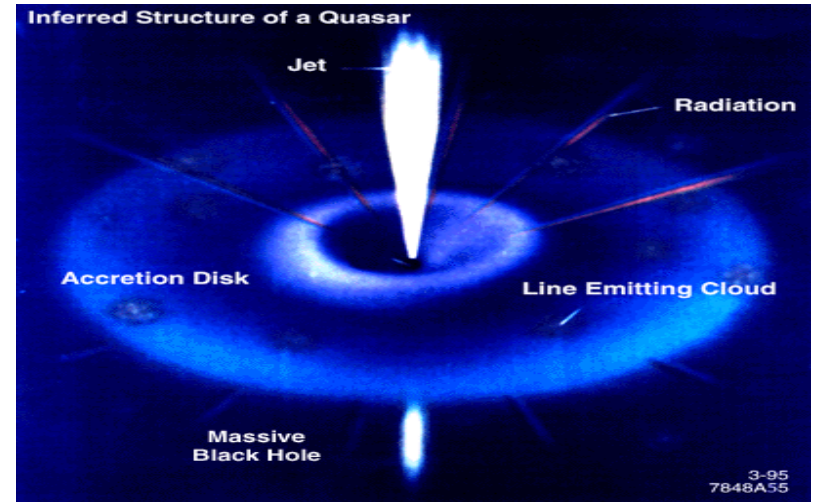
ジェットをほぼ正面から見ている

BL Lac型

可視光スペクトルで輝線が見えにくい
近傍で、光度は小さめ

FSRQ型(OVV-QSO, Radio-loud QSO)

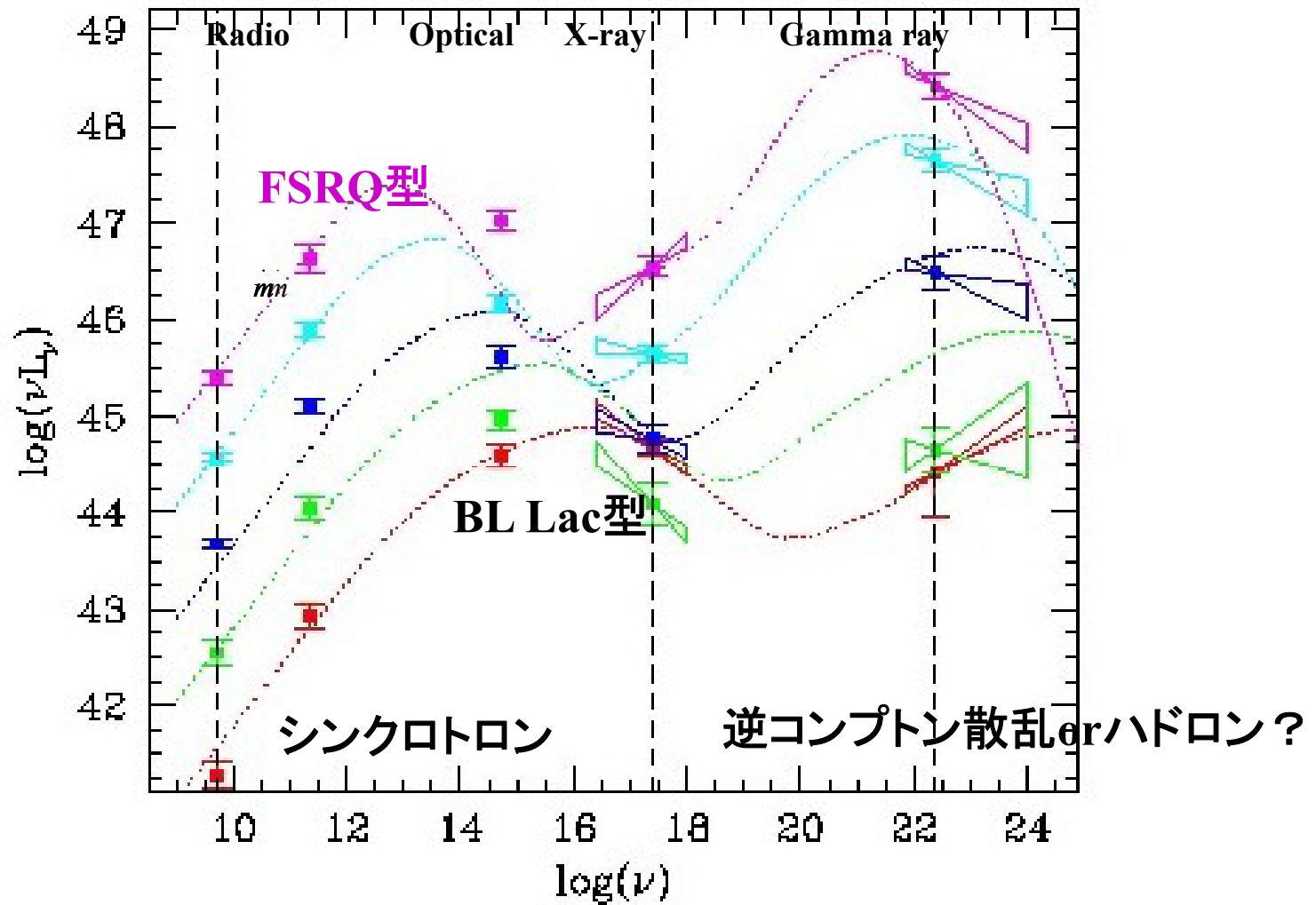
遠方で、光度は大きめ



EGRETで強いガンマ線天体であることがわかった。
その後、TeVガンマ線で主にBL lac型が多く検出されてきた。

BLAZAR Sequence

光度が大きいものほど、スペクトルの2つのピークエネルギーが低エネルギーに移動
 Fossati+98



速い時間変動で非常に明るい高エネルギーガンマ線が放射されていることから、

Compton Catastropheを回避するため、相対論的ビーミング効果の必要性

ビーミングがないと、ガンマ線密度が大きすぎて低エネルギー光子と衝突して、ガンマ線が外に出てこれない

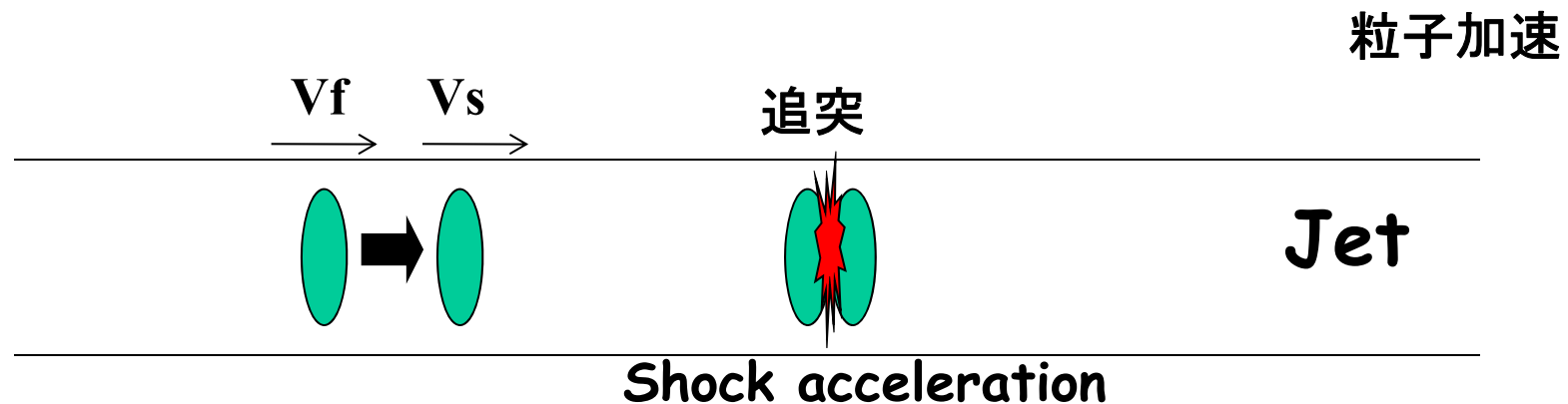
$\gamma = 10^6$ (1TeV)ほどの高エネルギー電子を必要とする。

Jetの Γ (バルクローレンツ因子)は、せいぜい、10

Jetの中で、高エネルギー電子が加速されている。

ジェット中にBlobと呼ばれる塊が違う速度で走っている。

後方の速いものが追いついて衝突。衝撃波形成



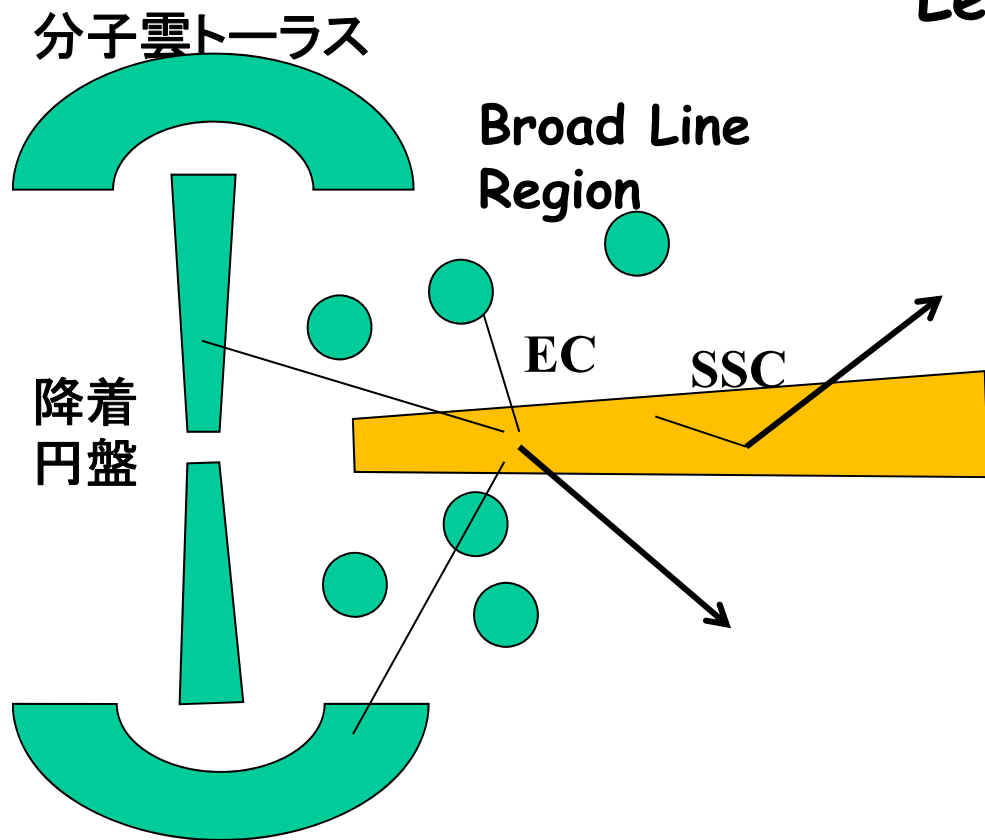
BLAZARのガンマ線放射モデル

Leptonic model

電子陽電子が放射源

Hadronic model

電子陽子が放射源(陽子からの2次粒子生成が放射)



Leptonic modelの場合

Synchrotron Self-Compton

ジェット中の電子がシンクロトロン放射した光子を、そばの電子が逆コンプトン散乱

BL Lac, FSRQ

External Compton

別の場所(降着円盤、broad line Region、分子雲トーラス)から来た光子(赤外線、可視光、紫外線)を、ジェットの電子が逆コンプトン

FSRQ

フェルミで期待されること

EGRETではフレアアップした時だけが見えていたが、フェルミでは暗い時期も連続的に観測可能に。 静穏期の性質やフレア時の特有性質は？

多くのブレーザーをガンマ線で連続的にモニターできるので、それに備えて他の波長での連続モニター体制が整備され、多波長連携モニター観測の質と量が向上 多波長スペクトル変動の理解、電波可視偏光との関係

日本でも、広島大学かなた望遠鏡(可視赤外偏光)、
東工大MITSuME望遠鏡、X線衛星すざく が活躍

TeVブレーザーに加えて、FSRQ型の時間変動を追うことが可能となる

ガンマ線放射機構は？ Leptonic or hadronic?

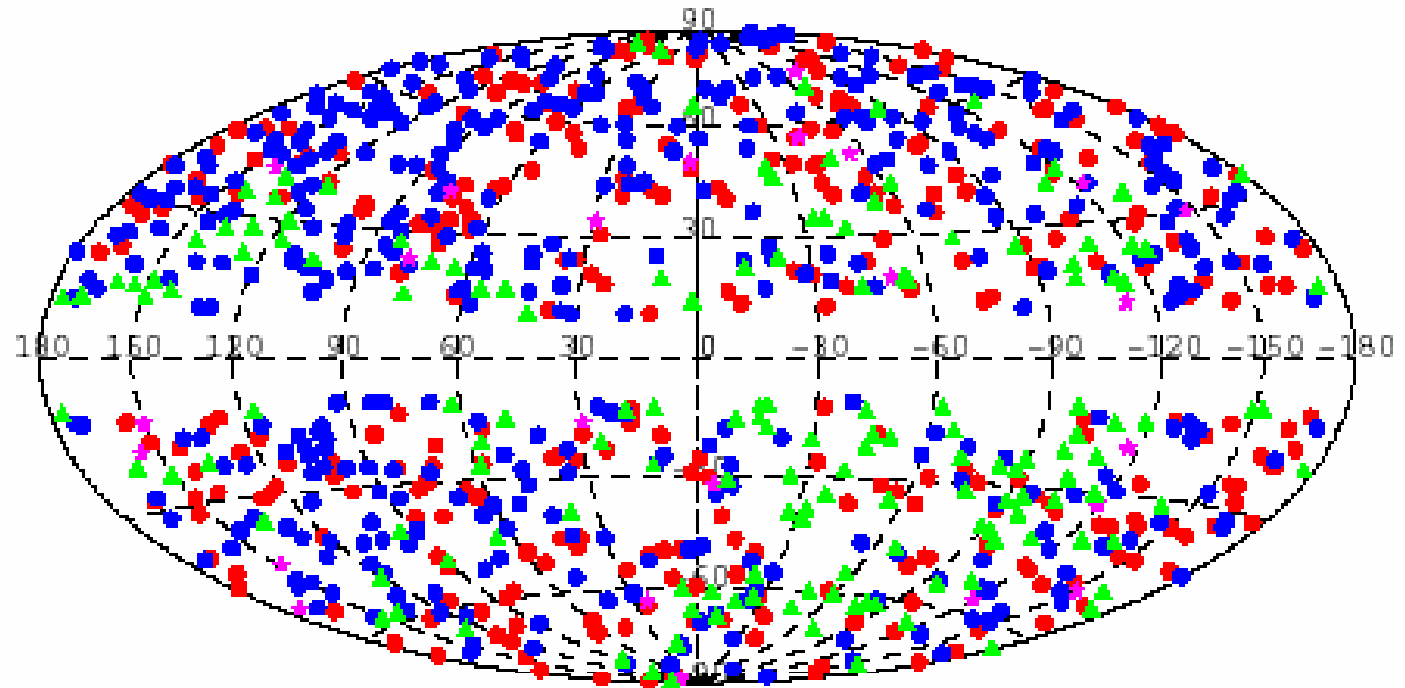
ガンマ線放射領域、および、その様子の解明
(他の波長と同じか？)

多数のブレーザーを遠方まで検出→ブレーザーの光度関数が得られる
(ジェットの宇宙論的進化、巨大ブラックホール進化との関係)

新しい種族の天体は？

The 2year LAT AGN catalog (2LAC)

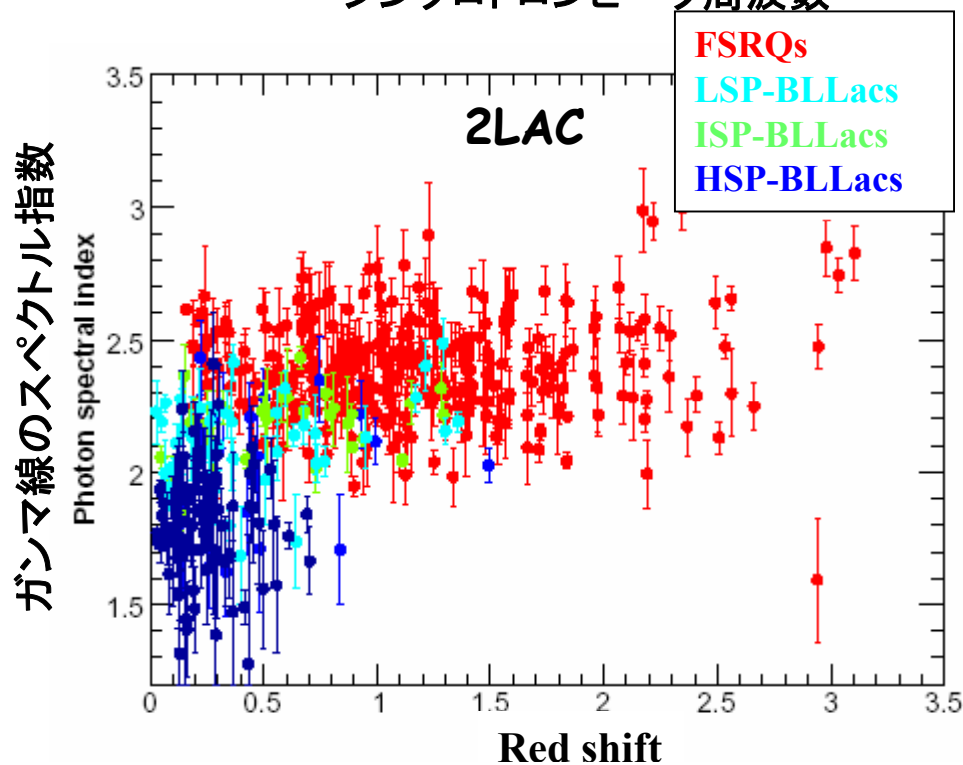
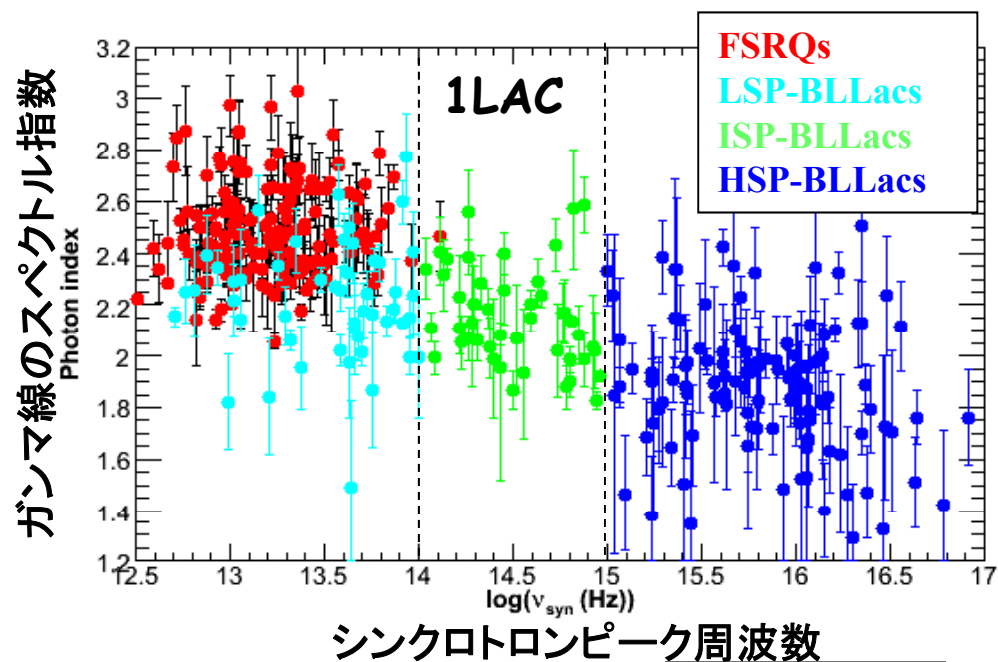
- 24 month data set
- 1079 $TS > 25$, $|b| > 1^\circ$
- 668 AGNs ($P_{\text{assoc}} > 0.99$)
+186 candidates
- 分類:
 - 428 FSRQs
 - 353 BLLacs
 - (257 of unknown type)
 - ~10 Radio galaxies



Blazar Sequenceの傾向と一致

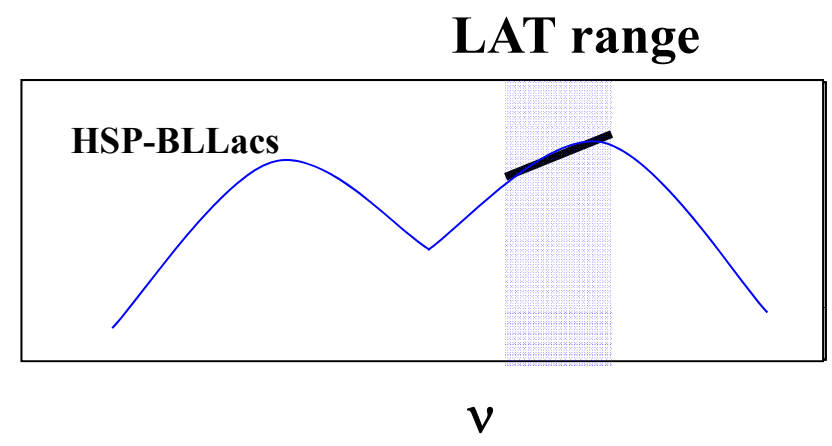
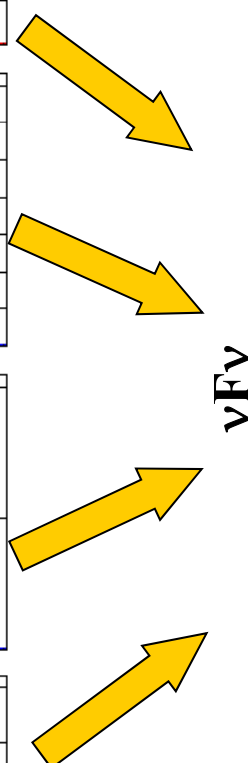
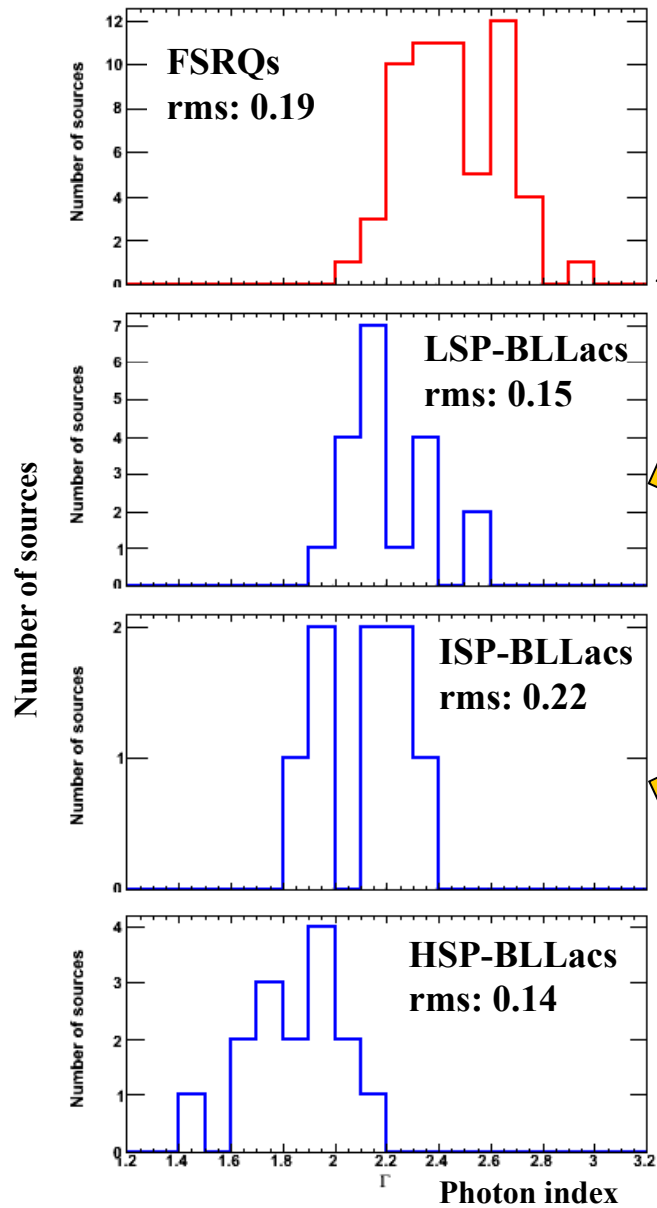
多くは、標準的であり、特異なものは少ない

$z=3$ を超えるくらいまで見えている。
BL Lac型は近め。



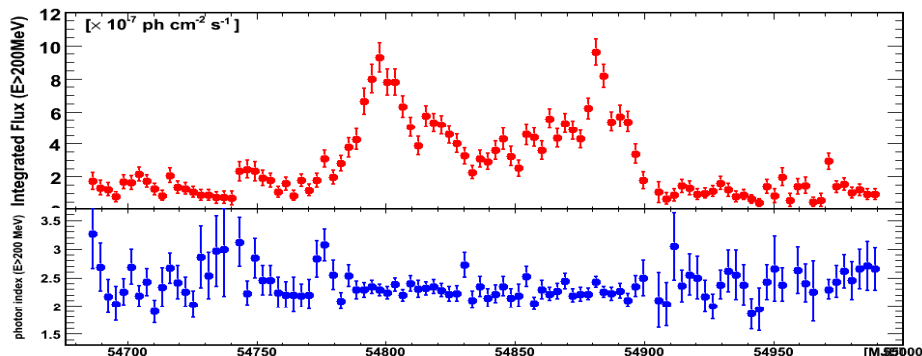
ガンマ線のpowerlaw photon indexの分布

2LAC

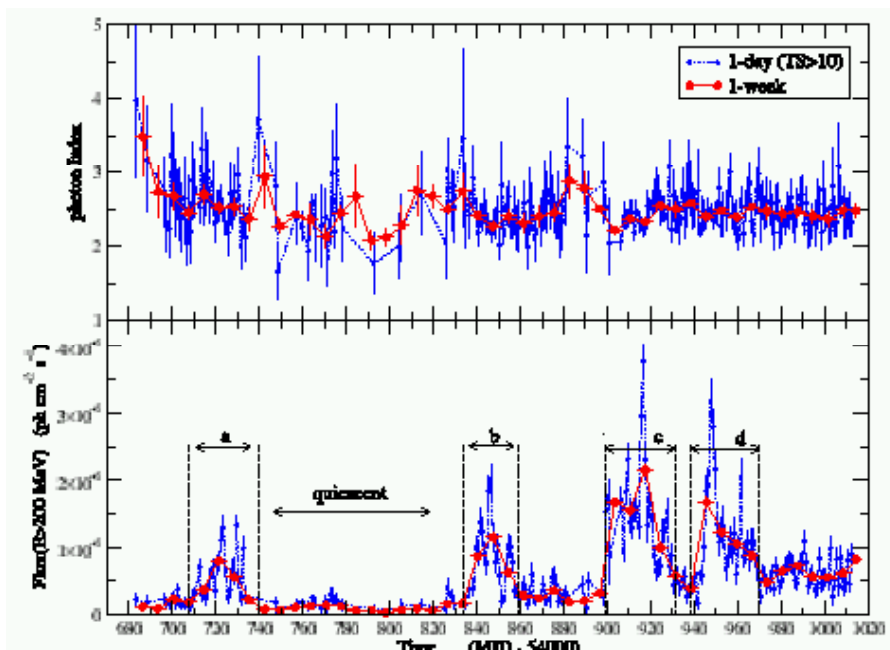


時間変動に対してGeV領域のphoton indexが、ほぼ一定

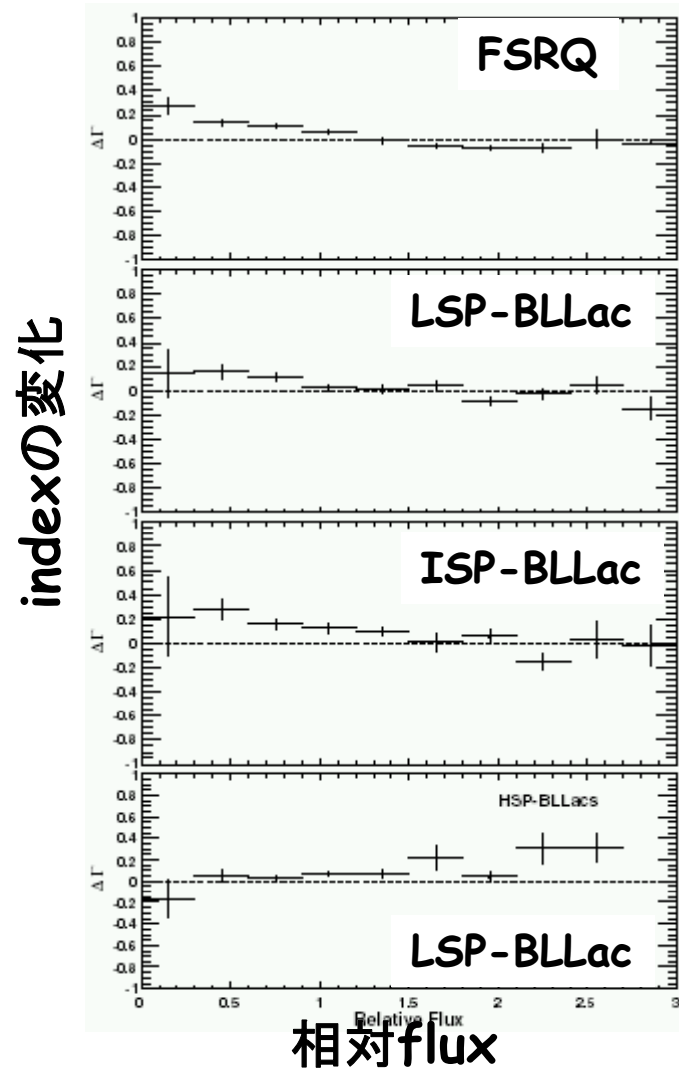
3C279 (FSRQ)



PKS1510 (FSRQ)



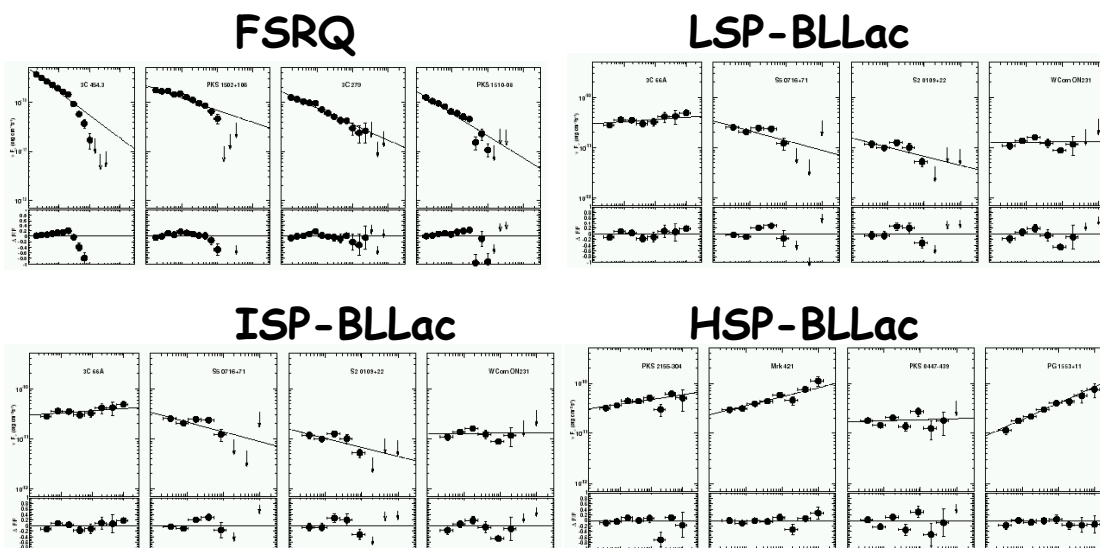
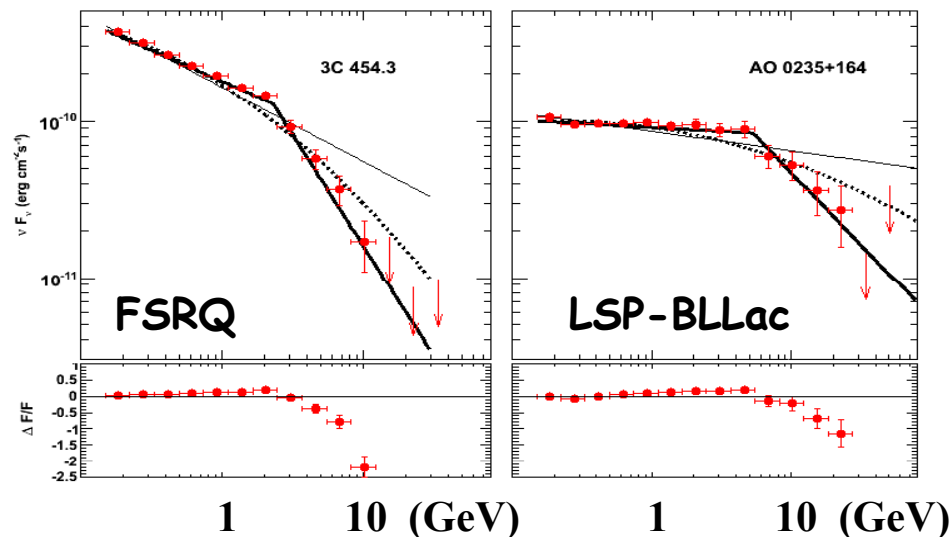
Blazar種別ごとの平均の振る舞い



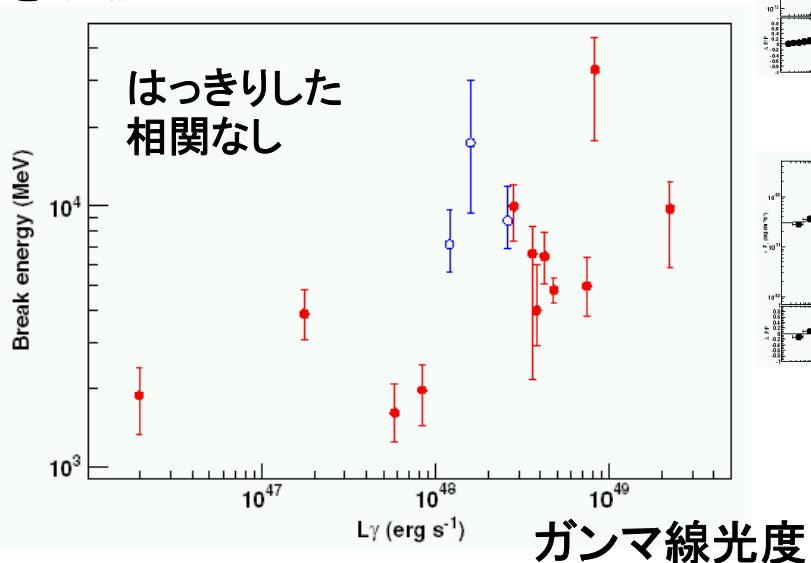
HSP-BL Lacを除いては、明るくなるとindexが0.2ほど小さくなる

FSRQ型やLSP-BL Lac型ではスペクトルにGeV付近で折れ曲がり

- ほとんどの天体で見られる
- Broken power-lawで、よく合う
- 折れ曲がりのべき指数の変化 $\Delta\Gamma \sim 1.0 \rightarrow$ 放射冷却 ($\Delta\Gamma = 0.5$)で説明できない
- 可能性として、
 - 粒子エネルギー分布の折れ曲がり(加速機構?)
 - Klein-Nishina effect
 - $\gamma\gamma$ absorption effect



E_{break}



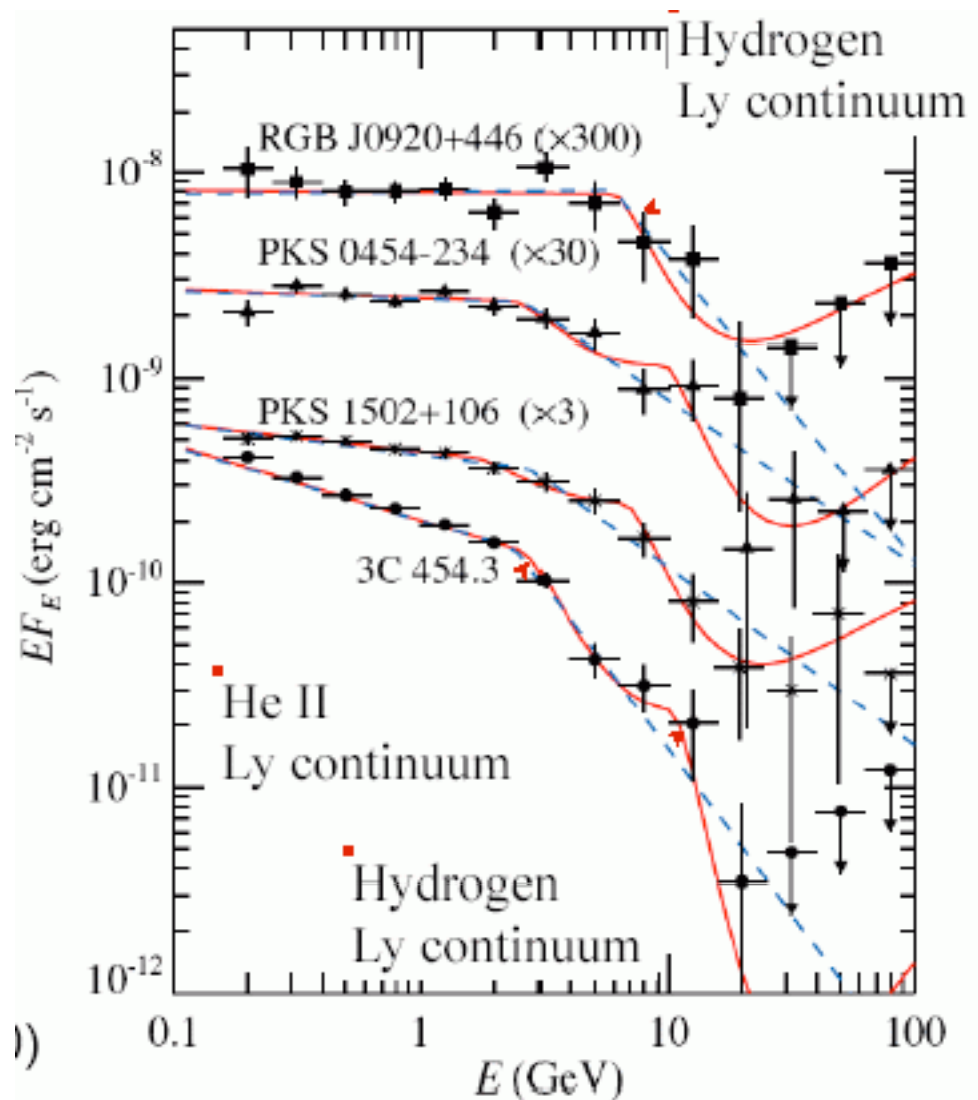
ガンマ線光度

ガンマ線スペクトルの折れ曲がり、BLR中の高電離領域からのHe Lyman continuum photonsによる吸収

Poutanen & Stem 2010

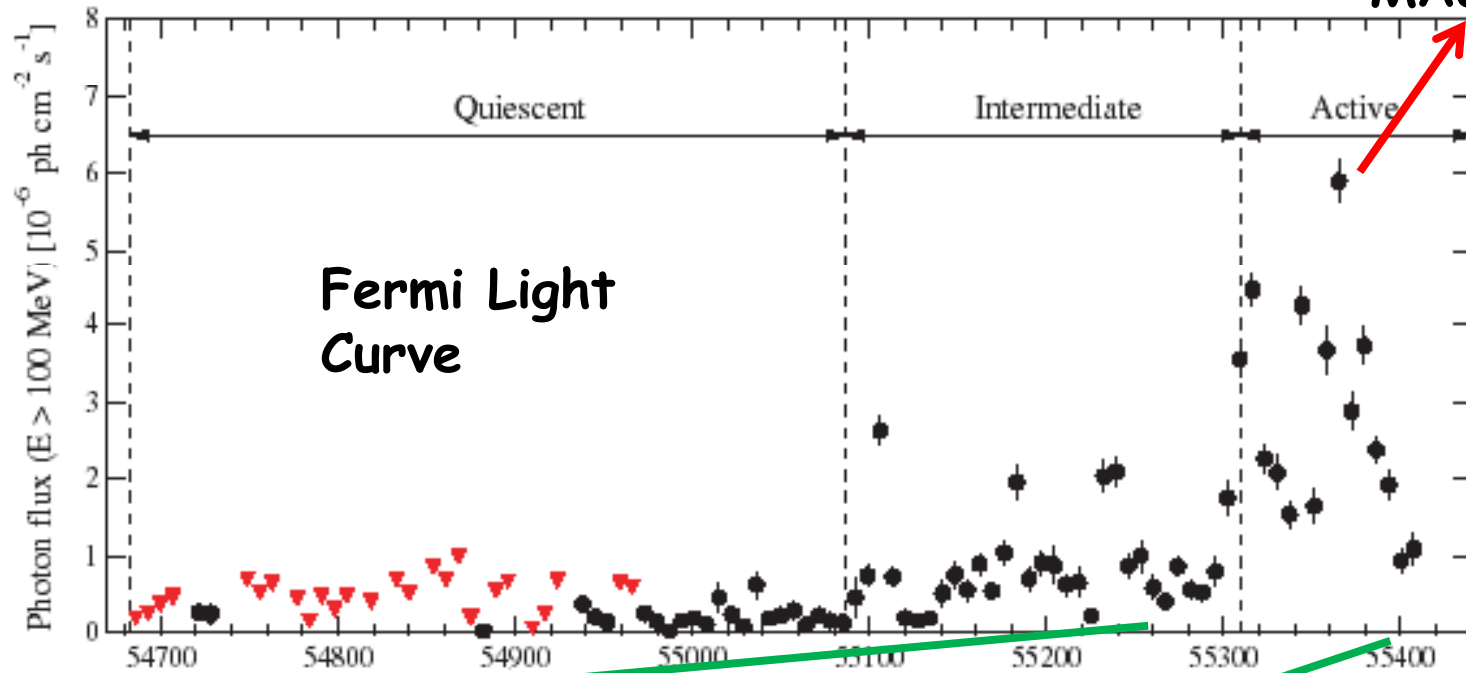
水素のLy α では数GeV- breakは作れない

| | "Line" energy | Threshold |
|-------------------|---------------|------------|
| H I Ly α | 10.2 eV | - 25.6 GeV |
| H I Ly cont. | 13.6 eV | - 19.2 GeV |
| He II Ly α | 40.8 eV | - 6.4 GeV |
| He II Ly cont. | 54.4 eV | - 4.8 GeV |

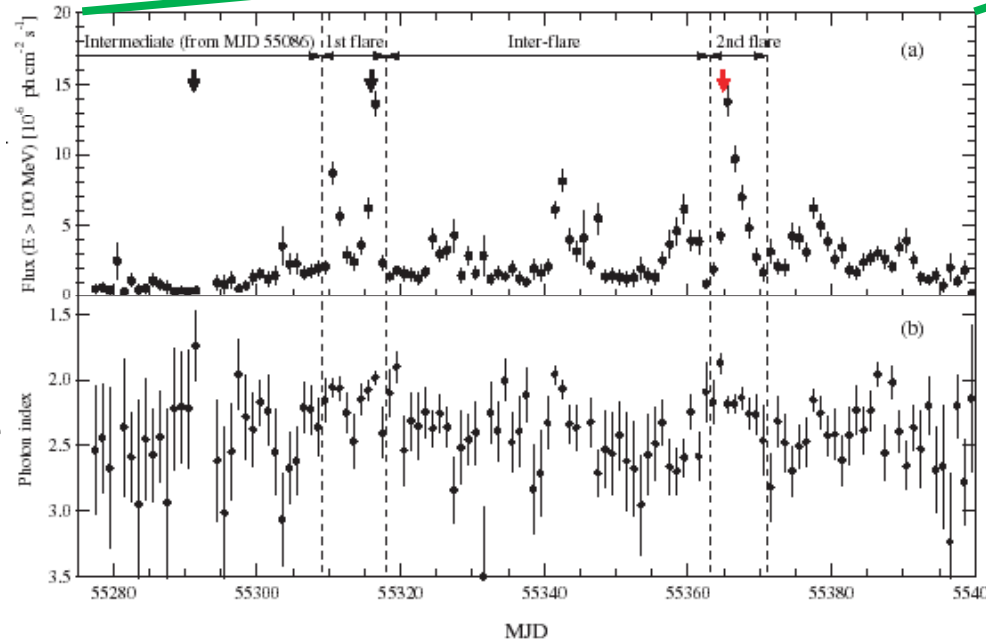


FSRQ 4C+21.35(PKS1222+216)の大フレア@2010

MAGICで検出
Jun.17

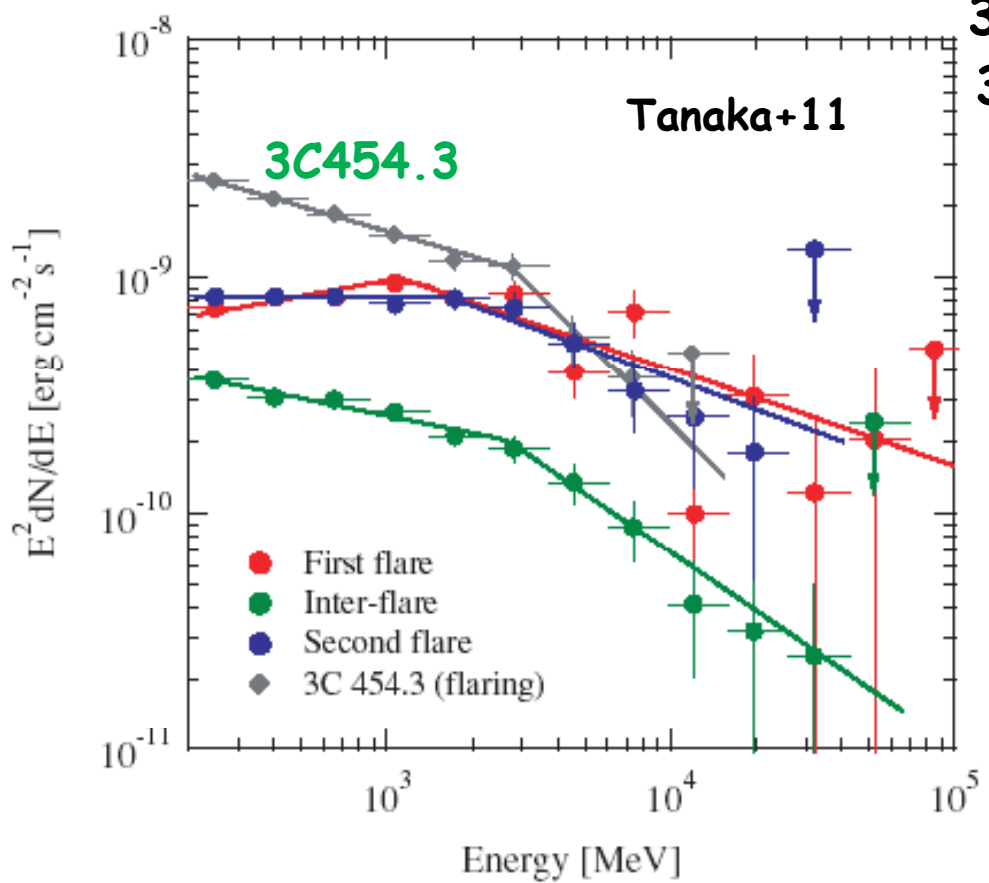


GeV flux



Tanaka+11

FSRQ 4C+21.35 : ガンマ線スペクトルの折れ曲がり



3C454.3と同じく明るさによらない
3C454.3より、折れ曲がり小

3C454.3 : $\Delta\Gamma=1$
4C21 : $\Delta\Gamma=0.5$

Ly Heによる吸収で説明できる

ガンマ線放射領域は、BLR周辺
($D \sim 1E17cm$)

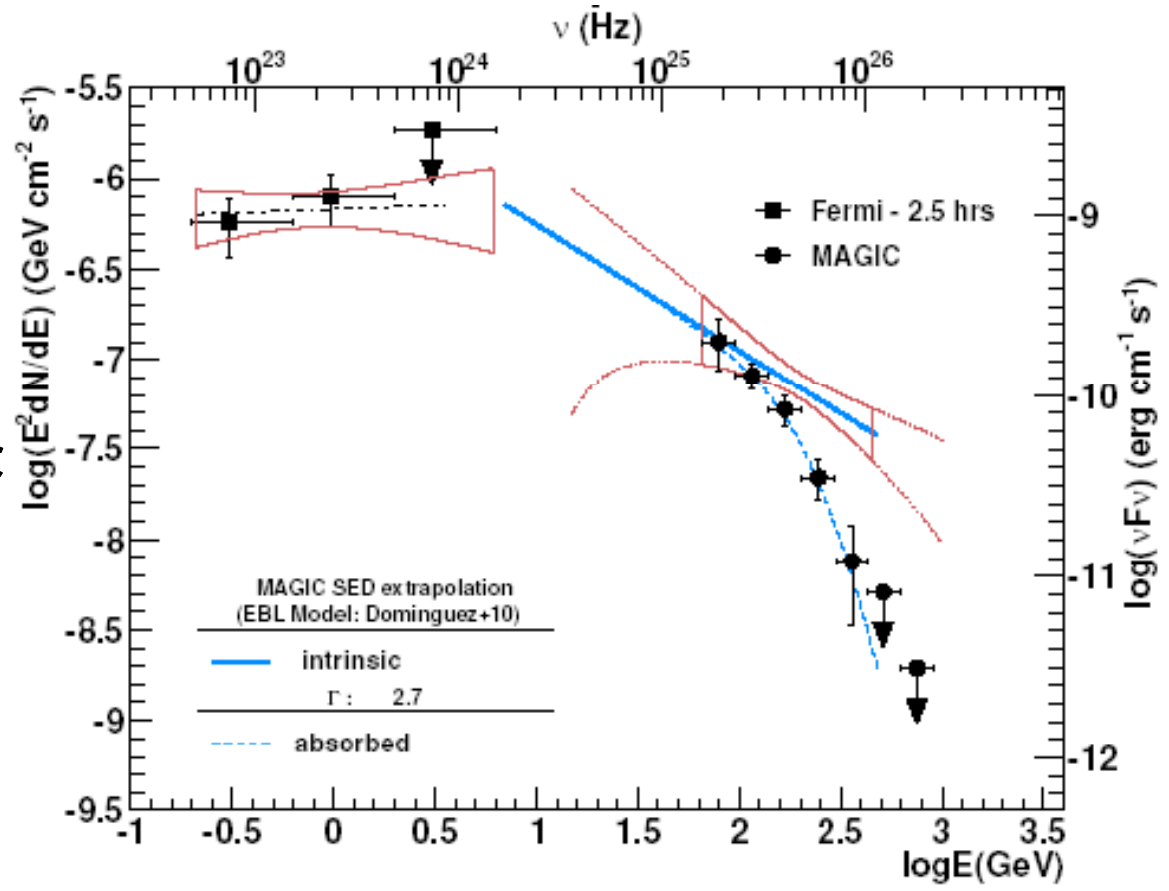
3C454.3に比べてLdisk小 → スペクトル吸収小さい
→ 折れ曲がり小

FSRQ 4C+21.35 : MAGIC TeVガンマ線の検出

Aleksic+11

GeV/TeVガンマ線放射領域
は、BLRの外でなければならない

$(0.4\text{TeV} \cdot 1\mu\text{m}) < 1$
 $\delta > 1E19\text{cm}$ (Hot Dust
Trous)



$L_{\text{jet}} = L_{\gamma} / \Gamma^2 = 1E48 / (15)^2 \sim L_{\text{disk}} = 1E45 \text{erg/s}$
限界光度に達している

PKS 2155–304: Light Curves and Correlated Variability

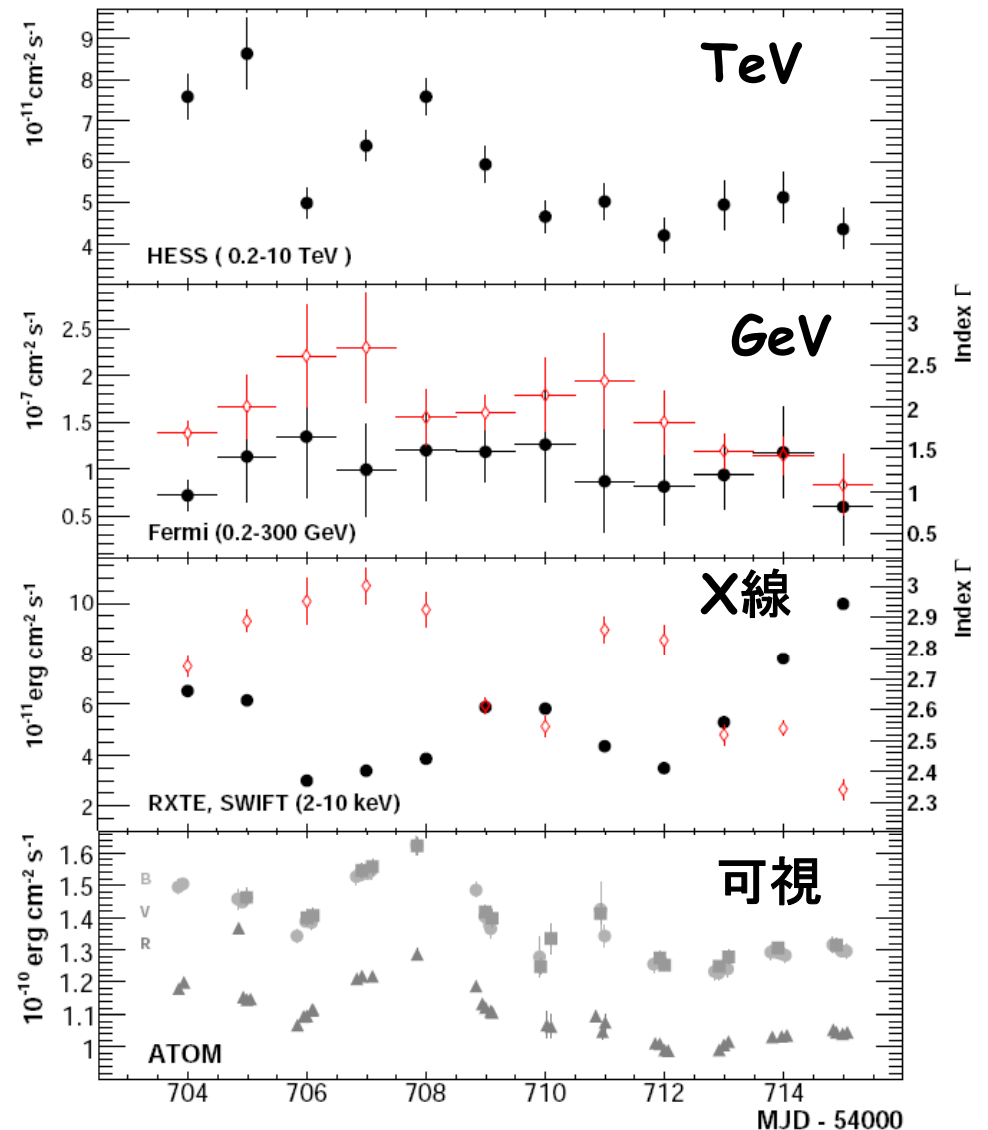
複雑な時間変動

- X-ray とTeVが相関していない
- TeVではスペクトル変化小($\Delta\Gamma_{\text{VHE}} < 0.2$)
- X線ではスペクトル変化大 ($\Delta\Gamma_{\text{X}} \sim 0.5$) → 放射冷却
⇒ X線を作る高エネルギー電子の方が冷却されやすい
- 可視とTeVが相関(放射電子のエネルギーは異なるはず)
- 可視とGeVが相関なし(放射電子のエネルギーが近いはず)

Multi-zone SSCモデルが要求される

他の多くの天体でも同じ

ジェットの中には複数の領域が輝いている



BLRの外側で、小さい領域が光っている

Recollimation

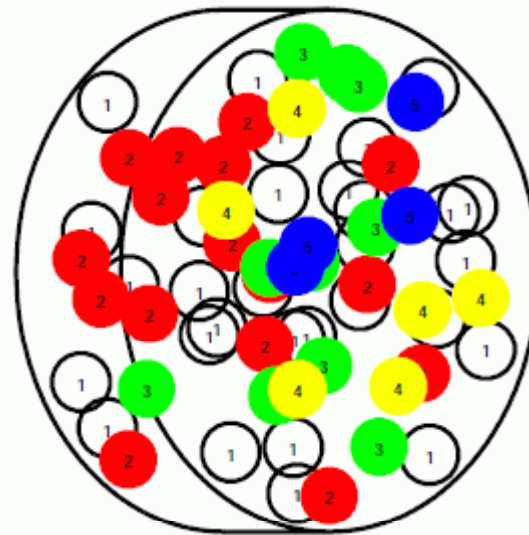
Marscher+80, Bramberg&Levinson+09

Reconfinement shocks

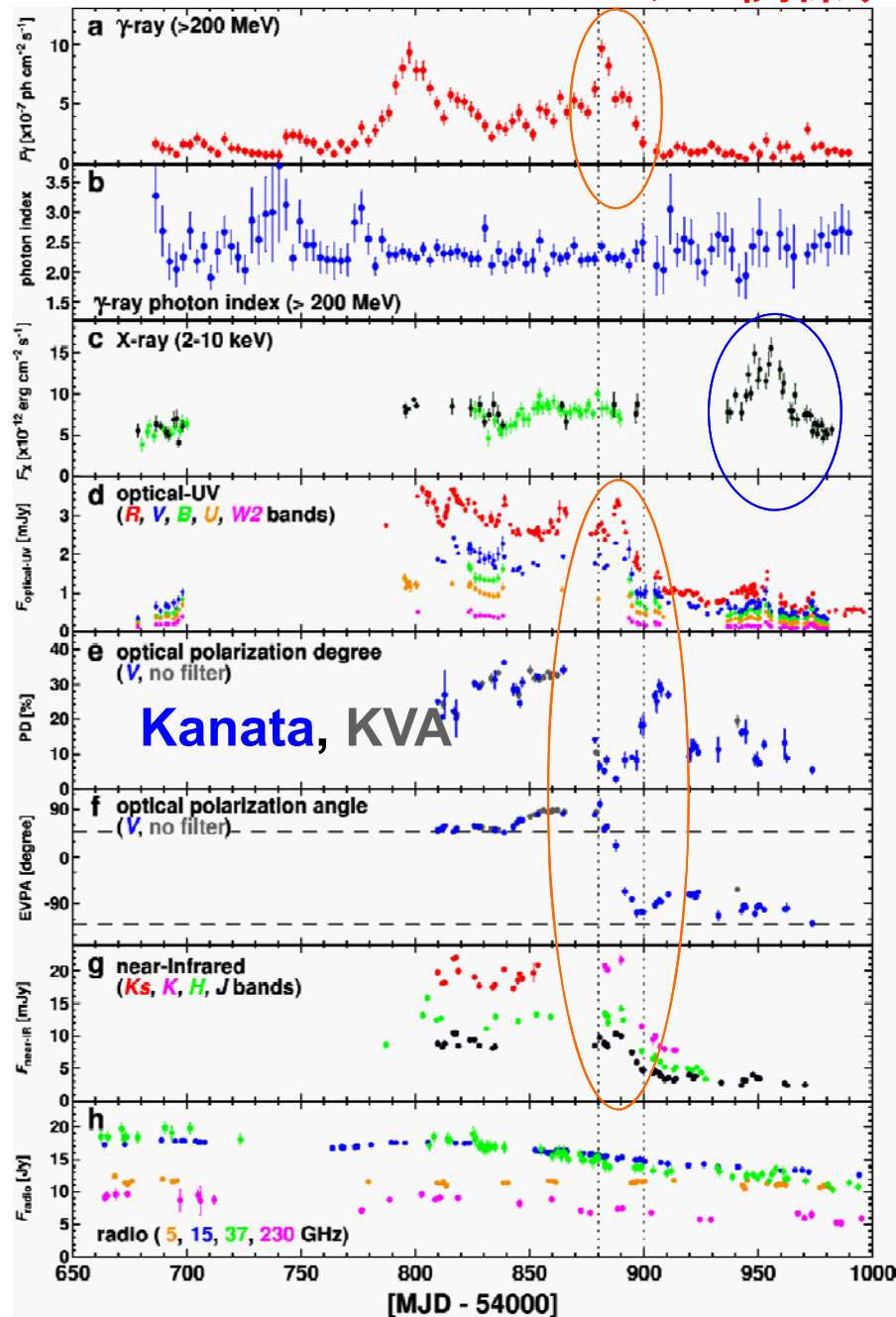
Nalewajko&Sikora+09, Stawarz+06

Compact region embedded

Giannios+09, Marscher&Jorstad+10, Ghisellini&Tavecchio+08



フレアに関するジェットの磁場構造の情報(3C279)



γ-ray (LAT)

γ-ray photon index (LAT)

X-ray

optical-UV

optical polarization degree (PD)

広島大学かなた望遠鏡

optical polarization angle (EVPA)

Near-Infrared

Radio

ガンマ線フレアとともに、可視偏光面の角度が回転
(20日で208度回転)

放射領域
 $D \sim 10^{19} \text{ cm}$

電波は変動が見られない
→シンクロトン自己吸収
→放射領域のサイズは、
 $R_b < 5 \times 10^{16} \text{ cm}$

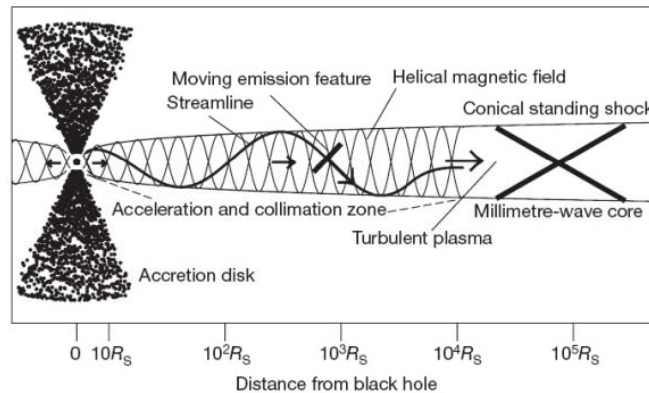
フレアに伴うブレーザーの可視偏光の回転は、最近検出され始めた

(広島大学かなた望遠鏡でも、いくつか)

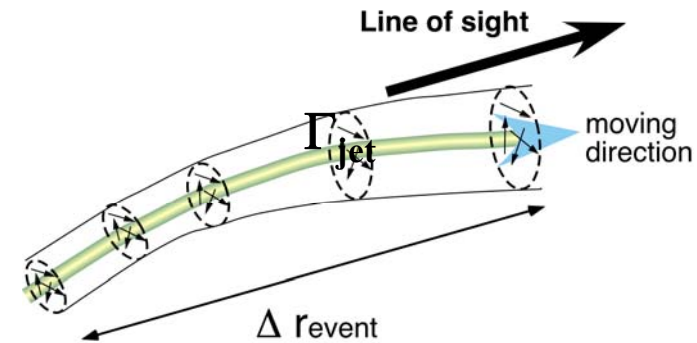
Marscher+08,10; Sasada+09

ジェットの構造に対して制限を与える

1. helical magnetic field model (Marscher et al. 2008)



2. bend jet model



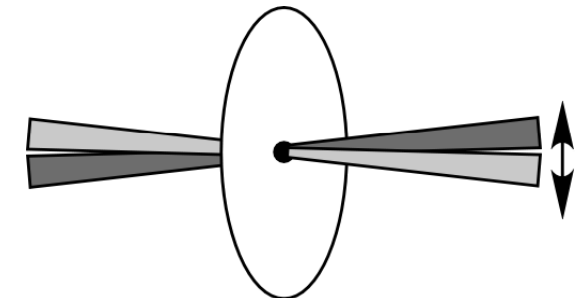
ガンマ線放射領域の位置は：

$$\Delta r_{\text{event}} \sim 10^{19} (\Delta t_{\text{event}}/20 \text{ days}) (\Gamma_{\text{jet}}/15)^2 \text{ cm} . \sim 10^5 \text{ シュワルツシルド半径}$$

3. “flow-through” (jet wobbling) scenario

ジェットのビーミング効果が入らないので、ゆっくりと変動

放射領域の位置： $r_{\text{event}} \sim c \Delta t_{\text{event}} \sim 10^3$ シュワルツシルド半径



シナリオ1と3は、常に同じ方向の偏光面回転を予測するが、3C279では過去に逆方向の回転が観測されている(Larionov+08). 3C454.3でも観測されている(Sasada+10)。

新しい部類のガンマ線AGN:

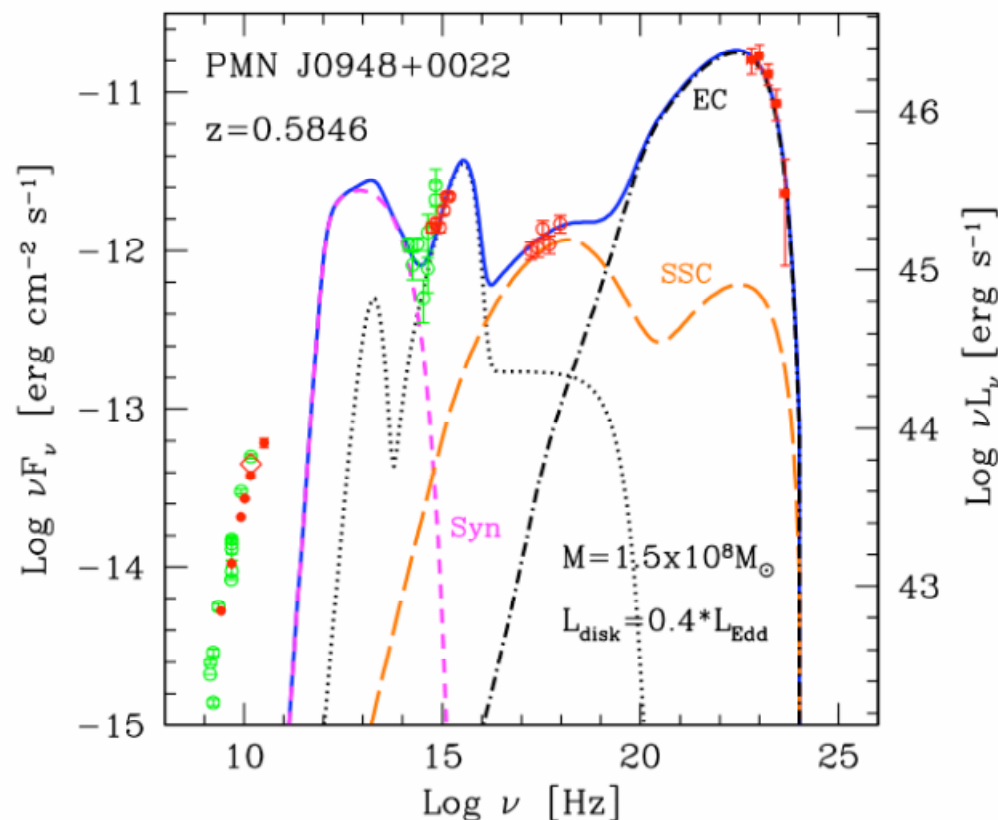
Narrow-Line Radio-loud Seyfert galaxy (NLSy1)

PMN J0948+0022 ガンマ線光度 $\sim 10^{48}$ erg s $^{-1}$

- 小さいBH質量 ($10^{6.7}-10^{8.2} M_{\odot}$) でとても高い降着率 ($\sim 90\%$ Eddington)
(Blazarや電波銀河は、 $10^7-10^{10} M_{\odot}$)
- Blazarや電波銀河と異なり、渦巻銀河に含まれる
- 電波の構造は非常にコンパクト(ジェットやローブが不明)

多波長スペクトルは、Blazarと同じく、
SSC+ECモデルで合う。
ジェットのパワーは、FSRQ型とBL
Lac型の間程度

降着円盤とジェットの関係を探るため
に重要な天体



新しい部類のガンマ線AGN:電波銀河

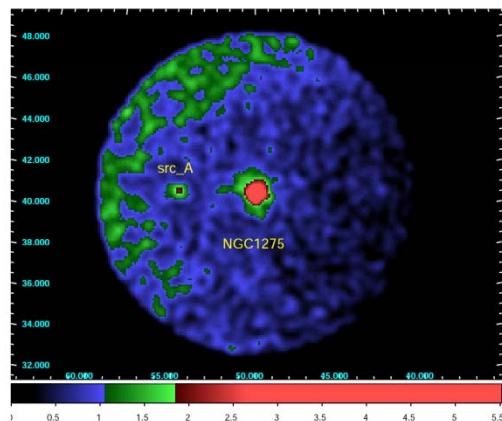
EGRET: Cen A と2, 3の電波銀河からのGeVガンマ線放射の兆候
3EG catalog: Hartman et al. (1999) 他に、3C111 and NGC6251?
see also Sreekumar et al. (1999)

2000年代に入り、M87からTeVガンマ線が検出された

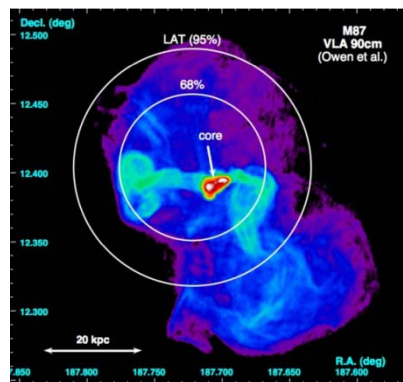
ジェットをいろいろな角度から見ることにより、ジェットの構造の情報を得られる(Blazarはビーミングで、ジェット中心部のみ見える)

フェルミでは、数か月で代表的な3つの電波銀河が検出された
(これら3つは、同時期にTeVでも検出された)
2年間では、約10個が検出。

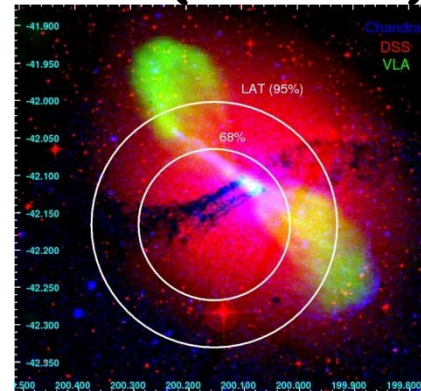
NGC1275(Per A)



M87(Vir A)



Cen A(NGC5128)



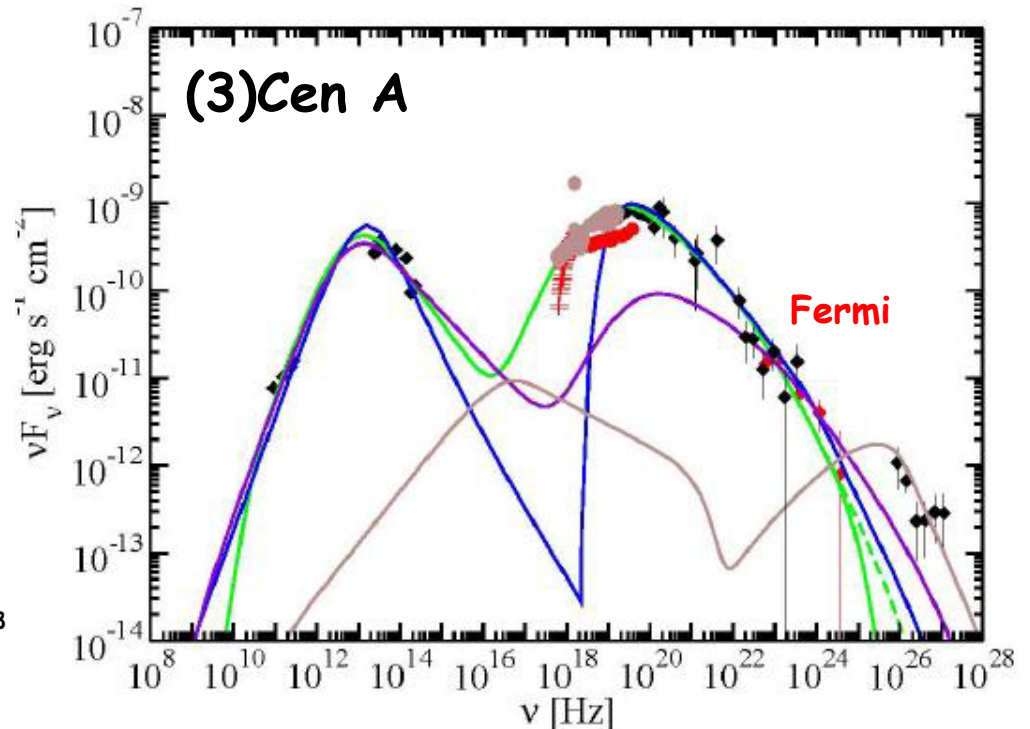
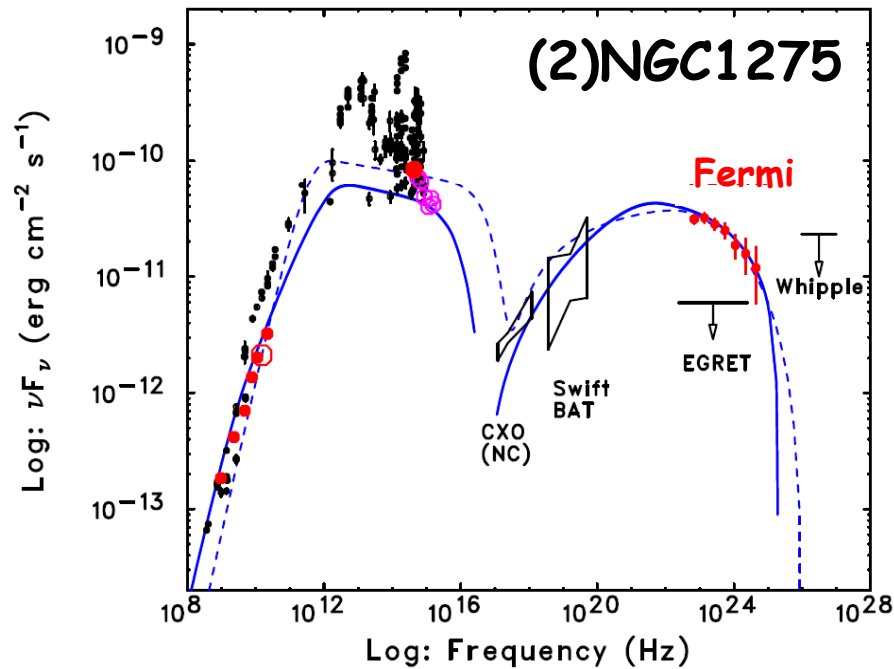
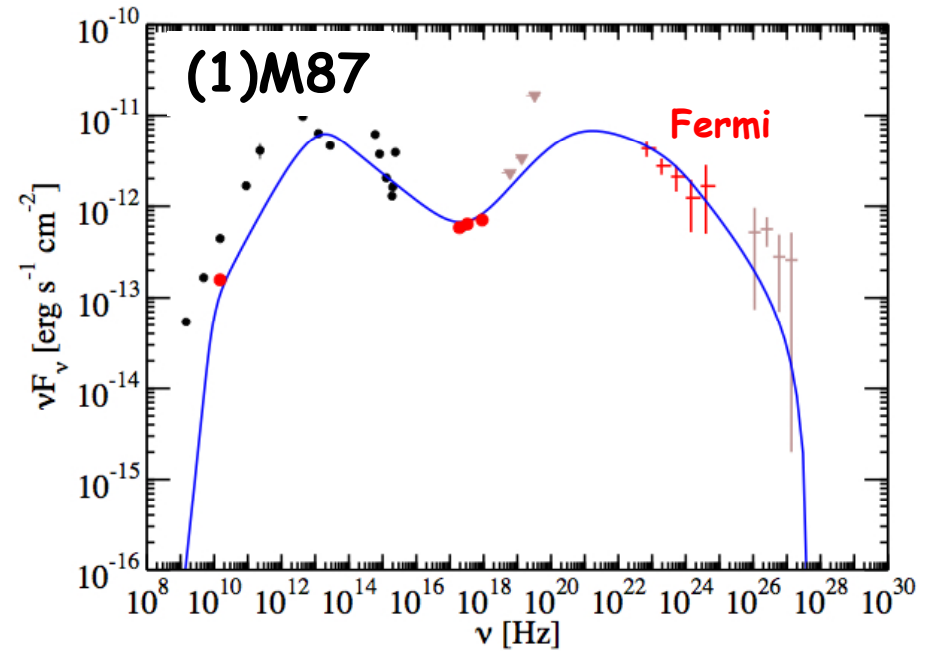
円は、
エラーサークル

多波長スペクトル

SSCモデルで、だいたい再現できる
 ただし、可視光からX線は、ジェット
 放射がはつきり捉えられていない

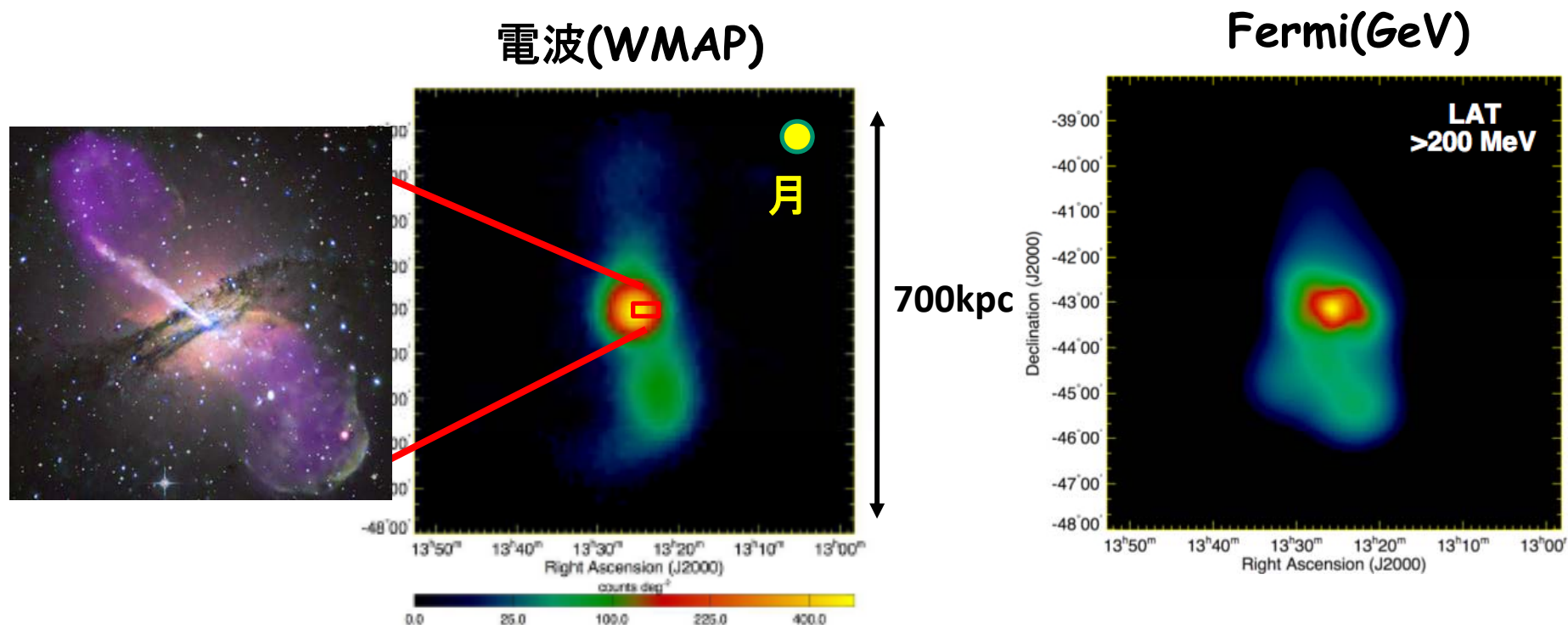
| | (1) | (2) | (3) |
|----------|------|----------|--------|
| δ | 2-3 | 1.8-5 | 1-5 |
| B | 0.06 | 0.05-0.2 | 0.2-2G |
| θ | 10 | 20-30 | 20-30度 |

ジェットの角度 θ が大きめ、 $\Gamma \sim \delta$ も小さめ？



新たなガンマ線AGN: 電波ローブ (Cen A Lobe)

これまで見つかった最も大きいガンマ線天体



(注)ローブからの放射はビーミングしていない。ガンマ線は、CMBを逆コンプトンしたもので説明できる。

ジェットの根元からTeV電子が出ているとすると、300kpcも走る前に、弱ってしまう。



巨大な電波ローブ自体で加速されている(乱流フェルミ2次加速?)

我々の銀河にもローブに似た大きな泡がガンマ線で光っていた

Su et al. 2010

ROSATでもリング構造が見えていた

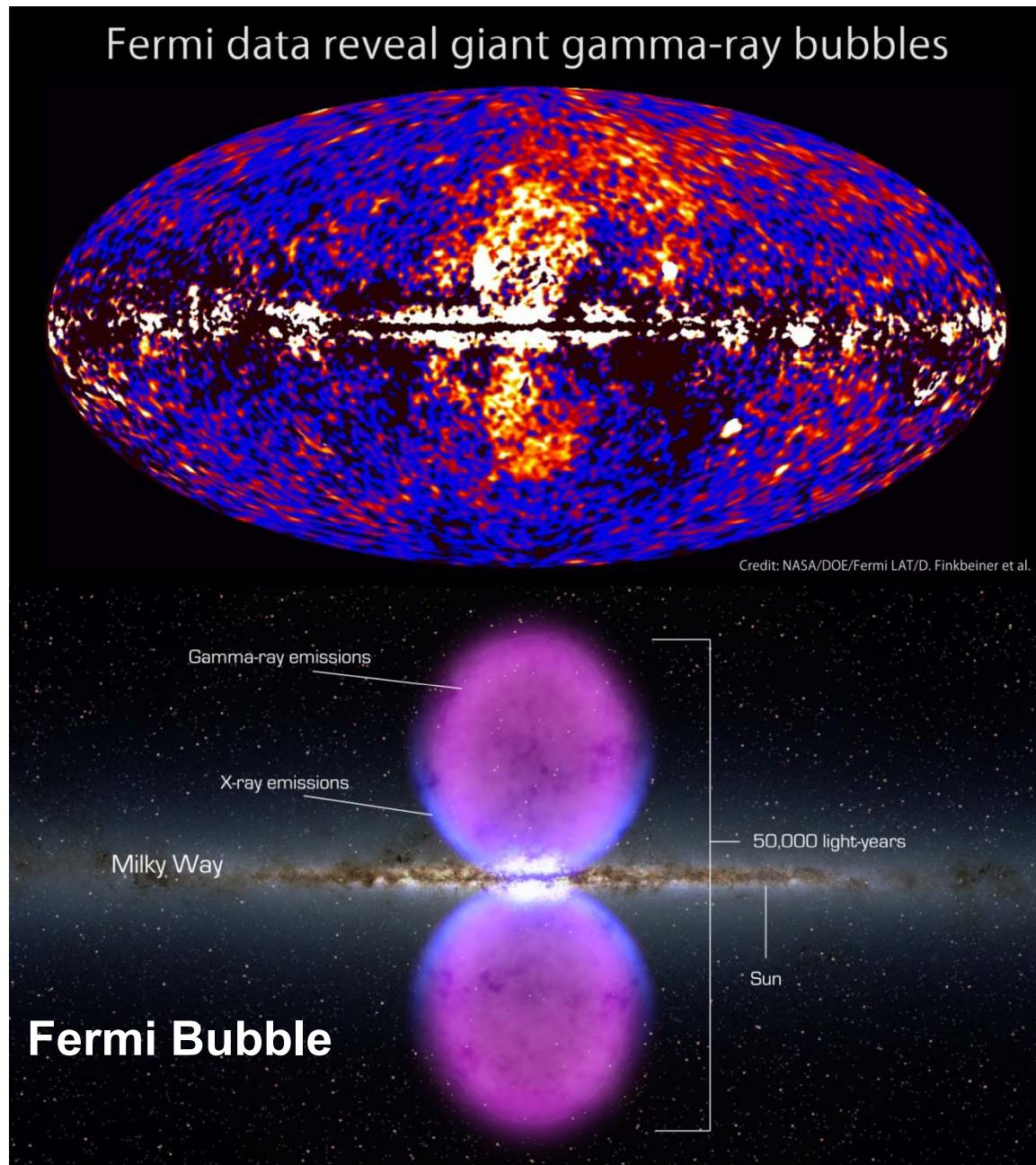
WMAPでも光っているので、電波ローブと言っても良い(Cen A lobe の1/50)

ガンマ線スペクトル、ベキ2くらい(通常の銀河面放射よりもハード):光度は銀河面全体の数%

X線から熱エネルギーは 10^{54-55} ergで、音速 < 1000 km/sより、 10^7 年前に発生

(過去の激しいAGN活動かスターバースト活動?)

バブル中でフェルミ2次加速により 10^{15} eVの宇宙線加速?(Cheng+11)



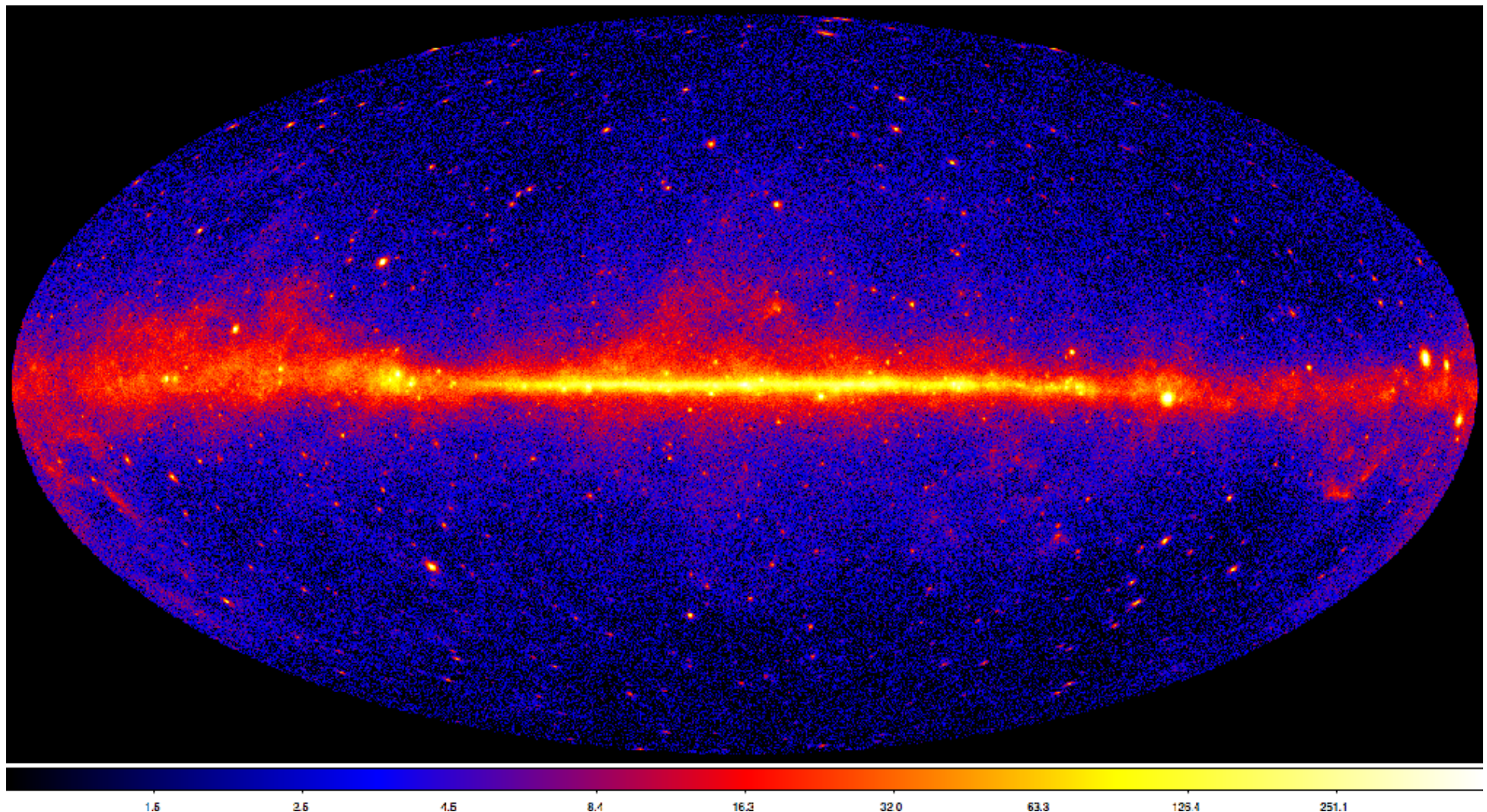
ガンマ線背景放射と遠方天体

ガンマ線背景放射の精度良い測定

既知の遠方天体の重ね合わせ or 未知天体？ or ダークマター？

ガンマ線天体のlogN-logSの初めての導出

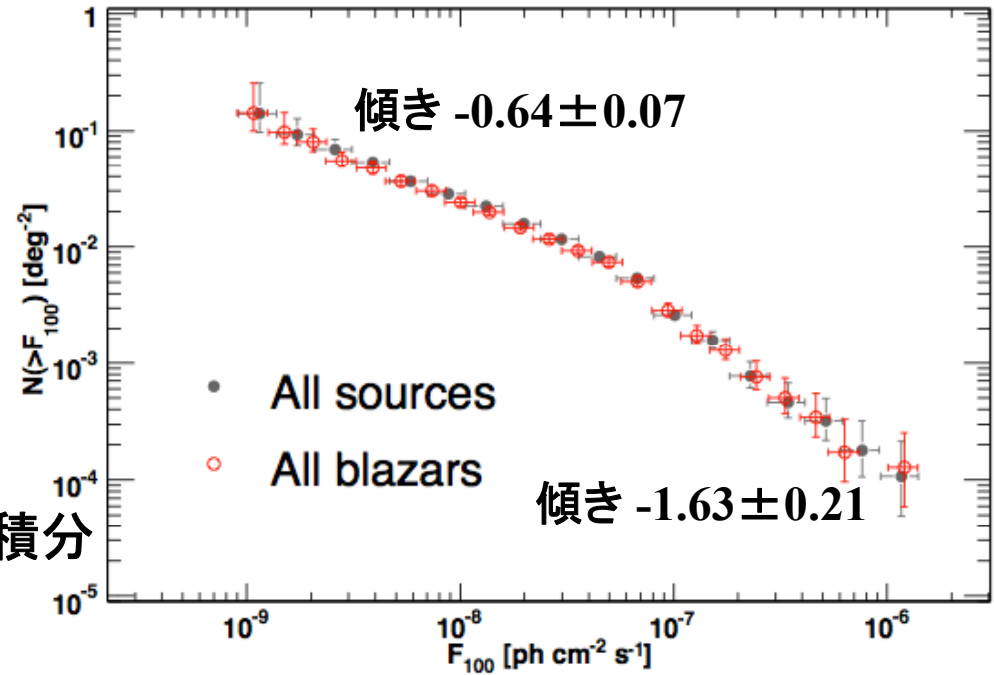
背景放射への寄与を見積もれる



GeVガンマ線天体のlogN-logS

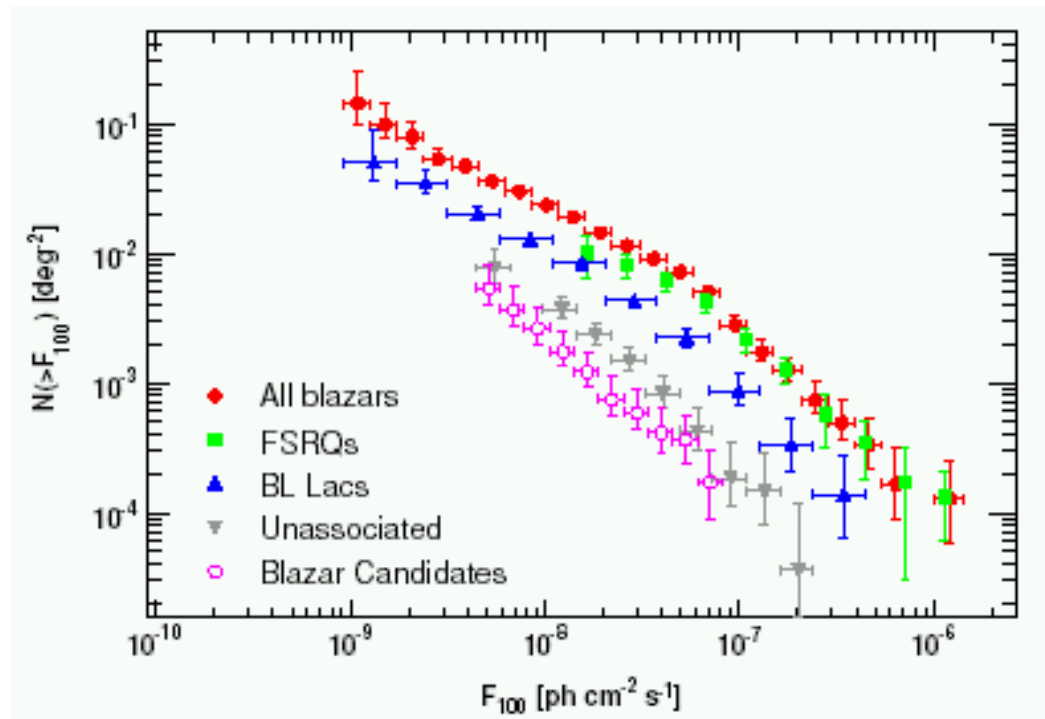
明るい側は、-1.5
暗い側でフラットになっている
折れ曲がり 7×10^{-8} ph/s/cm²

$S > 9.36 \times 10^{-10}$ 以上でlogN-logSを積分
天体密度 0.12 deg⁻²

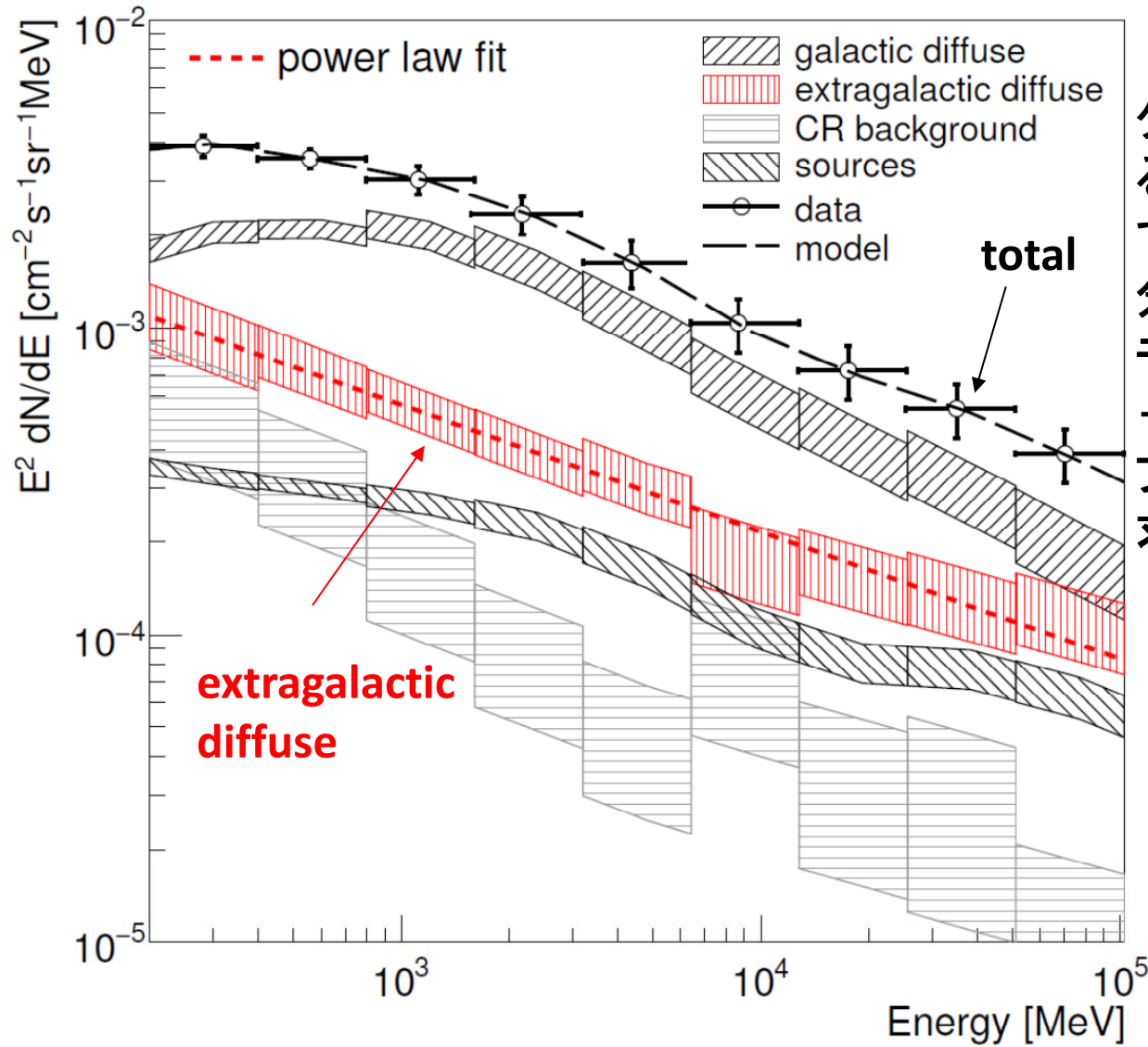


天体種別ごとでは、

FSRQ, BL Lac型とも似た位置に折れ曲がり



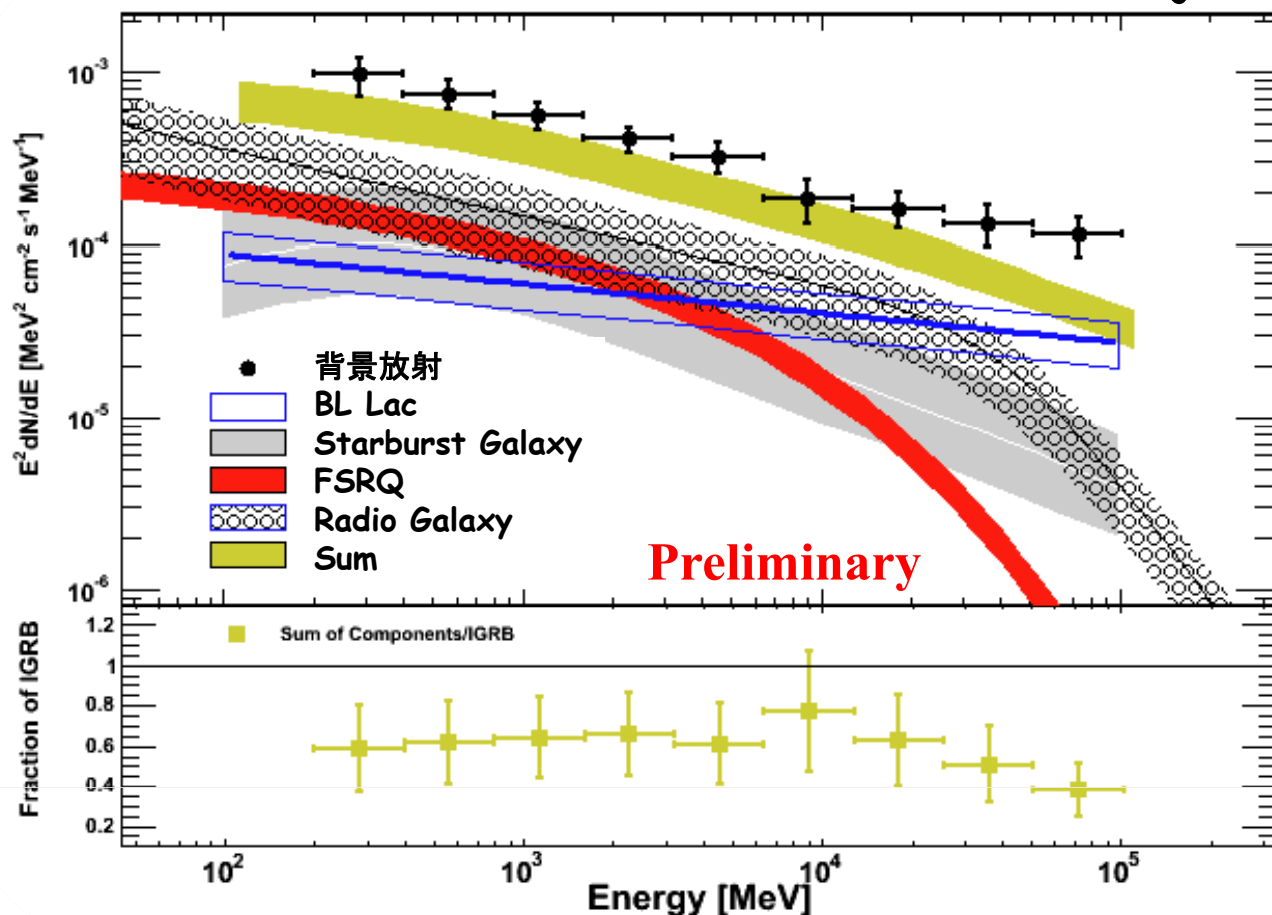
背景放射の解析 (200 MeV - 100 GeV)



$|b| > 10^\circ$ の(宇宙線バックグラウンドの混入が小さくなる選別をした)データに対して、9つのエネルギー帯に分けて、左の各要素成分をモデルとして入れて、(空間+エネルギー)の3次元フィットを行って、各成分を求めた。

ガンマ線背景放射への各種ガンマ線天体の寄与の見積もり(現状)

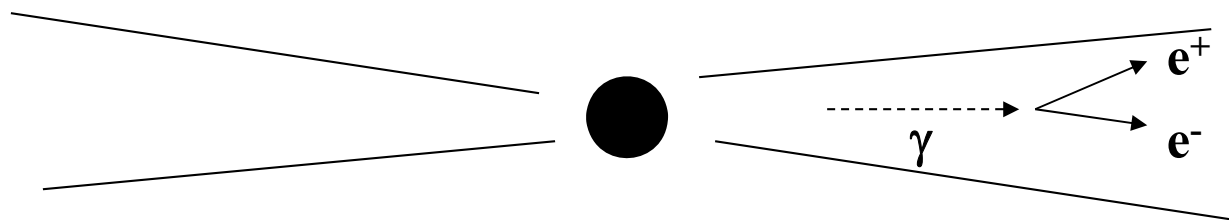
Ajello+11



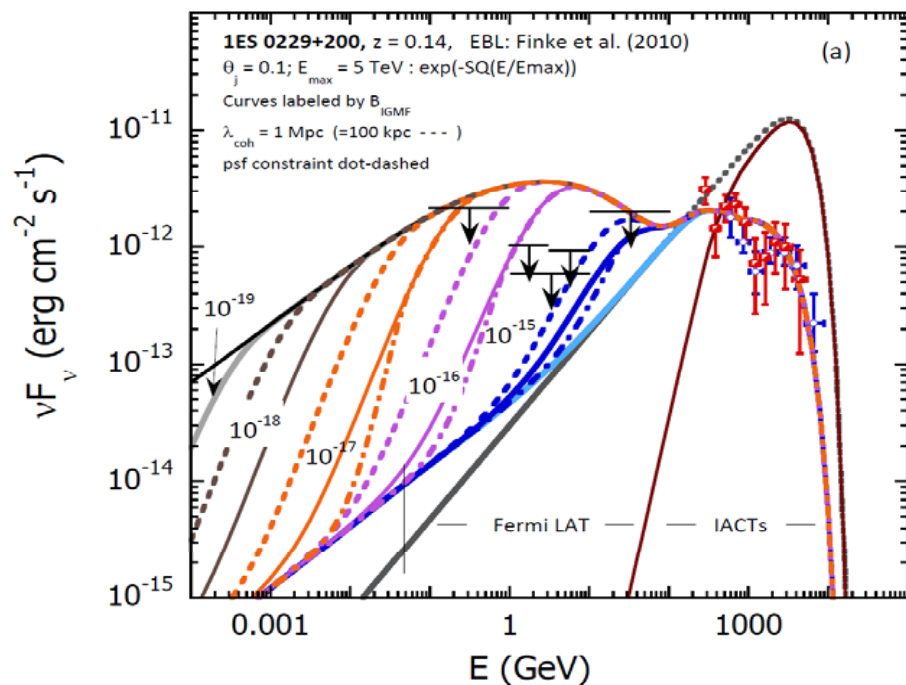
See other studies by: Stecker&Salomon+96, Pavlidou&Fields+02, Narumoto&Totani06, Dermer07, Bhattacharya+09, Inoue&Totani09, Fields+10, Makiya+10, Inoue+11, Abazajian+10, Ghirlanda+11, Stecker&Venters11, Malyshev&Hogg11

銀河間磁場と遠方AGNのガンマ線の相互作用 Ahalonian+94

銀河間磁場: 銀河や星の磁場の種、宇宙創成時の初期生成、あるいは、初期宇宙でのプラズマ運動で生成、検出は皆無



AGNからのTeV光子は、 e^+e^- になり、それらが散乱を通して、低エネルギーのガンマ線となり、広がっていく。その広がりが、フェルミのPSFよりも小さい場合には、AGNのスペクトルに寄与してしまう。



$$\Rightarrow B_{\text{IGMF}} > 10^{-15} \text{ G}$$

(Neronov & Vovk 2010; Tavecchio et al. 2010)

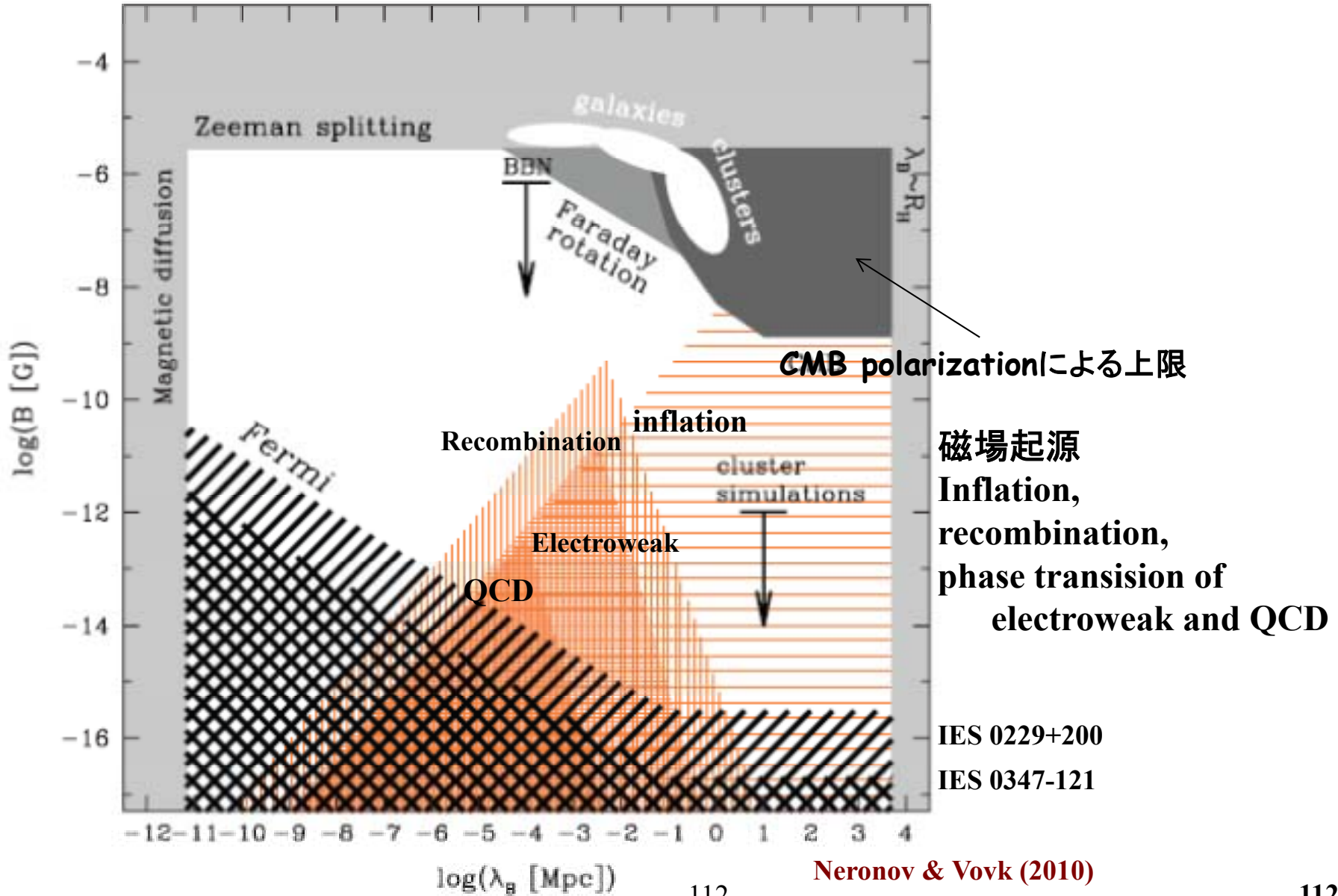
$$\Rightarrow B_{\text{IGMF}} > 10^{-18} \text{ G}$$

(時間変動の効果も考慮)

(Dermer 2011)

(Dermer 2011)

Limits on IGMF and Correlation Length



最後に

フェルミ衛星のデータは、即時公開なので、解析したい人は、すぐに解析できます。

これまで、見えてこなかった天体・放射、あるいはできなかった観測手法を、自由なアイデアで試せます。

電波からX線までの観測で、フェルミ天体について面白いサイエンステーマを見つけてください。

次期地上TeVガンマ線望遠鏡CTAにつながるサイエンスの良い材料を見つけてください。